

MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ AKADEMİK ÇALIŞMALAR

All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE YENİLİKÇİ AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Editör
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Mühendislikte Yenilikçi Akademik Çalışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design
Basım Tarihi: Aralık 2025
Yayıncı Sertifika Numarası: 72273
ISBN: 978-625-8536-60-7

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com
allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm **10**

Deneysel Olarak Modellenen Sismitler

Calibe KOÇ TAŞGIN

2. Bölüm **27**

Malzeme Bilimi Açısından Gündelik Dilimizde Yapılan Bazı Kavramsal Hatalar

Ferhat BÜLBÜL

3. Bölüm **52**

Elektriksiz Kaplamalarla Manyetik Özelliklerin Modifikasyonu: Bir Derleme

Ferhat BÜLBÜL, Merve Gizem ÖZDEN

4. Bölüm **75**

Siyez Unu ile Üretilen Bebe Bisküvilerinde Protein ve Karbonhidrat Sindirilebilirliği: Beslenme ve Sağlik Açısından Önemi

Yasemin KIZILASLAN, Halime PEHLİVANOĞLU, Mustafa YAMAN

5. Bölüm **137**

Mühendislik Uygulamalarında Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) Metotları ile Güvenilirlik Değerlendirmesi

Simge COŞKUN, Ali Hakan IŞIK

6. Bölüm **158**

Aort Anevrizmasının Konumu ve Çapının Kan Akışı Üzerindeki Etkilerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi

Hakan BAYRAKCI, Arif ÇUTAY, Özdeş ÇERMİK

7. Bölüm **170**

Plazma Aktif Su Uygulamasının Gıdaların Kalitesi ve Bileşenleri Üzerine Etkisi

Berkay KOPUK, Recep GÜNEŞ, Harun URAN

8. Bölüm **209**

Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerde Yüksek Basınç Etkisi

Kübra YAKINCI, M. Eyyuphan YAKINCI

9. Bölüm **229**

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Yığma Yapılarda Gözlenen Hasar Mekanizmalarının Saha İncelemesi

Muhammet ÇINAR

10.Bölüm **249**

İlin Ekonomisine Katkısı Bakımından Enerji Üretiminde Değerlendirilebilecek Malatya İlinin Atık Potansiyeli

Rasim BEHÇET

11.Bölüm **261**

Enerji–Su İlişkisinin Mühendislik Perspektifinden Değerlendirilmesi

Rasim BEHÇET

12.Bölüm **279**

5G NR Ağlarında Gecikme Duyarlı Optimizasyon: Derin Pekiştirmeli Öğrenme Perspektifi

Asuman SAVAŞCIHABEŞ

13.Bölüm **291**

Su Isıtma Uygulamaları için Kum Bataryası Sistemlerinin Tasarımı ve Sayısal Termal Analizi

Hüseyin KAHRAMAN, Aslan ÇOBAN, Abdulkadir KARTAL

14.Bölüm **307**

Hava Taşıtlarında Metal Yorgunluğu: Kritik Yapısal Analiz ve Hasar Yönetimi

Hüseyin KAYA, Mürsel EKREM

15.Bölüm **326**

Dijital İkizler: Temel Kavramlar ve Disiplinler arası Uygulamalar

Sema YILDIRIM

16.Bölüm **344**

Güneş Havuzu Destekli Parabolik Oluklu Güneş Kollektörleri ile Elektrik ve Hidrojen Üretimi

Serdal DAMARSEÇKİN

17.Bölüm **359**

Küresel Isınma, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

Fatma AKALIN

18.Bölüm **367**

Genetik Etiyolojiye Sahip Klinik Bir Durumda Biyolojik Veri Örüntülerinin Analizi

Fatma AKALIN

19.Bölüm **377**

Genetik Testlerdeki Olası Belirsizlik Sorunun Aşılması için Biyolojik Belirteçler Arasındaki İlişkinin Analizi

Fatma AKALIN

20.Bölüm **386**

Biyolojik Veri Analizinde Hesaplamalı Bir Yaklaşım

Fatma AKALIN

21.Bölüm **397**

Uyarlanabilir İstatistiksel Doku Özellikleri ile Biyolojik Veri Analizi

Fatma AKALIN

22.Bölüm **407**

A Comprehensive Analytical Study on The Electronic and Optical Properties of Lithium-Doped Semiconductors

Yousef ADWAN, Serap YİĞİT GEZGİN, Hamdi Şükür KILIÇ

23.Bölüm **419**

Türkiye Referanslı Ar-Ge Verimliliğinin Değerlendirilmesi: Veri Zarflama Analizi ve Oyun Teorisi ile Stratejik Ülke Kıyaslaması

Mehmet Onur OLGUN

24.Bölüm **433**

Çevrimiçi Kullanıcı Davranışlarından Satın Alma Kararının Tahmini: Lojistik Regresyon Yöntemi ile Bir E-Ticaret Verisi Uygulaması

Mehmet Onur OLGUN

25.Bölüm **445**

Çimento Fabrikalarında Alternatif Yakıt Kullanımı ve Atık Besleme Sistemlerine Güncel Bakış

İlyas Fahri YEŞİLOT, Kamil DELİKANLI

26.Bölüm **456**

Mühendislik Projelerinde Hacimsel Belirsizlik Yönetimi: Enterpolasyon Algoritmalarının Rolü

Mehmet DOĞRULUK, Ayhan CEYLAN

27.Bölüm **469**

Şırnak Bazalt Oluşumları ve Bazalt Madenciliği

Öykü BİLGİN

28.Bölüm **481**

Maden, Petrol ve Su Sondaj Yöntemlerinin Ön Araştırması

Öykü BİLGİN

29.Bölüm **493**

Çarpma Algoritmalarının Düşük Güç ve Yüksek Performans Temelinde Sayısal Yonga Tasarımına Uyarlanması

Serkan DERELİ

30.Bölüm **506**

Gecikmeden İvmelenmeye: Türkiye'de Elektrikli Araçlara Geçişin Ekonomik, Altyapısal ve Sosyolojik Dinamikleri

Abdulkadir ÖZDEN

31.Bölüm **522**

Tıbbi Atık Toplama Tesisi İçin Araç Rotalama Optimizasyonu

Ayten YILMAZ YALÇINER, İlkan ŞENGÖZ

32.Bölüm **543**

Elektrik Güç Sistemlerinde Koruma: Temel İlkeler ve Klasik Uygulama Yöntemleri

İbrahim ARSLANOĞLU, İsmail Hakkı ALTAŞ

33.Bölüm **568**

Gecikmeden İvmelenmeye: Türkiye'de Elektrikli Araçlara Geçişin Ekonomik, Altyapısal ve Sosyolojik Dinamikleri

Veli Gökhan DEMİR

34.Bölüm **583**

Su–Atık–İklim Etkileşimi: Entegre, Ölçek Duyarlı ve Yönetişim Temelli Bir Çerçeve

Züleyha REÇBER

35.Bölüm **605**

Plastisfer: Mikroplastik Yüzeyindeki Mikrobiyal Ekosistem ve Çevresel Riskler

Züleyha REÇBER

36.Bölüm **627**

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Tarım Arazilerinde

Arazi Örtüsü ve Arazi Kullanımı Değişimlerinin Google Earth Engine ile Analizi

Ayşe ÇELİK

37.Bölüm **605**

Yapıların Yıldırımdan Korunma Sistemlerine Genel Bakış

Cihan AYHANCI

38.Bölüm **663**

Parker Yaklaşımı Tabanlı Parametrik Gravite Ters Çözümünde

Ateş Böceği Algoritmasının Uygulanması

Çağlayan BALKAYA, Yunus Levent EKİNCİ

39.Bölüm **689**

Taşkın Erken Uyarı Sistemleri: Modelleme Yaklaşımları ve Uygulamaları *Fatma DEMİR, Osman SÖNMEZ*

40.Bölüm **709**

Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı: Mekanizmalar, Çözelti Ortamları ve Koruma Stratejileri

Boshra AJLOUNI, Muhammet Emre TURAN

41.Bölüm **722**

Derin Denizel Kırıntılı Sedimanların Keşfi ve Tarihçesi

Onur ALKAÇ

42.Bölüm **735**

Kaya Kartalı Optimizasyonu Tabanlı 2B Gravite Ters Çözümü ile

Temel Kaya Topografyası Kestirimi

Rezzan PEKCAN EKİNCİ, Çağlayan BALKAYA

43.Bölüm **753**

Yapay Zekâ Teknolojilerine Genel Bakış

Sema YILDIRIM

44.Bölüm **774**

PIC16F877A ile PWM Tabanlı Frekans Üretimi ve LCD, UART ve

Osiloskop Üzerinden İzlenmesi

Serdar YILMAZ

45.Bölüm **788**

RF Anahtarli İSG Takip ve Denetim Tasarımı Önerisi

Serdar YILMAZ

46.Bölüm **808**

Nano Katkılarla Ahşap Malzemelerin Aleve Karşı Korunması ve

Yapı Malzemelerine Yönelik Yeni Nesil Yangın Geciktirici

Nanokompozitler

Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ

47.Bölüm **821**

Minikanallarda Serpantin Kanal Sayısının Isıl Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Bahadır GEMİCİOĞLU, Tolga DEMİRCAN

48.Bölüm **836**

Eklemeli İmalata Yönelik Tasarlanan Kalça İmplantlarında İç Yapı Geometrisinin Mekanik Davranışa Etkisi

Yunus Emre DELİKANLI, Mehmet Cengiz KAYACAN

49.Bölüm **849**

Eriyik Yığma Yöntemi (Fused Deposition Modelling) ve Kullanılan Filamentler

Muhammet Osman ÜÇBUNAR, Mustafa Özgür ÖTEYAKA

50.Bölüm **861**

Eklemeli İmalat Teknolojileri

Murad KHALIGOV, Mustafa Özgür ÖTEYAKA

51.Bölüm **871**

Zn–Co Kaplamaların Elektrodepolama İle Üretimi ve Özellikleri

Salim GÜVEN, Demet ZALAOĞLU

52.Bölüm **883**

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Kullanılarak Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Seçimi İçin Bir Uygulama

Furkan ZAMAN, Tülay KORKUSUZ POLAT

53. Bölüm **905**

Üretim Hatlarının Yalın Üretim Teknikleri ile İyileştirilmesi

Seher POLAT

54. Bölüm **926**

Salça Üretimi

Petek ÇETİN, Tülay DURAN, Hamza BOZKIR

55. Bölüm **936**

Bursa'daki Alüvyon Zeminlerde Şev Stabilitesine Etki Eden Parametrelerin Karşılaştırılmalı Analizi

Mertcan ONUK, Kurban ÖNTÜRK

56. Bölüm **952**

Meyve ve Sebze Sularına Uygulanan Isıl Olmayan İşlemlerin Biyoaktif Bileşenler

Üzerine Etkisi

Sara Betül ÖZGEN, Tuba Eda ARPA ZEMZEMOĞLU

57. Bölüm **981**

Dil ve Kaynağın İçerik Sınıflandırmaya Etkisi: YouTube Transkriptleri ve Türkçe

Metinler Üzerine Model Analizi

Yaren SABIR, Mustafa YOLUK, Elif Nur KUCUR, İbrahim BAHÇEKAPILI, Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN, Esme Gül TOPRAK, Esra YILMAZ

58. Bölüm **1007**

Sahte Haber Tespitinde Yapay Zeka Yaklaşımları: LIAR ve ISOT Veri Setleri

Üzerine Bir İnceleme

Bahadır KELEŞOĞLU, Nilvana KARABULUT, Ümit Bora GÜNAYDIN, Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN

59. Bölüm **1033**

Medikal Sektörde Tedarikçi Seçimi için Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı: Delphi ve WASPAS Tabanlı Bir Uygulama

Seher POLAT

60. Bölüm **1056**

Kakao ve Çikolata Üretiminde Sürdürülebilirlik

Begüm KAYA, Hamza BOZKIR

61. Bölüm **1070**

Fotovoltaik Hücrelerin ve Modüllerin Kullanılabilirliği ve Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Emre ÖZAĞDAŞ

62. Bölüm **1088**

Kriyojenik Sıkıştırmalı Hidrojen Depolama Tankının Isıl Analizi

Ozan Kütük, Eylem Yılmaz Ulu

Deneysel Olarak Modellenen Sismitler

Calibe KOÇ TAŞGIN

Prof.Dr. Calibe KOÇ TAŞGIN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
calibekoc@firat.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5439-7379

ÖZET

Sedimantoloji alanında deneysel olarak birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de deneysel olarak modellenen sismitlerdir. Literatüre dayalı olarak derlenmiş bu çalışma esas olarak sismik olaylar sırasında suya doymuş sedimanların gerçek davranışını simüle ederek laboratuvar modellemesi ve bazı yumuşak sediman deformasyon yapılarının sismik kökenine ilişkin saha yorumları yapılması gibi önemli veriler içermektedir. Sismik olarak tetiklenmiş sıvılaşma ve/veya akışkanlaşma sonucu oluşan yumuşak sediment deformasyon yapıları (sismitler), dijital bir sallama tablası kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada, değişken granülometrik aralıklara sahip doğal sedimanlar (kil, silt ve kum) ve gerçek üç boyutlu sismogramları yeniden üretebilen bir deprem simülatörü kullanılmıştır. İvme ve gözenek basıncı kayıtları, depremler sırasında konsolide olmamış tortulardaki sıvılaşma ve/veya akışkanlaşma süreçlerini takip etmemizi sağlamıştır. Test edilen sediman sütunundaki değişimler, farklı tipte sismitlerin oluşmasına neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sismitler, Deneysel Çalışmalar, Su Kaçma Yapıları, Yük Kalıpları.

GİRİŞ

Yumuşak sediment deformasyon yapıları laboratuvarda da üretilmiştir (daha önceki çalışmalara referanslar için bkz. Allen, 1982; Van Loon, 1992). Rettger (1935), Kuenen (1958), Dzulynski ve Walton (1965) ve McKee ve Goldberg (1969), sedimanter yapıları yük kalıpları ve yastık yapıları olarak üretmişlerdir. Viskoz sıvılar kullanarak klasik kum-çamur sistemlerini simüle etmişler ve deneylerinde deformasyon, eşit olmayan yükleme veya test tankının sallanması nedeniyle başlamıştır. McKee ve diğ., (1962a,b), bir yamaçta kum deformasyon deneyleri gerçekleştirmiştir. Anketell vd., (1969, 1970), test tankını sürekli olarak sallamak için bir elektrik motoru kullanarak, kararsız yoğunluk gradyanı sistemlerinde çok sayıda yumuşak sediment deformasyon yapısını yeniden üretmişlerdir. Akışkanlaştırma özellikleri, Tsuji ve Miyata (1987) ve Nichols vd., (1994) tarafından laboratuvarda analiz edilmiştir. Son zamanlarda, Owen (1985, 1996), ağırlıklı bir sarkaçla hareket ettirilen bir sallama masası kullanarak kumlarda yumuşak sediment deformasyon yapıları elde etmiştir. Owen (1985, 1992) tarafından farklı türdeki özellikler, deformasyon anında sediman üzerinde etki eden farklı kuvvet sistemleriyle ilişkilendirilmiştir. Deformasyon, sıvılaşma sonucu sedimanın kayma mukavemetinin kaybından kaynaklanmaktadır.

Moretti vd. (1999) nin bu çalışmadaki amacı, ilk kez gerçekçi bir tetikleyici etken kullanarak yumuşak sediment deformasyon yapılarının (sismitler) belirli bir genetik kategorisinin laboratuvarda üretiminin sonuçlarını göstermektir; sismitlerin laboratuvarda üretimi iki ana nedenden

dolayı yararlı görülmüştür: (1) jeolojik kayıtlarda yumuşak sediment deformasyonunun tetikleyici etkeninin saha verileri kullanılarak tanımlanması yalnızca çıkarımsal olarak yapılabilir; (2) benzer şekilde, bu amaç için gerçekçilik ölçütleri sınırlıdır, çünkü günümüzdeki sismik şoklar sırasında sıvılaşma ve akışkanlaşma süreçleri yalnızca kıtasal ortamlarda yüzeysel belirtiler olarak doğrudan gözlemlenebilir (kum sıvılaşması, zemin çatlakları, bina hasarları; bkz. Ambraseys ve Sarma, 1969).

Deneysel Ekipman ve Test Metodolojisi

Sıvılaşmanın jeoteknik yönleri analiz edilmiş (bkz. Seed ve Idriss, 1971, 1982; ve buradaki referanslar) ve farklı laboratuvar yöntemleri (döngüsel basit kesme, döngüsel üç eksenli, burulma, santrifüj testleri vb.; bkz. Allen , 1982; ve oradaki referanslar) birçok çalışmada tartışılmıştır. Otuzlu yılların başından beri, sıvılaşma çalışmaları için, katılaşmamış sedimanlar üzerinde sallama tablası kullanıldığı bilinmektedir (Rogers, 1930). Sallama tablaları ile benzer modellemeler depremler sırasında dolguların (Koga ve Matsuo, 1990) veya bütün bir sedimanter havzanın (Goodman ve Appun, 1966) davranışını tekrarlamak için uygulanmıştır (Moretti vd., 1999).

Deneylerimiz, sismik bir olayın neden olduğu tam ölçekli yumuşak yüzey deformasyon yapılarını yeniden üretmiştir. Bunları gerçekleştirmek için, sert bir alt tabaka üzerinde yatan 40 cm kalınlığında bir doğal sedimanter sütunu ve gerçekçi bir tetikleyici etken kullanılmıştır. Bu şekilde, hem gerçek deformasyon mekanizmalarını hem de yumuşak sedimentlerdeki depremlerin neden olduğu nihai morfolojileri analiz edilmiştir. Ayrıca, gerçek bir ivme grafiğinden yararlanılarak, tetik dalgasının değişkenliği ve gerilmenin şekli ile ilgili tüm problemler (eşdeğer bir kayma döngüsel gerilmesi ile gerçekleştirilen tüm sıvılaşma deneylerini etkileyen problemler) önlenmiştir (Moretti vd., 1999).

Çalışmanın deneysel kısmı U.P.C. Uygulamalı Jeofizik Laboratuvarı'nın Barselona şehrinde (İspanya) gerçekleştirilmiştir. Deprem simülatörü, gerçek bir yapay ivmeyi üç boyutlu olarak yeniden üreten, geniş bir frekans aralığını (0-15 Hz) çevreleyen ve ivmede 2 g'ye ulaşan dijital bir sallama tablasıdır (Norgren Martonair) (Şekil 1).

Sallama tablası üzerine, tankın titreşimini ihmal edilebilir hale getirmek için 2 cm kalınlığında duvarları olan bir demir test tankı (90x40x35 cm) yerleştirilmiştir; deneylerin gözlemlenmesine ve video kaydına olanak vermek için bir duvar metakrilattan (5 cm kalınlığında) yapılmıştır. Sallama tablası 800 kg'a kadar taşıyabiliyor ve her test sırasında tablaya 200 kg sediman yüklenmiştir (Şekil 1).

İvmenin ve gözenek basıncının kaydı, tank üzerine ve sedimana yerleştirilen basınçölçer ve ivme ölçerler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bir sinyal yükselticisine ve 14 analog kanallı bir kayıt cihazına (TEAC XR-50

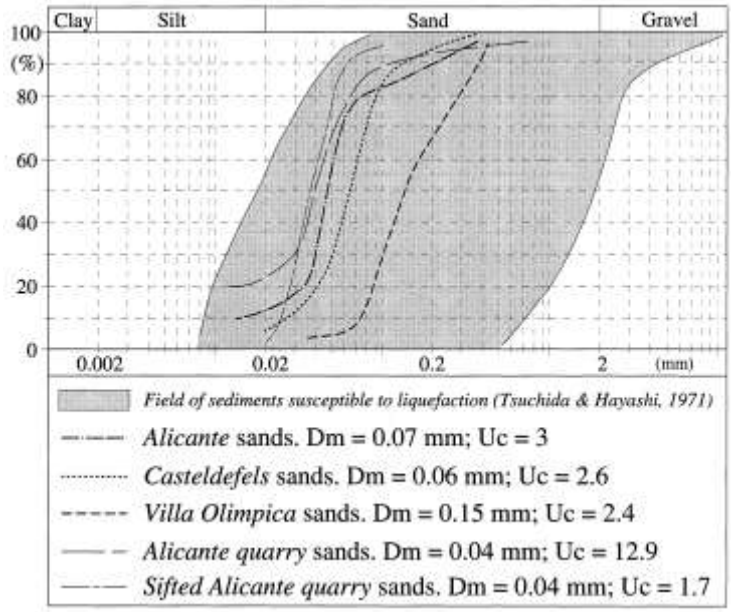
modeli) bağlanmıştır. Kayıt cihazı kanallarının tüm sinyalleri, bu kanallardan birinde tetikleme sinyali eklenerek senkronize edilmiştir (Moretti vd., 1999).



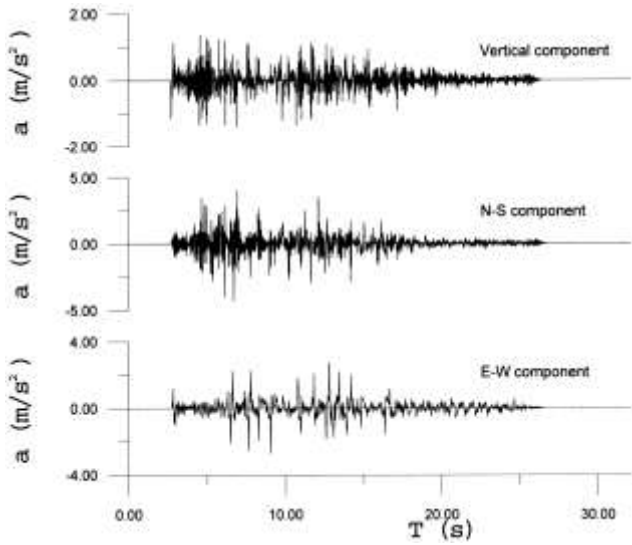
Şekil 1. Dijital sarsma masasındaki test tankı. Test tankının metakrilat içindeki duvarı, sedimanlardaki deformasyonun video kaydına ve doğrudan gözlemlenmesini sağlar (Moretti vd., 1999).

Laboratuvar deneylerinde yalnızca doğal sedimentler kullanılmış ve bunların çoğu potansiyel olarak düşük homojenlik indeksine sahip sıvılaşabilir rüzgar kumlarıdır (Şekil 2). Her deneyden önce tank su ile doldurulmuş ve kumlar çökeltilmiştir; laminasyonlar koyu renkli kumlarla işaretlenmiştir. Bazı deneylerde, kuru koşullarda, tanka eklenen kumları tartarak çökeltinin fiziksel parametreleri (hacim ağırlığı, gözeneklilik, vb.) hesapladık ve elde edilen değerler kumların temel koşulları için normaldir (hacim ağırlığı 1.87 g = cm^3< < Υ_{sat} <2.12 g = cm^3; gözeneklilik % 32 < n < %46). Bu deneylerden sonra, fiziksel parametrelerin ölçümleri, gözeneklilikteki en büyük azalmanın % 6 düzeyinde olduğunu gösterdi (Moretti vd., 1999).

Yapay üç boyutlu sismik şok deneyimiz (Şekil 3), Loma Prieta deprem spektrumu (17-10-1989, Los Angeles) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu deprem (ML 7:1, tahmini en yüksek yatay yer ivmesi 0:25 g, süre 15s; Greene ve diğerleri, 1991) yerinde sıvılaşmanın (kıtasal ortamdaki sıvılaşma etkileri: Bardet ve Kapuskar, 1993; Sims ve Garvin, 1995; açık deniz ve kara sıvılaştırma etkiler: Greene ve diğerleri, 1991) belirgin etkilerini üretmiştir (Moretti vd., 1999).



Şekil 2. Deneyler için kullanılan bazı çökeltilerin granülometrik eğrileri ve granülometrik parametreleri, potansiyel olarak sıvılaşabilir çökeltilerin alanını da gösterir (from Tsuchida and Hayashi, 1971). Dm=ortalama tane boyutu=(φ16+φ50+φ84)/3; Uc=tekdüzelik indeksi=D60/D10 (Moretti vd., 1999).



Şekil 3. Modelleme deneylerinde kullanılan üç boyutlu sentetik ivme kaydının bileşenleri (Moretti vd., 1999).

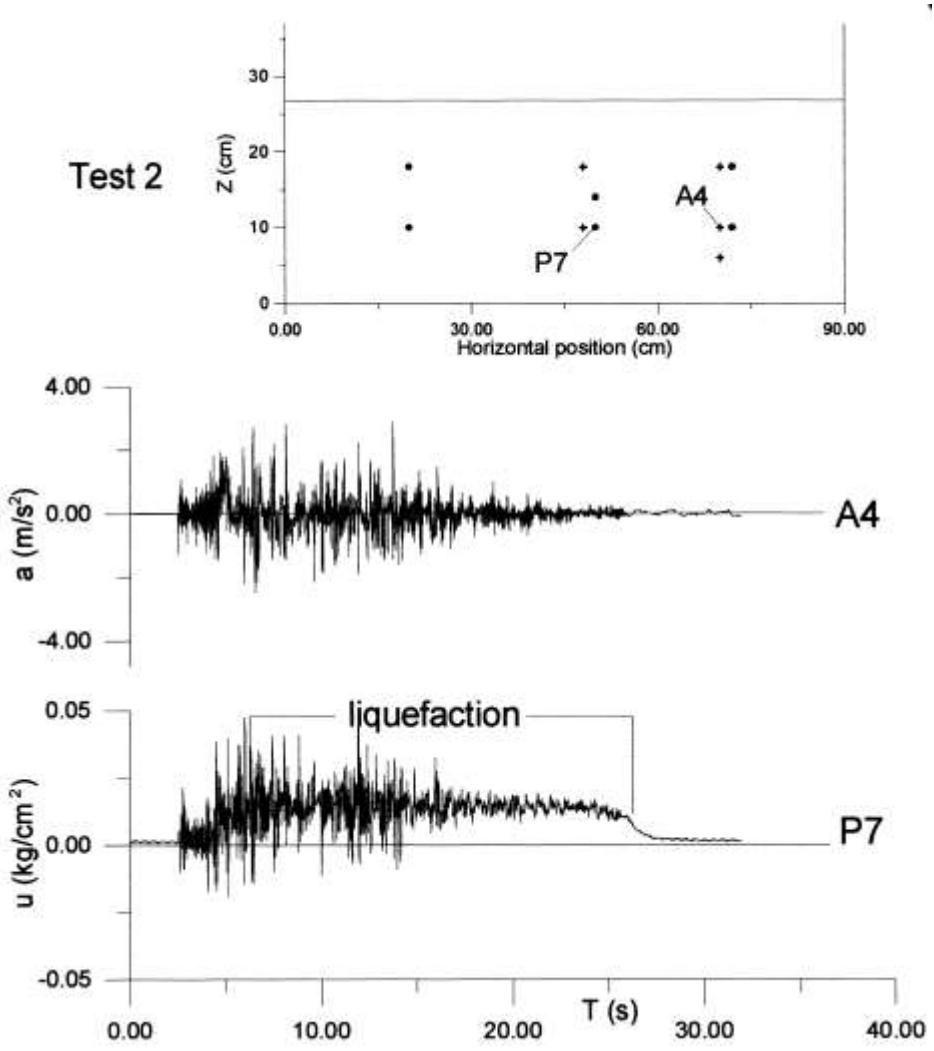
Deneysel Sonuçlar

Şekil 4 ve 5 devam eden hızlanma ve gözenek basıncı kayıtlarını göstermektedir; Sedimandaki kayma mukavemeti kaybı küçük batma hareketlerine neden olduğu için basınç ölçerler ve ivme ölçerlerin yerleri sıvılaşmadan sonra farklılık gösterebilir. (Şekil 5). Ara basınç, su sütununun yüküne eşit değerlerden artmıştır ve ancak ivme en yüksek pik yaptıktan sonra tam sıvılaşma seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 4 ve 5); bu, Superstition Hills depremi sırasında (California, 1987) Holzer vd. (1989) tarafından gerçekleştirilen olağanüstü yerinde yapılan ölçümlerle uyum içindedir (Moretti vd., 1999).

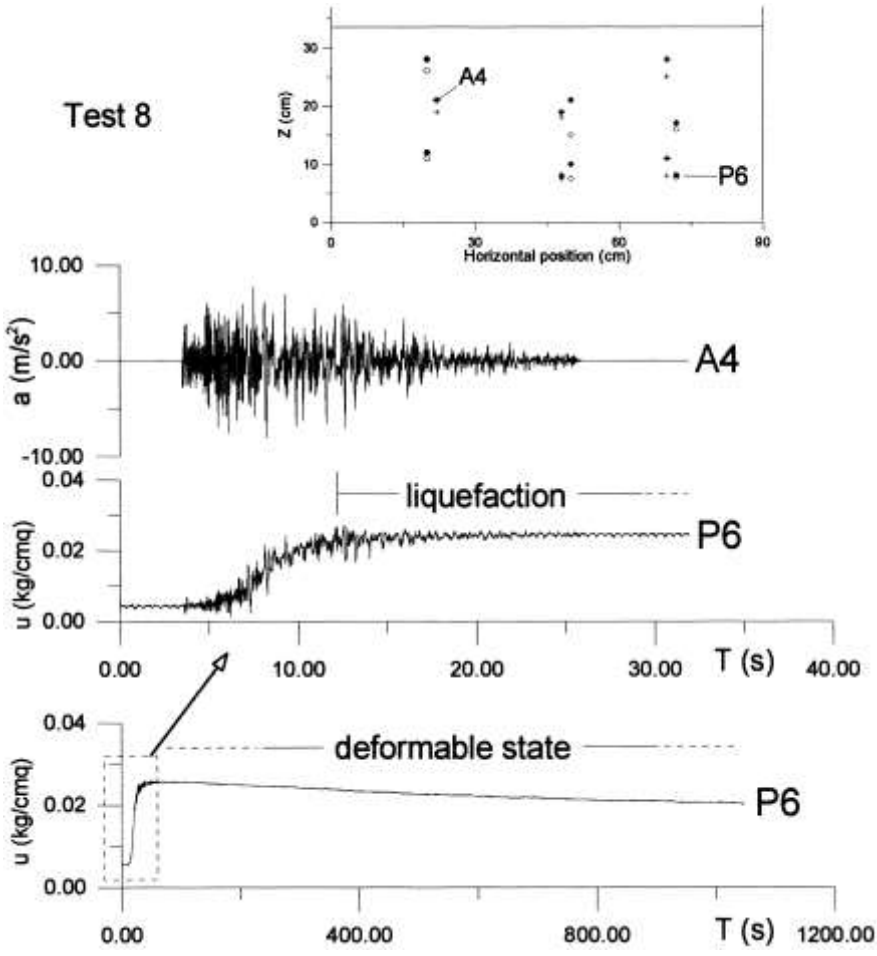
Sıvılaşmış haldeki süre (gözenek-su basıncı değerleri çevre basıncına eşit şeklinde karakterize ediliyor) kısaydı (birkaç on saniye) ve sedimanların tane boyutu, gözenekliliği ve geçirgenliği ile ilgiliydi. Normalde, gözenekliliği ve geçirgenliği yüksek çökeltilerde (Şekil 2'de elenmiş Alicante taş ocağı kumları), sıvılaşma sonrası gözenek basıncı 15-20 sn içinde başlangıç değerlerine düşmüştür (Şekil 4). Düşük gözenekli sedimentlerde (Alicante ocağı Şekil 2'deki kumlar) ve geçirgenlik bariyerlerinin varlığıyla, sediment düşük bir makaslama gerilmesine sahip olduğu durumda (deforme olabilir durum; Şekil 5), gözenek basıncı çok uzun bir süre (30 dakika Şekil 5) yüksek bir değerde kalmıştır. Birincil sedimanter yerleşme ve itici kuvvet sistemine (sensu Owen, 1987, 1996) bağlı olarak, yumuşak sediment deformasyon yapıları sedimanın tamamen sıvılaşmasından sonra ve deforme olabilir durumda gelişmiştir (Moretti vd., 1999).

Burada yeniden üretilen morfolojilerin çoğu literatürde bilinmektedir ve sismit olarak yorumlanan bazı yumuşak-sediman deformasyon yapılarına karşılık gelmektedir (bu yapıların tam bir yeniden gözden geçirilmesi için bkz. Obermeier, 1996a).

Deneylerimizde gözlemlenen deformasyon yapılarının açıklaması ve tartışılması için, yeniden üretilen tüm morfolojiler iki ana kategoriye ayrılmıştır (Şekil 6): (1) su kaçma yapıları; (2) yük yapıları. Akışkan kaçışı ve yerçekimi kararsızlığı çoğu zaman sedimanlar üzerinde aynı anda etki etmesine rağmen, alt bölümümüz nitel ve tanımlayıcı bir bakış açısından faydalıdır (Moretti vd., 1999).



Şekil 4. Test 2 sırasındaki deneysel ölçümler: yukarıda, basınç ölçerlerin ve ivmeölçerlerin konumlarının taslağı. İvme ve boşluk basıncının sürekliliğindeki ölçümler gösterilmiştir. Sadece simüle edilen olayın ana zirvelerinden sonra sıvılaşma meydana geldi. Kullanılmış kumların geçirgenliği yüksektir. Açıklama: += ivmeölçer konumu; • = basınçölçer konumu (Moretti vd., 1999).



Şekil 5. Deneysel ölçümler: yukarıda, test sırasında sıvılaşmadan önce ve sonra basınçölçerlerin ve ivmeölçerlerin konumlarının taslağı. 8. İvme ve boşluk basıncının sürekliliğindeki ölçümler gösterilmektedir: sıvılaşmadan sonra, deforme olma durumu çok uzun bir süre kalır (bakınız basınçölçer 6), geçirgenlik bariyerlerinin varlığı. Açıklama: + = ön sıvılaşma ivmeölçer konumu; • = ön sıvılaştırma basınçölçer konumu; + = sıvılaşma sonrası ivmeölçer konumu; o = sıvılaştırma sonrası basınçölçer konumu (Moretti vd., 1999).

Su Kaçma Yapıları

Akışkan veya su kaçma yapıları (Lowe, 1975) burada akışkanın sediman içinden çıkma süreçlerinin hakim olduğu deformasyon yapıları olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlaşma, bir akışkan sürükleme hareketinin yukarı doğru bileşeninin tane ağırlığına eşit olduğu veya aştığı durumdur (Lowe, 1975) ve açık bir kohezyonsuz granüler malzeme sisteminde meydana

gelir ve sediman boyunca sürekli bir sıvı akışı gerektirir (Owen, 1987). Yapılan deneyde akışkanlaşma, sıvılaşma sonrası çökelme sürecinden kaynaklanan fazla gözenek suyunun dışarı atılmasıyla ilişkilendirilmiştir (bkz. Owen, 1987); bu işlem, geçiş suyu için mevcut hacimde bir azalmayı içeren, başlangıçtaki yüksek gözenekli granüller çerçevenin sıvılaştırma sonrası incelmesinden kaynaklanmıştır. Kötü boylanmış sedimentlerde, daha ince tanelerin seçici akışkanlaşması çok yaygın bir süreçtir (Moretti vd., 1999).

Sütun Yapıları

Kötü boylanmış kumların çökelmesi (Şekil 2'teki Alicante taş ocağı kumları) test tankında normal olarak derecelendirilmiş 10–15 cm kalınlığında tabakalar oluşturmak için kullanılmıştır. Her bir tabakadaki normal derecelenme, geçirgenlikte yukarı doğru bir azalmaya neden olmuştur ve her bir tek tabakanın üstünde, ince bir çamur tabakası bir geçirgenlik bariyeri oluşturmuştur. Sismik şoktan sonra, her tabakanın tabanında tam sıvılaşma meydana gelmiştir (sıvılaşmaya daha yatkın kumlar). Geçirgenlik bariyerleri ve geçirgenliğin yukarı doğru azalması, basit filtrelemeyi önlemiştir ve sadece su ile doldurulmuş geçici boşlukların oluşmasına neden olmuştur (Şekil 6) ve morfolojik olarak Tsuji ve Miyata'nın (1987) tarafından yeniden üretilen 'geçici su dolu boşluklarına' benzemektedir. Nichols vd. (1994) ve Owen (1996). 20-30 dakika sonra (Şekil 5), çamur tabakalarının lokalize çatlaması, sütun yapılarına benzer sıvı kaçış yapıları oluşturmuştur (Şekil 6). Sütun yapıları santimetrik yükseklikte dir ve ayrıştırılmış sediman ve çamurlu kohezif parçalardan oluşur; bitişik sütunlar arasında her tabaka yukarı doğru içbükey veya daha düzensiz bir morfoloji gösterir (Moretti vd., 1999).

Sütun yapıları, aşırı yükleme ve kütlesel sedimantasyon olayları ile ilgili tipik akışkanlaşma süreçleri için yumuşak sediment deformasyon yapılardır (Lowe ve Lo Piccolo, 1974; Lowe, 1975; Ricci Lucchi, 1980; Allen, 1982). Deneylerimiz, bu yapıların normal dereceli tabakalarda sismik aktivitelerle oluşan sıvılaşma ve seçici akışkanlaşmadan sonra da oluşabileceğini göstermektedir (Moretti vd., 1999).

Kum Volkanları

Bir kum sütununun üst kısmına 2–5 cm kalınlığında geçirimsiz bir kil seviyesi yerleştirilmiştir. Sıvılaşmadan sonra, gözenek basıncı; su ve yıkanmış sedimentler daha ince olduğu kil tabakasını lokal olarak delene kadar yükselmiştir. Küçük kum volkanları (2–3 cm yüksekliğinde ve 10–15 cm çapında) oluşmuş (Şekil 6) suyla doldurulmuş geçici boşluklar görünmeden; yırtılma anında gerçekleşmiş ve ilk aşamada su ve akışkanlaşan kumların boşalması çok şiddetli olup, onlarca saniye sonra yavaş ve düzenli hale gelmiştir. Siltli kumlarda su ve daha ince çökeltilerin deşarjı 30 dakika devam etmiştir (Moretti vd., 1999).

Oluşan kum volkanları, sismik şoklar sırasında oluşan kum daykları veya kum çıkışları (bkz. Housner, 1958; Obermeier, 1996b) ile morfolojik yakınlık gösterirler. Bu benzerlik yalnızca nitelikseldir çünkü bu özellikler ölçü olarak metriktir ve 9 m derinlikte bile oluşur. Yeniden üretilen deformasyon mekanizması ve su ve sediman boşaltma süresi saha gözlemleriyle uyumludur (bkz. Ambraseys ve Sarma, 1969) (Moretti vd., 1999).

Uyumsuz Yüzeyler

Siltli kum üzerine gelen orta-iri taneli kumdan oluşan sediman bir sütun üzerinde bazı deneyler yapılmıştır. Geçirgenlik bariyerinin yokluğunda sıvılaşma ve devamında akışkanlaşma işlemleri, yukarıda bahsedilen örneklerden çok farklı bir şekilde meydana gelmiştir. Akışkanlaştırma nispeten daha hızlı, çünkü lokal kaçış yolları oluşturmadan, difüzyonlu ve homojen bir yukarı boşaltım yoluyla gerçekleşen filtrasyon nedeniyle boşluk basınçları kolaylıkla azalmıştır; Üstteki iri taneli kumlar yoluyla daha ince sedimanların deşarj koşulları, Nichols vd'nin (1994) deneysel sonuçları aracılığıyla değerlendirilmiştir (Moretti vd., 1999).

Alttaki siltli kumlardaki seçici akışkanlaşma, sediman kolonun tepesinde ince bir düzeyde çok ince taneli sedimanların oluşmasına neden olur (Şekil 6). Altta yatan sediman kolon deformasyonlar gösteriyorsa, bu seviye açıkça uyumsuzdur ve tamamen yatay bir tepeye sahiptir (Şekil 6) (Moretti vd., 1999).

Birçok sismik türü, üstte uyumsuz bir yüzey ve deforme olmayan bir seviye ile sınırlıdır; deneylerimiz, muhtemelen yukarı yatay yüzey başına ve üzerini örten deforme olmamış seviye her zaman devamında hareketsiz erozyon ve birikme süreçleriyle ilişkili değildir (halihazırda Anketell ve diğerleri, 1969 tarafından niteliksel olarak yeniden üretildiği gibi); sismik sıvılaşma sırasında ve sonrasında, deforme olmuş tabakaların tepesindeki yıkanmış daha ince sedimanların yeniden dağıtılmasıyla uyumsuz seviyeler oluşabilir. Ayrıca, tabakalarda belirgin bir deformasyon olmasa bile, gölsel ortamlardaki homojen siltli seviyeler sismit olarak yorumlanmış (Doig, 1986, 1990; Shilts ve Clague, 1992) ve bu seviyelerin esas olarak aynı seçici akışkanlaşma süreçleri yoluyla oluşması çok muhtemeldir (Moretti vd., 1999).

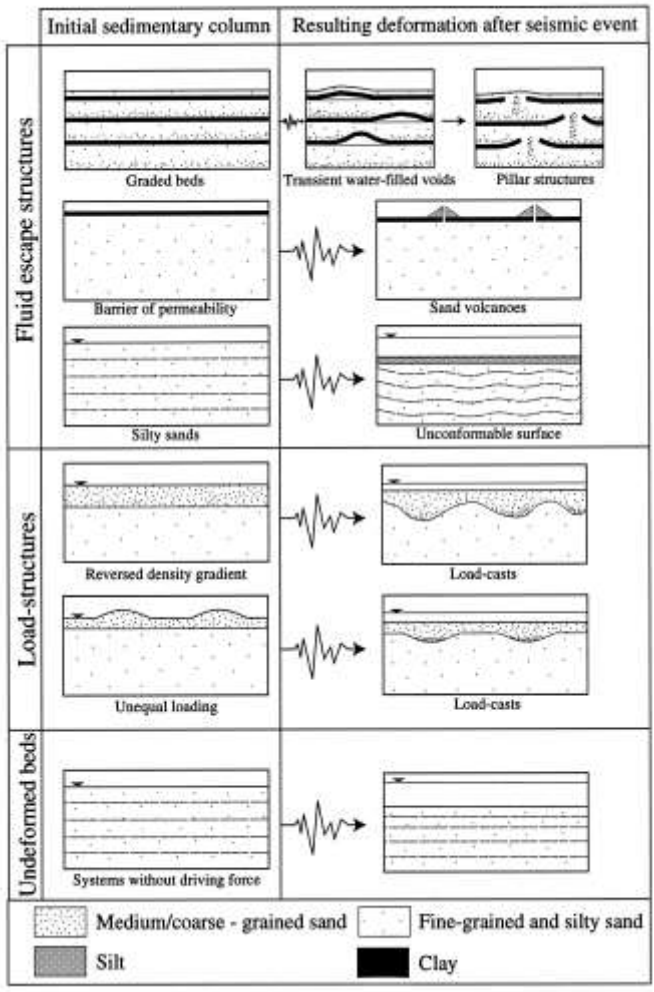
Yük Yapıları

Bu kategoriye, yerçekimsel dengesizliğin varlığına bağlı olarak oluşan tüm yumuşak tortul deformasyon yapılarını (Şekil 7'deki yük yapıları) dahil ettik; bunlar arasında dengesiz yoğunluk gradyanları (Anketell vd., 1970) ve eşit olmayan yükleme (Sensu Allen, 1982) yer almaktadır. Bu sistemler, farklı katmanlar arasındaki ara yüzün çeşitli şekillerde bir dizi antiklinal ve senklinal şeklinde deformasyonuyla karakterize edilen kolayca

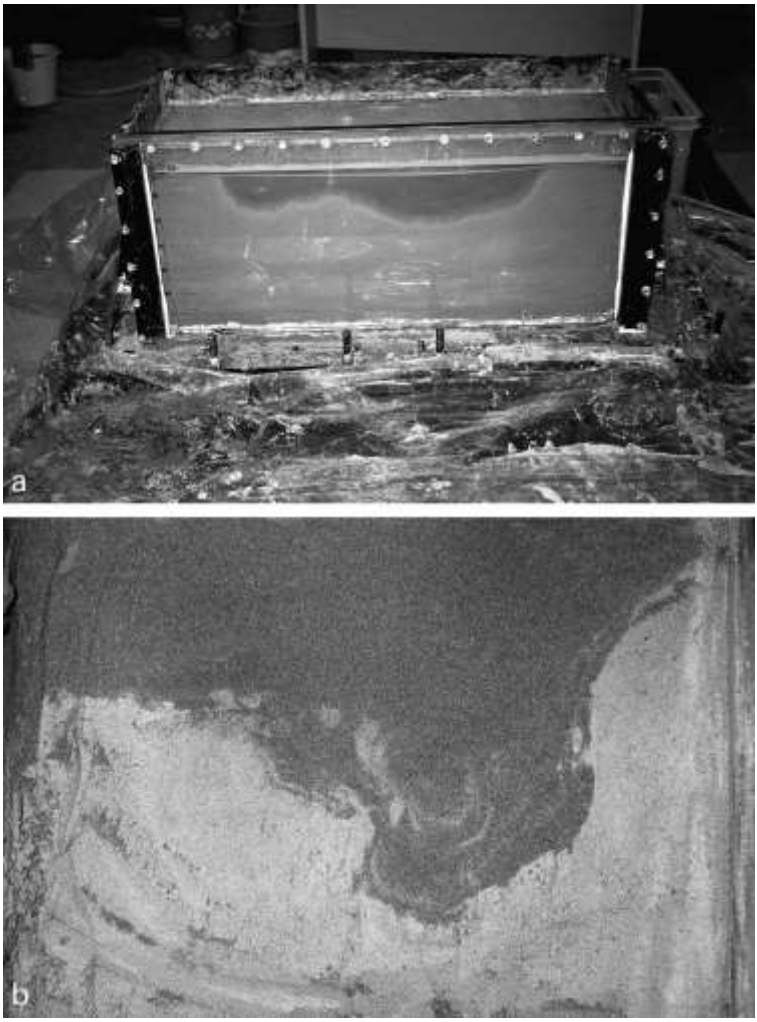
tanınabilir morfolojiler (yük dökümleri, Sensu Kelling ve Walton, 1957) oluşturur.

Bazı deneylerde, dengesiz bir yoğunluk gradyanı sistemi oluşturmak için farklı kütle yoğunluklarına sahip iki tabaka yerleştirdik. Sismik bir olayla tetiklenen sıvılaşma, her iki tabakada da kayma direncinin kaybına neden oldu; deformasyon, tam sıvılaşmadan sonra başladı ve iki birim arasındaki ara yüzün dalgalanmasıyla temsil edildi. Kütle yoğunluğu kontrastı düşükse, dalgalanmanın neredeyse fark edilemediği; Büyük yük kalıpları yalnızca yüksek yoğunluklu gradyan sistemlerinde oluşmuştur (2,12 g=cm3 başlangıç hacim yoğunluğuna sahip Villa Olimpica kumları üzerinde 1,87 g=cm3 başlangıç hacim yoğunluğuna sahip Elenmiş Alicante Ocağı kumları; Şekil 2). İkinci durumda, alttaki birim tortu-su ara yüzüne ulaşabilir (Şekil 7b). Bir deneyde, alttaki birim olarak çok düşük kayma mukavemetine sahip çok yumuşak siltli kil kullandık; sismik sarsıntıdan hemen sonra, üstteki kumların sıvılaşmaya vakti olmadı ve tiksotropik ve siltli kilin içinde gevrek bir şekilde çökmüştür.

Deneylerimiz, yük yapılarının oluştuğu ilk sistemi (eşitsiz yükleme ve/veya ters yoğunluk gradyanı) yorumlamak için sahada morfolojik kriterleri kullanmanın çok zor olacağını göstermektedir. Yorumlama, yalnızca üzerine bindirilmiş deformasyona uğramış birimin yoğunluk gradyanının gözlemlenmesine dayandırılamaz. Tam sıvılaşmadan sonra tortunun gözeneklilik ve hacim yoğunluğunun nihai değerleri, başlangıçtaki değerlerden farklı olabilir (sıvılaşmış tortuların sıkışması için) ve bazı nadir örnekler (örneğin Dzulynski ve Walton, 1965'in yük dökümü dalgalanma izleri) dışında, başlangıçta eşitsiz bir yükleme sisteminin varlığı fark edilemeyebilir. Son olarak, bazı deneyler sırasında yerçekimi dengesizlikleri veya geçirgenlik bariyerleri olmayan sistemler kullandık (sürüş kuvveti sistemi olmadan, örneğin Owen, 1987). Tortulların tamamen sıvılaşmasından sonra yumuşak tortu deformasyon yapıları oluşmadı (Şekil 6). Sıvılaşma, hacimde azalmaya ve su deşarjına neden oldu, ancak birincil paralel laminasyon korundu. Su sızıntısı, basit yukarı doğru filtreleme yoluyla gerçekleşti ve akışkanlaşma üzerinde herhangi bir etki yaratmamıştır.

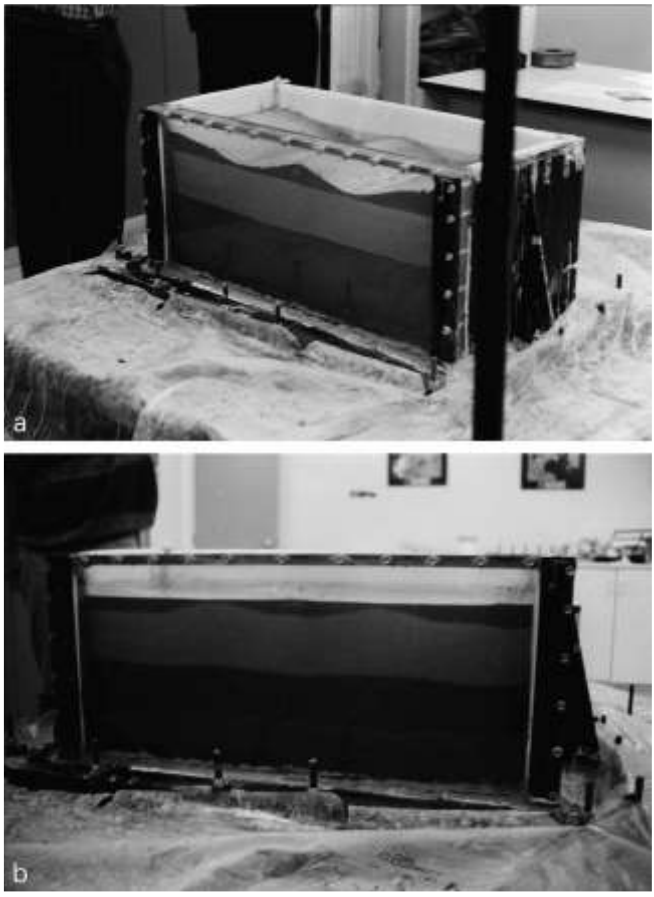


Şekil 6. Deneysel çalışmalarla üretilmiş yumuşak sediment deformasyon yapılarının ana türlerini gösteren taslak. Solda birincil sediman sütunu var. Sağda, sismik olaydan sonraki sıvılaşma ve/veya akışkanlaşma özellikleri vardır (Moretti vd., 1999).



Şekil 7. a) Bir ters yoğunluk gradyan sisteminde yük kalıpları; daha ince yıkanmış tanelerin halesi, iki birim arasındaki ara yüzde iyi bir şekilde görülebilir, b) Aynı ters yoğunluk gradyan sisteminde yük kalıbı; bu a'nın dik bir kesitidir (Moretti vd., 1999).

Yük kalıpları, eşit olmayan yükleme sistemlerinde de yeniden üretilmiştir. Çökelti-su ara yüzeyinde ripılların ve küçük kumulların üst üste gelmesi (Şekil 8a), sıvılaşmadan sonra morfolojinin tersine dönmesine neden olmuştur. Ana yükseltilerin altında oluşan yük kalıpları ve tam deforme olduktan sonra sediman-su ara yüzeyi düz bir şekilde örtülmüştür (Şekil 8b).



Şekil 8. a) Eşit olmayan bir başlangıç yükleme sistemi. b) Eşit olmayan yükleme sistemindeki yük kalıpları; İlk morfoloji tersine çevrilmiştir ve su-sediman ara yüzü tamamen düzdür (Moretti vd., 1999).

Yerçekimi kararsızlığı olan sistemler üzerinde yaptığımız deneyler, deformasyonun nöbet şokundan ve sıvılaşmadan sonra gerçekleştiğini göstermektedir. Sadece kayma mukavemetinde ciddi bir düşüşten sonra deformasyon meydana gelmiştir ve bu, yoğunluk gradyanı veya eşit olmayan yükleme ile tetiklenmiştir. Farklı yoğunluktaki (Biot ve Ode`, 1965; Ramberg, 1968a, b) akışkanların basit bir şekilde üst üste bindirilmesine dayanan yük kalıplarının oluşumu hakkındaki matematiksel modeller muhtemelen sadece Newton tipi akışkanlar için geçerlidir ve kohezyonsuz doymuş çökellerdeki deformasyonları Rayleigh-Taylor kararsızlıkları ile açıklamak için kullanılamaz (Selker, 1993) (Moretti vd., 1999).

Deneylerimiz, yük yapılarının oluştuğu ilk sistemi yorumlamak için sahada morfolojik kriterleri kullanmanın çok zor olacağını göstermektedir (eşit olmayan yükleme ve/veya ters yoğunluk gradyanı). Yorumlama, yalnızca

aşırı yüklenmiş deforme olmuş birimin yoğunluk gradyanının gözlemine dayanamaz. Tam sıvılaşmadan sonra sedimanın gözenekliliği ve hacim yoğunluğunun nihai değerleri, ilk değerlerden (sıvılaşmış sedimanların sıkıştırılması için) farklı olabilir ve bazı nadir örnekler (Dzulynski ve Walton, 1965'in yük kalıbı dalgalanma işaretleri gibi) dışında, eşit olmayan bir yükleme sisteminin ilk varlığı fark edilmeyebilir (Moretti vd., 1999).

Son olarak, bazı deneyler sırasında yerçekimi dengesizlikleri veya geçirgenlik engelleri olmayan sistemler kullanılmıştır (bir itici güç sistemi olmadan, Owen, 1987). Sedimanların tamamen sıvılaşmasından sonra yumuşak sediman deformasyon yapıları oluşmamıştır (Şekil 6). Sıvılaşma hacimde azalmaya ve su deşarjına neden oldu, ancak birincil paralel laminasyon korundu. Su sızıntısı basit yukarı doğru filtreleme yoluyla gerçekleşti ve hiçbir akışkanlaşma etkisi yaratmadı (Moretti vd., 1999).

SONUÇLAR

Moretti vd. (1999) nin yaptığı deneylerde üretilen tüm morfolojiler şu alt bölümlere ayrılmıştır: (1) su kaçma yapıları (sütun yapıları, kum volkanları ve uyumsuz yüzeyler); ve (2) yük yapıları (yük kalıpları). Alt bölümlere ayırmanın temeli, baskın deformasyon mekanizmasıdır. Farklı su kaçma yapıları türleri esas olarak başlangıç sistemiyle ilişkilidir: (1a) Sütun yapıları, her tabakanın üst kısmında ince, geçirimsiz bir kil tabakasının bulunduğu dereceli tabakalarda sıvılaşma ve akışkanlaşma sonucu oluşur. Suyla doldurulan geçici boşluklar, her tabakanın alt kısmındaki sıvılaşma (sıvılaşmaya daha yatkın kumlar) ve hem geçirgenliğin yukarı doğru azalması hem de üstte ince bir geçirgenlik bariyerinin varlığıyla oluşur. (1b) Kum volkanları, kalın bir kum tabakasının üst kısmında bir kil tabakasının varlığı nedeniyle oluşur. (1c) Uyumsuz yüzeyler, kötü ayrışmış kumlarda seçici akışkanlaşma sonucu oluşur. Morfolojik açıklamalar, deforme olmuş tabakaların üst kısmında uyumsuz yüzeylerin ve seviyelerin oluşumuyla ilgilidir. Düzlemsel yüzeyler ve uyumsuz laminalar, sırasıyla taban düzensizliklerinin düzleşmesi veya sediman-su ara yüzeyindeki daha ince elütriye tanelerin normal yeniden dağılımı yoluyla oluşur. (2) Yük yapıları, yerçekimi kararsızlığı olan sistemlerde oluşur. Aynı morfolojiye sahip yük kalıpları, hem başlangıçtaki kararsız yoğunluk gradyanı sistemlerinde hem de başlangıçtaki eşitsiz yükleme sistemlerinde oluşur.

Deneysel sonuçlar, modellenen yapıların jeolojik kayıtlarda gözlemlenen ve literatürde sismit olarak yorumlanan sıvılaşma ve/veya

akışkanlaşma özelliklerine benzediğini göstermektedir (Obermeier, 1996a). Bununla birlikte, yumuşak sediment deformasyon yapılarının sahada sismit olarak yorumlanmasının yalnızca sıvılaşma özelliklerinin morfolojik kanıtlarına dayandırılamayacağını vurgulamak isteriz. Genel olarak, hem sismik hem de sismik olmayan tetikleme mekanizmaları benzer morfolojiler üretebilir ve tek bir tetikleme mekanizması çeşitli sıvılaşma yapıları oluşturabilir (Dzulynski ve Walton, 1965). Sismik tetikleyici mekanizmanın olasılığı (bkz. Sims, 1975; Leeder, 1987; Ringrose, 1989a; Li vd., 1996; Obermeier, 1996a; Pope vd., 1997 tarafından önerilen kriterler ve analizler) yalnızca deformasyon yapılarının yapısal çerçeve, eş-sedimanter tektonik aktivitenin varlığı, sıvılaşma etkilerinin bölgesel dağılımı ve sedimantolojik veriler (deformasyon sırasında sedimanter ortamda, gözlenen sıvılaşma özelliklerini tetikleyebilen, fırtına dalgalarının döngüsel veya ani etkisi, aşırı yükleme vb. gibi içsel ve olağan bir sürecin yokluğu; Moretti, 1997) gibi diğer saha verileriyle ilişkisi temelinde belirlenebilir.

Son olarak, bir itici güç sistemi (geçirgenlik bariyerleri, yerçekimi kararsızlıkları vb. gibi) olmadan yaptığımız deneylerin sonuçları, deformasyonun sediman tamamen sıvılaştıktan sonra bile görünür olmayabileceğini göstermektedir. Başka bir deyişle, orta ve yüksek büyüklükteki sismik şokların tekrarlanma zamanının yalnızca deforme olmuş tabakalar kullanılarak değerlendirilmesi hatalı olabilir, çünkü bazı sismik olaylar herhangi bir tespit edilebilir deformasyona yol açmamış olabilir.

KAYNAKLAR

Allen, J.R.L., 1982. Sedimentary Structures: their Character and Physical Basis, Vol. II. Elsevier, New York, 663 pp.

Anketell, J.M., Cegla, J., Dzulinsky, S., 1969. Unconformable surfaces formed in the absence of current erosion. Geol. Rom. 8, 41–46.

Anketell, J.M., Cegla, J., Dzulinsky, S., 1970. On the deformational structures in systems with reversed density gradients. Ann. Soc. Geol. Pol. 1 (XL), 3–30.

Dzulynski, S., Walton, E.K., 1965. Sedimentary Features of Flysch and Greywackes. Elsevier, Amsterdam, 274 pp. in Sedimentology 47, Elsevier, Amsterdam, pp. 135– 189.

Kuenen, P.H., 1958. Experiments in geology. Trans. Geol. Soc. Glasgow 23, 1–28.

McKee, E.D., Goldberg, M., 1969. Experiments on formation of contorted structures in mud. Geol. Soc. Am. Bull. 80, 231–244.

McKee, E.D., Reynolds, M.A., Baker Jr., C.H., 1962a. Laboratory studies on deformation in unconsolidated sediment. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 450 (D), 155–160.

McKee, E.D., Reynolds, M.A., Baker Jr., C.H., 1962b. Experiments on intraformational recumbent folds in cross-bedded sand. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 450 (D), 151–155.

Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O., & Canas, J. A. (1999). Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, *304*(4), 369-383.

Nichols, R.J., Sparks, R.S.J., Wilson, C.J.N., 1994. Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures. Sedimentology 41, 233–253.

Owen, G., 1985. Mechanism and Controls of Deformation in Unconsolidated Sands: an Experimental Approach. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Reading, 2 Vols., 674 pp.

Owen, G., 1992. A shaking table for experiments on soft-sediment deformation. J. Sediment. Petrol. 62 (4), 733–734.

Owen, G., 1996. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. Sedimentology 43, 279–293.

Rettger, R.E., 1935. Experiments on soft-rock deformation. Bull. Am. Assoc. Pet. Geol. 19, 271–292.

Tsuji, T., Miyata, Y., 1987. Fluidization and liquefaction of sand beds, experimental study and examples from Nich inan Group. J. Geol. Soc. Jpn. 93 (11), 791–808.

Van Loon, A.J., 1992. The recognition of soft-sediment deformations as early-diagenetic features — a literature review. In: Wolf, K.H., Chilingar, G.V. (Eds.), Diagenesis III. Developments

Malzeme Bilimi Açısından Gündelik Dilimizde Yapılan Bazı Kavramsal Hatalar

Ferhat BÜLBÜL

Prof. Dr. Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
ferhat.bulbul@erzurum.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3060-1619

ÖZET

Bu çalışma, malzeme bilimi ve mühendisliği alanlarında kullanılan temel terimlerin günlük dildeki karşılıkları ile teknik anlamları arasındaki farklılıkları ve bu durumun yol açtığı kavramsal karışıklıkları incelemektedir. Bilimsel terminolojinin doğru kullanımının, endüstriyel uygulamaların güvenilirliği ve mühendislik eğitiminin kalitesi açısından taşıdığı kritik önem vurgulanmaktadır.

Halk arasında yaygın olarak yanlış kullanılan veya basitleştirilmiş bazı temel malzeme bilimi kavramları incelenmiştir. Bu kavramlar, analitik yapıyı güçlendirmek amacıyla beş ana kategori altında analiz edilmiştir: Temel Mekanik Özellikler (Dayanım, Sertlik–Mukavemet ve Yumuşaklık gibi mühendisliğin temelini oluşturan özellikler); Kimyasal Süreçler ve Prosesler (Oksidasyon-Korozyon-Paslanma ayrımı, Su Verme (Quenching) İşlemi ve Elektroliz, Elektro kaplama (Electroplating) ile Akımsız kaplama (Electroless Plating) kavramlarının yanlış kullanımı); Demir-Karbon Sistemi (Çelikler) (Demir ve Çelik'in gücü, Karbon içeriğinin kalite algısı, Karbon Çeliği kavramı ve Paslanmaz Çelik'in mutlak direnci hakkındaki yanılgılar); Diğer Metal ve Alaşım Yanılgıları (Platin implantlar, Sarı Metal (Pirinç) genellemesi ve Altının iletkenlikteki yeri gibi yaygın hatalı metal algıları); ve son olarak Diğer Malzeme Sınıfları (Plastik, Naylon ve Camın bilimsel tanımlarının gündelik dildeki yanlış kullanımları).

Yapılan değerlendirmeler, gündelik dilin neden olduğu terminolojik kaymaların, sadece kavramsal bir sorun olmaktan öte, malzeme seçimi, ısıl işlem ve kalite kontrol gibi pratik süreçlerde hatalı kararlar alınmasına neden olabilecek ciddi bir mühendislik problemi olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, malzeme bilimi bağlamında daha tutarlı ve bilimsel temelli bir terminoloji kullanımına katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler − Malzeme Bilimi Terminolojisi, Kavramsal Hatalar, Mühendislik Eğitimi, Günlük Dil Yanılgıları, Malzeme Özellikleri.

GİRİŞ

Bilimsel terminoloji, araştırma sonuçlarının doğru aktarılması, disiplinler arası iletişimin sağlıklı kurulması ve teknik uygulamaların standartlaştırılması açısından temel bir öneme sahiptir. Kavramların kesin tanımlara sahip olması, yalnızca akademik üretimin güvenilirliğini artırmakla kalmaz; aynı zamanda mühendislik, üretim, kalite kontrol, standartlaştırma ve endüstriyel tasarım süreçlerinde hataların önlenmesine katkıda bulunur. Ancak günlük dilde kullanılan terimler ile bilimsel terminoloji çoğu zaman örtüşmez. Bu durum, özellikle teknik disiplinlerde yanlış anlamalara, kavram karmaşasına ve karar verme süreçlerinde hatalara yol açabilir (1–4).

Malzeme bilimi, çok disiplinli yapısı gereği kimya, fizik, metalürji, mühendislik bilimi, polimer teknolojisi ve yüzey bilimi gibi pek çok alanın kesişiminde yer almaktadır. Bu geniş kapsam, malzeme türlerinin, mikro yapıların, faz dönüşümlerinin ve mekanik davranışların çok sayıda kavramla ifade edilmesini gerektirir. Dolayısıyla terminolojik doğruluk ve kavram birliği, malzeme biliminin hem akademik hem de uygulamalı alanlarında kritik bir gerekliliktir.

Ülkemizde ise bazı malzeme bilimi terimleri, gündelik konuşma pratiği içerisinde teknik anlamlarından farklı şekillerde yerleşmiştir. Temel mekanik kavramlar arasında "**dayanım**", **"sertlik–dayanım"** ilişkisi, **"yumuşaklık"** tanımı ve "**alaşım**"ın kapsamı gibi temel özellik yanılgıları ile **"paslanma–korozyon–oksitlenme"** üçlemesi ve **"su verme"** (quenching) prosesi yanlış anlaşılmaktadır. Buna ek olarak, yüzey mühendisliği ve elektrokimyasal işlemler bağlamında "**elektroliz**", "**elektro kaplama** (electroplating)" ve "**akımsız kaplama** (**electroless** plating)" kavramlarının günlük dilde ve teknik olmayan kullanımlarda sıklıkla birbirinin yerine kullanıldığı gözlenmektedir.

Metalürjik malzemeler özelinde ise "**demir**"in gücü, "**çelik**"in **rengi ve tanımı**, **"karbon çeliği"** kavramı, "**paslanmaz çelik**"in mutlak direnci ve "**karbon**"un (içeriği/kompozit) kalite göstergesi olduğu yönündeki algılar hatalıdır. Ayrıca **"sarı"** metalin (pirinç) tek bir malzeme olduğu, protezlerdeki **"platin"** ve iletkenlikteki **"altın"** hakkındaki inançlar da teknik gerçekliği yansıtmamaktadır. Son olarak, polimerler ve amorf katılar sınıfında **"plastik"**, **"naylon"** ve "**cam**"ın bilimsel tanımları da günlük dilde yanlış genelleştirilmiştir. Bu tür terminolojik kaymalar, özellikle mühendislik öğrencilerinin temel kavramları doğru öğrenmesini güçleştirmekte; sanayide ise malzeme seçimi, ısıl işlem, yüzey mühendisliği, işleme yöntemleri ve kalite kontrol süreçlerinde yanlış anlaşılmalara ve iletişim problemlerine zemin hazırlamaktadır. Bu nedenle malzeme bilimi açısından doğru terminolojinin kullanılmaması yalnızca kavramsal bir sorun değil; aynı zamanda uygulamada hatalı kararlar alınmasına yol açabilecek pratik bir problemdir.

Bu çalışmada, malzeme bilimi bağlamında ülkemizde sıkça yanlış kullanılan bu kavramlar ele alınmakta; her birinin doğru teknik karşılığı ve yanlış algının kaynağı açıklanmaktadır. Böylece hem mühendislik eğitiminde hem de uygulamalı alanlarda daha tutarlı ve bilimsel temelli bir terminoloji kullanımına katkı sunmak amaçlanmaktadır.

Bazı Malzeme Terimlerinin Yanlış Kullanımı ve Kavramsal Karışıklıklar

Aşağıdaki alt bölümlerde, malzeme bilimi ve mühendisliği bağlamında günlük dilde, teknik karşılığından farklı kullanılan, kavramsal karışıklığa yol açan Tablo 1'de belirtilen temel başlıklarda ele alınmıştır. Şöyle ki, bu kavramlar, akademik ve pratik anlaşılırlığı artırmak amacıyla, Temel Mekanik

Özellikler, Kimyasal Süreçler ve Prosesler, Demir-Karbon Sistemi (Çelikler), Diğer Metal ve Alaşım Yanılgıları ve Diğer Malzeme Sınıfları olmak üzere beş (5) ana kategoriye ayrılmış ve mantıksal bir akış gözetilerek sıralanmıştır.

Tablo 1. Malzeme Biliminde Yanlış Kullanılan Bazı Kavramların Kategorik Sıralaması

Kategori	Madde	İlgili Kavram ya da Başlık
A. Temel Mekanik Özellikler	Dayanım	Genel "dayanıklılık" kavramı mühendislikte yeterli mi?
	Sertlik–Dayanım	Her sert olan, mukavemetli mi?
	Yumuşaklık	Malzemeye "yumuşak" demek neden teknik bir hata?
	Alaşım	Alaşımlar sadece metal-metal karışımı mıdır?
B. Kimyasal Süreçler ve Prosesler	Paslanma–Korozyon–Oksitlenme	Oksidasyon, korozyon ve paslanma aynı şey midir?
	Elektroliz	Elektroliz Electroless mi?
	Su Verme	Isıl işlemde su verme (quenching), "su vermek" mi?
C. Demir-Karbon Sistemi (Çelikler)	Demir	Demir “demir” gibi güçlü mü !?
	Çelik	Gri renk algısı: her gri metal demir ya da çelik mi?
	Karbon Çeliği	Karbonsuz çelik mi var?
	Paslanmaz Çelik	Paslanmaz çelik, gerçekten her zaman paslanmaz mı?
	Karbon	Karbon her zaman kaliteyi mi ifade eder? Çelik ve kompozitlerdeki karbon yanılgısı nedir?
D. Diğer Metal ve Alaşım Yanılgıları	Sarı	Sarı metal yanılgısı: Her sarı metal aynı mıdır?
	Platin	Protezlerde kullanılan metal, platin mi?
	Altın	Altın, en iyi iletken mi?
E. Diğer Malzeme Sınıfları	Plastik	Her polimer, plastik mi?
	Naylon	Her plastik, naylon mu?
	Cam	Cam, yalnızca şeffaf ve silikat kırılgan bir yapı mı yoksa yapısal bir düzensizlik terimi mi?

Genel "Dayanıklılık" Kavramı Mühendislikte Yeterli mi?

Dayanım, ya da mühendislik terimiyle mukavemet, bir malzemenin dışarıdan uygulanan bir yüke veya strese karşı şekil değiştirmeden veya kırılmadan direnebilme yeteneğinin genel adıdır. Ne var ki, bu kavram halk arasında ve piyasada bir ürünün "dayanıklı" olarak nitelendirilmesi için kullanıldığında, genellikle o malzemenin veya ürünün beklenen hizmet ömrü boyunca çeşitli hasar türlerine karşı genel bir direnç göstermesi beklentisine

dayanır. Ancak bu genel ve yüzeysel tanım, mekanik veya kimyasal hasarın tam olarak hangi türü olduğunu belirtmediği için, malzeme bilimi ve mühendislik açısından eksiktir ve ciddi yanlış anlaşılmalara yol açabilir.

Mekanik dayanım dendiğinde bile tek bir özellikten bahsetmek mümkün değildir; zira dayanım, malzemenin uygulanan gerilme türüne göre alt dallara ayrılır. Örneğin, çekme dayanımı, malzemenin kopmadan dayanabileceği en yüksek çekme kuvvetini ifade ederken, basma dayanımı, ezilmeye karşı gösterilen direnci belirtir. Aynı şekilde, kayma hareketine karşı kesme dayanımı, kendi ekseni etrafında dönme kuvvetlerine karşı ise burulma dayanımı söz konusudur (5). Halk dilinde "mekanik dayanım"ın artması iyi bir şey gibi algılansa da malzemenin hangi yüke karşı iyi olduğu mutlaka belirtilmelidir. Seramikler gibi gevrek (kırılgan) malzemeler bu ayrımın en çarpıcı örneğidir: Seramikler sıkıştırılmaya karşı çok yüksek basma dayanımına sahipken, çekilmeye veya gerilmeye maruz kaldıklarında, plastik deformasyon yetenekleri olmadığı için düşük bir kuvvetle aniden kırılırlar (6–8). Dolayısıyla, bir seramik için sadece "mekanik dayanımı yüksek" demek, çekme altındaki zayıflığını göz ardı ettiği için yanıltıcıdır. Öte yandan, halk arasındaki "dayanıklılık" kavramı sadece kuvvetlere karşı direnci değil, çevresel etkileşimlere karşı direnci de içerir. Bir zemin kaplamasının dayanıklılığı denildiğinde genellikle aşınma direnci (sürtünme yoluyla yüzey kaybına karşı direnç) kastedilirken, paslanmaz çeliklerin dayanıklılığı, çevresel etkilere karşı bozulmaya direnci ifade eden korozyon direnci ile ilişkilidir (9,10). Özellikle sürekli hareketli parçalar için en kritik olanı, malzemenin tekrarlanan ve döngüsel yüklemeler (titreşim) altında kırılmaya karşı gösterdiği direnç olan yorulma dayanımı'dır ki bu özellik, statik dayanım testlerinde tespit edilemediği için çoğu zaman göz ardı edilir (11,12). Ayrıca, malzemenin ani ve yüksek hızlı bir şoka karşı kırılmadan dayanabilme yeteneği olan darbe dayanımı (13) da ürün güvenliği açısından hayati öneme sahiptir.

Sonuç olarak, akademik ve teknik bir metinde dayanım (mukavemet) kavramı kullanılırken, kastedilen gerilme veya hasar türünün mutlaka belirtilmesi gerekir. "Bu çelik çok dayanıklıdır" yerine, "Bu çelik, yüksek çekme dayanımına ve mükemmel korozyon direncine sahiptir" gibi spesifik ve teknik ifadeler kullanılarak, mühendislikte hangi hasar türüne karşı dirençli olunduğu netleştirilmelidir. Halkın kullandığı "dayanıklı" kelimesi, mühendislikte "hangi hasar türüne karşı dayanıklı?" sorusuyla netleştirilerek, Çekme Dayanımı, Basma Dayanımı, Korozyon Direnci veya Yorulma Dayanımı gibi spesifik teknik terimlerle ifade edilmek zorundadır.

Her Sert olan, Mukavemetli mi?

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine uygulanan batma, çizilme veya plastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği yerel dirençtir; bu nedenle ölçüm genellikle çok küçük bir yüzey bölgesini temsil eder. Buna karşılık dayanım,

malzemenin uygulanan dış yükleri kırılmadan veya kalıcı deformasyon olmadan taşıyabilme kapasitesini ifade eden bütünsel bir özelliktir. Mukavemet ise malzemenin kırılmadan dayanabileceği maksimum gerilme düzeyidir. Bu kavramlar arasında bir benzerlik olduğu düşünülse de sertlik doğrudan dayanım veya mukavemet anlamına gelmez (14–19). Bununla birlikte, özellikle sünek metallerde ve çeliklerde sertlik ile dayanım arasında ampirik (deneysel) bir ilişki bulunduğu bilinmektedir. Vickers sertliği (HV) çoğu çelik için yaklaşık olarak akma dayanımının üç katına, yani $\sigma_\gamma \approx HV/3$ bağıntısına karşılık gelir. Benzer şekilde çekme dayanımı da birçok metal için yaklaşık olarak HV'nin 3,0–3,3 katı mertebesinde değişir. Bu tür bağıntılar, sertlik ve dayanımın aynı fiziksel mekanizma—dislokasyon hareketinin engellenmesi—tarafından etkilenmesinden kaynaklanır. Ancak bu ilişki bir fiziksel yasa değildir; yalnızca belirli alaşım grupları için geçerli bir mühendislik kestirimidir. Cam, seramik, karbür gibi çok sert fakat kırılgan malzemelerde bu bağıntılar tamamen geçersizdir; çünkü bu tür malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılganlık belirleyici mekanizmalardır (20). Dolayısıyla sert bir malzemenin mutlaka yüksek mukavemete sahip olması gerekmez. Bir malzeme yüzeysel olarak çizilmeye karşı çok dirençli olabilir, ancak darbe, çekme veya eğilme yükleri altında kolayca kırılabilir. Sertliği yüksek olmasına rağmen kırılgan olan cam ve seramikler buna tipik örnektir. Bu nedenle sertlik, dayanımın yalnızca bazı malzeme türlerinde dolaylı bir göstergesi olabilir; malzeme seçiminde ve mühendislik tasarımında iki özellik her zaman ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Malzemeye "Yumuşak" Demek Neden Teknik Bir Hata?

Bilimsel terminolojide “yumuşaklık” bir malzeme özelliği değildir; ölçülebilir bir büyüklüğü, birimi veya standardı bulunmaz. Halk arasında “yumuşak” olarak ifade edilen durum, gerçekte süneklik, düşük sertlik veya düşük akma dayanımı gibi birbirinden farklı mühendislik özelliklerinin tek bir kelime altında toplanmış hâlidir. Oysa bu özelliklerin her biri malzeme bilimi ve mekanikte açık biçimde tanımlanmış, standart test yöntemleriyle ölçülebilen nicel parametrelerdir.

Süneklik, bir malzemenin kırılmadan kalıcı şekilde şekil değiştirebilme kapasitesini tanımlar; çekilme, uzama, bükülme veya kıvrılma gibi deformasyon türleri bu kapsamda değerlendirilir (6). Düşük sertlik ise bir malzemenin yüzeyine uygulanan batma veya çizilme etkilerine karşı gösterdiği direncin düşük olmasıdır; yani malzeme, yerel bir temas noktasında dış etkiye karşı daha zayıf bir yüzey tepkisi verir.

Akma dayanımı (yield strength), bir malzemenin yük altında kalıcı şekil değişimine geçmeden önce dayanabildiği gerilme seviyesidir. Bu değerin düşük olması, malzemenin yük altında daha erken plastisiteye geçeceği anlamına gelir; bu tür malzemeler daha kolay eğilir, akar veya bükülür ve yük taşıma kapasiteleri sınırlıdır (5). Düşük akma dayanımı çoğu zaman yüksek

süneklikle birlikte görülebilir (örneğin bazı saf metaller veya polimerler). Bu nedenle düşük akma dayanımı, malzemenin davranışını teknik olarak açıklayan bir kavramdır; "yumuşaklık" ise bu davranışların yüzeysel, bilimsel temeli olmayan bir karşılığıdır.

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine uygulanan batıcı bir ucun nüfuzuna veya çizme etkisine karşı koyma kabiliyetini ifade eden yerel bir özelliktir. Mukavemet (strength) ise malzemenin bütününe ait bir nitelik olup kırılmadan taşıyabileceği maksimum gerilme seviyesini tanımlar. Bu iki kavram aynı şey değildir; sert bir malzeme mutlaka yüksek mukavemetli olmayabilir. Hatta birçok çok sert malzeme kırılgandır (cam veya seramik gibi). Bununla birlikte mühendislikte pratik bir gözlem olarak, metallerde sertlik ile akma dayanımı arasında yaklaşık bir ilişki bulunduğu bilinir. Pek çok metalde kullanılan $\sigma_{ak} \approx HV / 3$ bağıntısı, sertlik ölçümünden malzemenin akma dayanımı hakkında kabaca bir tahmin yapılmasını sağlar. Ancak bu ilişki her malzeme için geçerli değildir ve özellikle kırılgan malzemelerde kullanılmaz (5,6).

Özetle, "yumuşaklık" bilimsel bir malzeme özelliği değildir; halk arasında farklı mekanik davranışların tek bir kelimeye indirgenmiş hâlidir. Gerçek mühendislik özellikleri süneklik, sertlik, akma dayanımı ve mukavemettir; bunların her biri tanımlanabilir, ölçülebilir ve birbirleriyle ilişkileri teknik olarak modellenebilir kavramlardır.

Alaşımlar Sadece Metal-Metal Karışımı mıdır?

Alaşım, iki ya da daha fazla elementin belirli oranlarda bir araya gelerek metalik özellik gösteren yeni bir yapı oluşturması olarak tanımlansa da gerçekte alaşım kavramı bundan daha geniş bir çerçeveye sahiptir (21,22). Sanayi kültüründe alaşımlar genellikle yalnızca metal–metal birlikteliğiyle oluşan malzemeler olarak algılansa da metal ile ametalin birlikte oluşturduğu yapılar da alaşım olarak değerlendirilir. Modern endüstride kullanılan metallerin çoğu saf hâlde değildir; çünkü saf metaller çoğu zaman düşük dayanım, düşük sertlik, sınırlı aşınma direnci veya yetersiz ısıl kararlılık gibi nedenlerle mühendislik uygulamalarında gerekli performansı sağlayamaz. Bu nedenle bir malzemenin mekanik, kimyasal, elektriksel veya termal özelliklerini geliştirmek amacıyla alaşımlama, malzeme tasarımının temel yöntemlerinden birini oluşturur.

Alaşımlar genel olarak metalik bağ karakteri taşısalar da alaşım bileşenlerinin kristal yapı içindeki düzenlenişi ve bağlanma tipi, ortaya çıkan fazların her zaman tamamen metalik davranmasına yol açmaz. Örneğin bazı ara yer bileşikleri, intermetalik bileşikler ve elektron bileşikleri, atomların düzenli ve belirgin oranlarda birleşmesiyle, metalik yapıya ek olarak seramik karakterli özellikler de gösterebilir. Bu tür fazlarda bağ karakteri daha iyonik veya kovalent ağırlıklı hâle gelir; böylece ortaya çok yüksek sertliğe, yüksek elastik modüle, kırılgan davranışa ve yüksek sıcaklık kararlılığına sahip yapılar çıkar. Demir-karbon sistemindeki sementit (Fe_3C), tungsten karbür

(WC), titanyum karbür (TiC), borürler (ör. TiB_2) ve nitrürler (ör. Si_3N_4 benzeri iyonik/kovalent karakterli yapılar) buna klasik örneklerdir. Bu bileşikler teknik olarak bir alaşım fazıdır, ancak metalik karakterden çok seramik özelliklere sahiptir; yüksek sertlikleri ve gevrek kırılma eğilimleri bu nedenle ortaya çıkar. Benzer şekilde bazı intermetalik bileşikler — örneğin Ni_3Al, TiAl ve FeAl gibi düzenli atomik dizilime sahip intermetalik bileşikler, metalik ve seramik davranışlar arasında bir geçiş bölgesinde yer almaktadır. Bu fazlar yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik dayanım, oksidasyon direnci ve yapısal kararlılık sergilerken, oda sıcaklığında sınırlı süneklikleri nedeniyle kırılgan bir mekanik davranış göstermektedir. Elektron bileşikleri olarak adlandırılan Hume–Rothery (6,23) fazları da atomik oranların ve elektron yoğunluğunun belirleyici olduğu yapılardır ve çoğu zaman seramik benzeri bir sertlik ve gevreklik gösterir. Buna karşılık, klasik katı çözelti alaşımlarında (ara yer çözeltiler) metalik bağın hâkimiyeti korunur; bu nedenle süneklik, akma dayanımı ve sertlik arasında dengeli bir mekanik davranış elde edilir. Çok fazlı alaşımlar ise yukarıda bahsedilen tüm faz tiplerini bir arada barındırabilir. Böylece bir malzeme hem metalik süneklik hem de seramik benzeri sertlik veya yüksek sıcaklık kararlılığı sağlayan fazları bünyesinde bulundurarak, mühendislik uygulamaları için optimize edilmiş bir performans sunar.

Sonuç olarak alaşım kavramı, yalnızca metal elementlerin karışımından ibaret değildir; kristal yapı, faz oluşumu, bağ karakteri ve atomik düzenlilik gibi unsurların tümü bu geniş kavramın içindedir. Bazı alaşımlar tamamen metalik davranırken, bazıları ise seramik karakterli sert, gevrek ve yüksek sıcaklık dayanımlı fazlara dönüşebilir. Modern malzeme bilimi açısından alaşımlama, bir malzemenin istenen mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri kazanması için temel tasarım araçlarından biridir; ortaya çıkan fazların metalik, yarı-metalik veya seramik karakterde olması ise bu tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır.

Oksidasyon, Korozyon ve Paslanma Aynı Şey midir?

Oksidasyon, korozyon ve paslanma kavramları çoğu zaman birbirinin yerine kullanılsa da aslında farklı süreçleri ifade eder. Oksidasyon, bir elementin elektron vererek yükseltgenmesi anlamına gelir ve bu her zaman olumsuz bir durum değildir (24,25). Örneğin demirde oluşan Fe_2O_3 tabakası gevrek, gözenekli ve metalin tüketilmesine yol açan bir yapı oluşturduğu için zararlıdır. Buna karşılık paslanmaz çeliklerde kromun oksitlenmesiyle oluşan Cr_2O_3 tabakası son derece ince, kararlı ve yapışkan bir film oluşturur; bu film alt tabakadaki metali oksijen ve nemden koruduğu için malzemenin paslanmazlık özelliğinin temelidir. Oksit tabakalarının koruyucu veya zararlı olup olmadığını anlamak için Pilling–Bedworth oranı kullanılır (26). Bu oran, oluşan oksit tabakasının hacmi ile oksitlenen metalin hacmi arasındaki ilişkiyi tanımlar. Oranın 1'e yakın veya biraz üzerinde olması oksit tabakasının metal

yüzeyi tamamen örterek koruyucu bir film oluşturduğunu, yani oksidin yapışkan ve bütünlüklü olduğunu gösterir. Oran 1'den küçük olduğunda oksit tabakası metal yüzeyini tamamen kaplayamaz ve çatlaklar oluşur; bu durum oksidin koruyucu olmadığını gösterir. Oran 2'nin çok üzerine çıktığında ise oksit tabakası metal üzerinde aşırı gerilim oluşturur, kabuklanır ve yüzeyden ayrılır; bu durumda oksit yine koruyucu değildir. Örneğin demirin Fe_2O_3 oluşturması durumunda Pilling–Bedworth oranı uygunsuz olduğu için oksit tabakası yüzeyde tutunamaz ve korozyon ilerler, buna karşılık paslanmaz çeliklerdeki Cr_2O_3 tabakası ideal bir değerle çok iyi bir bariyer oluşturur.

Korozyon ise yalnızca oksidasyonla sınırlı olmayan daha geniş bir kavramdır; metalin çevresiyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek bozulması, yani malzemenin kaybı anlamına gelir. Asidik çözeltiler, klorür iyonları, galvanik çift oluşumu veya metalin kendi içindeki potansiyel farkları gibi çok çeşitli mekanizmalar korozyona yol açabilir. Bu nedenle her oksidasyon bir korozyon değildir; örneğin krom oksidi oluşumu oksidasyondur fakat koruyucu olduğu için korozyonun ilerlemesine yol açmaz (27).

Paslanma ise korozyonun özel bir türüdür ve yalnızca demir ve çeliklerde görülür. Pas, hidratlı demir oksit ve oksihidroksitlerden oluşur; özellikle $FeO{\cdot}OH$, $Fe(OH)_3$ ve $Fe_2O_3{\cdot}H_2O$ gibi bileşikler pas tabakasının ana bileşenleridir. Bu yapılar gözenekli ve gevrek oldukları için yüzeyi korumaz, aksine alt tabakadaki demirin atmosferik oksijen ve nemle temasını sürdürerek korozyonun ilerlemesine neden olur. Fe_3O_4 (manyetit) nispeten daha koruyucu bir oksit olmasına rağmen, atmosferik koşullarda çoğunlukla $Fe_2O_3{\cdot}H_2O$ tipinde pas tabakaları oluşur ve bu tabaka koruyucu değildir. Dolayısıyla her korozyon paslanma değildir ve paslanma yalnızca demir esaslı malzemeler için geçerlidir (28–32).

Sonuç olarak oksidasyon, korozyon ve paslanma aynı süreçler değildir. Bazı oksitlenmeler koruyucu ve istenilen tabakalar oluştururken, bazıları metalin tüketilmesine yol açar. Bu farklılıkların anlaşılmasında Pilling–Bedworth oranı kritik bir parametre olup, bir metalin oksit tabakasının yapısını ve koruyuculuğunu yorumlamada temel bir kriter olarak kullanılır.

Elektroliz Electroless mi?

Yüzey mühendisliği ve elektrokimyasal prosesler alanında kullanılan "elektroliz", "elektro kaplama (electroplating)" ve "akımsız kaplama (electroless plating)" terimleri gerek gündelik dilde gerekse teknik arka planı sınırlı uygulamalarda sıklıkla birbirinin yerine kullanılmaktadır. Bu durum, söz konusu yöntemlerin temel enerji girdileri, reaksiyon mekanizmaları ve sınıflandırmaları açısından ciddi kavramsal yanlış anlamalara yol açmaktadır. Oysa bu üç kavram hem termodinamik yaklaşım hem de reaksiyonun sürdürülme biçimi bakımından açık biçimde birbirinden ayrılmaktadır.

Elektroliz, en genel anlamıyla, dışarıdan uygulanan bir elektrik akımı yardımıyla kendiliğinden gerçekleşmeyen bir redoks reaksiyonunun zorlanması esasına dayanan bir elektrokimyasal süreçtir. Elektroliz sırasında, doğru akım kaynağı ile oluşturulan elektrik alan etkisiyle iyonlar zıt yüklü elektrotlara doğru hareket eder; bu sayede katotta indirgenme, anotta ise yükseltgenme reaksiyonları gerçekleşir. Bu çerçevede elektroliz, yalnızca maddelerin ayrıştırılmasını değil, uygun koşullar altında metal iyonlarının katot yüzeyinde indirgenerek çökelmesini de kapsayan geniş bir kavramsal üst başlık niteliğindedir (33). Elektro kaplama (electroplating) ise, elektroliz prensibine dayanan özel bir yüzey kaplama uygulamasıdır. Bu yöntemde, metal iyonlarının indirgenmesi doğrudan harici elektrik akımı ile sağlanır ve kaplama kalınlığı, akım yoğunluğu, kaplama süresi ve elektrolit bileşimi gibi parametrelerle kontrol edilir. Dolayısıyla elektro kaplama, İngilizce teknik literatürde açık biçimde "electrolytic plating" ya da "electroplating" olarak adlandırılan, elektrik enerjisine bağımlı bir prosestir (34–36). Buna karşılık akımsız kaplama (electroless plating), adından da anlaşılacağı üzere, herhangi bir dış elektrik akımı kullanılmaksızın gerçekleştirilen bir yüzey kaplama yöntemidir. Bu proseste metal iyonlarının indirgenmesi, kaplama banyosunda bulunan kimyasal indirgen maddeler (örneğin hidrazin, hipofosfit veya bor hidrürler) aracılığıyla sağlanır. Reaksiyon, yüzeyde oluşan metal fazının katalitik etkisiyle otokatalitik olarak devam eder. Bu nedenle electroless plating, elektrolitik değil; tamamen kimyasal indirgenmeye dayalı bir yüzey mühendisliği yöntemi olarak sınıflandırılmalıdır (37–40). Özellikle Pd ve Pd alaşımlı membranların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni, karmaşık geometrilere homojen kaplama yapılabilmesi ve elektrik alanına ihtiyaç duyulmamasıdır.

Türkçede ortaya çıkan temel kavramsal sorunlardan biri, "electroless" teriminin etimolojik olarak "elektro–" ön ekini çağrıştırması nedeniyle, zaman zaman "elektroliz" kavramı ile ilişkilendirilmesi ya da electroless işlemlerin "elektriksiz elektroliz" gibi teknik açıdan hatalı ifadelerle tanımlanmasıdır. Oysa İngilizcede *electroless* terimi, açık biçimde "without electric current" anlamına gelmekte olup, elektrolitik bir süreci değil, kimyasal indirgenmeye dayalı bir mekanizmayı ifade etmektedir. Buna karşılık Türkçede "elektroliz" olarak kullanılan kavram, İngilizce teknik literatürde "electrolysis", "electrolytic process" veya kaplama özelinde "electroplating" olarak karşılık bulmaktadır. Bu terminolojik yanlış eşleştirme, özellikle electroplating ile electroless plating yöntemlerinin aynı fiziksel temele dayandığı yönünde hatalı bir algı oluşturmaktadır. Oysa bu iki kaplama yaklaşımı; enerji girdisi, reaksiyon kinetiği, yüzey aktivasyonu gereksinimi, kaplama homojenliği ve proses kontrol parametreleri açısından farklı sınıflara aittir.

Sonuç olarak, elektroliz, elektro kaplama ve akımsız kaplama kavramlarının birbirinden ayrıştırılmadan kullanılması, yüzey kaplama teknolojilerinin doğru anlaşılmasını zorlaştırmakta hem akademik öğretimde hem de endüstriyel uygulamalarda kavramsal ve pratik hatalara zemin

hazırlamaktadır. Bu nedenle, özellikle Türkçe teknik literatürde, İngilizce karşılıklarıyla uyumlu ve mekanizma-temelli bir terminoloji kullanımının benimsenmesi, malzeme bilimi ve yüzey mühendisliği açısından zorunlu bir gereklilik olarak değerlendirilmelidir.

Isıl İşlemde Su Verme (Quenching), "Su Vermek" mi?

Isıl işlem terminolojisinde sıkça kullanılan "su verme" kavramı, özellikle öğrenciler ve saha çalışanları arasında çoğu zaman hatalı biçimde "metali suya daldırarak sertleştirme" olarak algılanmaktadır. Oysa teknik anlamda *su verme* (quenching), çeliğin kritik sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra hızlı bir şekilde soğutulmasını ifade eder ve bu soğutma işlemi yalnızca su ile sınırlı değildir (41). Tarihsel olarak sertleştirme işleminin su ile yapılması, kelimenin böyle yerleşmesine neden olmuştur; ancak modern malzeme mühendisliğinde su, yalnızca beş farklı soğutma ortamından biridir. Bugün su verme (quenching) işlemi; su, tuzlu su, yağ, polimer çözeltiler, hava, hatta basınçlı gaz (N_2, He) ve tuz banyoları gibi çok farklı ortamlarla gerçekleştirilmektedir. Bunun temel nedeni, her çelik türünün farklı bir soğuma hızına ihtiyaç duymasıdır. Yanlış ortam seçimi, çatlama, deformasyon veya yetersiz sertlik gibi ciddi hatalara yol açabilir. Ne var ki hem eğitim ortamlarında hem de sanayide "su verme" kelimesi hâlâ sadece "su ile soğutma" gibi algılandığı için yanlış uygulamalar ortaya çıkmaktadır. Örneğin orta karbonlu bir çeliği doğrudan suya daldırmak, gereksiz yere çatlama riskini artırmakta, oysa daha uygun olan yağ veya polimer çözelti ile kontrollü soğutma çoğu zaman daha doğru sonuç vermektedir (42–45). Benzer biçimde, hava ile sertleşebilen yüksek alaşımlı çeliklerde "suya verme" çabası hem gereksiz hem de zararlıdır. Bu nedenle "su verme" kavramının doğru tanımı, öğrenciler ve teknik personel tarafından net biçimde anlaşılmalıdır: *Su verme, soğutma işlemidir; soğutma ortamı su olmak zorunda değildir.* Kısacası, ısıl işlemdeki en kritik nokta kelimenin kendisi değil, uygun soğutma ortamının doğru seçilmesidir. Doğru terminolojinin yerleşmesi hem üretim kalitesini artıracak hem de ısıl işlem sırasında ortaya çıkabilecek hata ve kayıpları azaltacaktır.

Demir "demir" gibi güçlü mü!?

Demir, saf hâlinde nispeten sünek ve düşük mukavemetli bir metaldir (46–48). Oda sıcaklığında saf demirin akma dayanımı yaklaşık 50–100 MPa, çekme dayanımı ise 200–250 MPa mertebesindedir; buna karşılık uzama değerleri %40'ın üzerine çıkabilmektedir. Bu özellikler, saf demirin şekillendirilebilirliğinin yüksek ancak yapısal taşıma kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Günlük hayatta ve mühendislik uygulamalarında "dayanıklı demir" olarak adlandırılan malzemelerin büyük çoğunluğu ise, gerçekte demirin karbon ve çeşitli alaşım elementleriyle birleştirilmiş hâli

olan çeliklerdir. Nitekim düşük karbonlu yapı çeliklerinde akma dayanımı 250–350 MPa seviyesine yükselirken, orta ve yüksek karbonlu veya alaşımlı çeliklerde uygun ısıl işlemlerle çekme dayanımı 800–1500 MPa (hatta daha fazla) ve üzerine çıkarılabilmektedir. Bu nedenle halk arasında sıkça kullanılan "demirin gücü" ifadesi, gerçekte demirin kendisine değil, çelik alaşımlarının sunduğu belirgin şekilde üstün mekanik performansa işaret etmektedir.

Demiri ve çeliği mühendislik açısından değerli kılan unsur yalnızca karbon ve alaşım elementleriyle ısıl işlem yoluyla sertleşebilmesi değildir. Aynı zamanda plastik deformasyon (soğuk şekillendirme, haddeleme, dövme vb.) ile de önemli ölçüde mukavemet kazanabilir. Örneğin soğuk şekillendirilmiş düşük karbonlu çeliklerde akma dayanımı, deformasyon sertleşmesi etkisiyle başlangıç değerinin iki katına kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla dayanımın gerçek kaynağı, demirin saf hâli değil; alaşımlandırma, mikro yapı kontrolü, ısıl işlem ve deformasyon sertleşmesi gibi mühendislik teknikleriyle ortaya çıkarılan güçlenme potansiyelidir.

Gri Renk Yanılgısı: Her Gri Metal Demir ya da Çelik mi?

Gri metalik bir yüzeye bakarak bir malzemenin çelik olduğunu söylemek doğru değildir. Çünkü bakır ve altın gibi birkaç istisna dışında, mühendislik metallerinin büyük çoğunluğu gri tonlarında görünür (49). Dolayısıyla gri renk, çeliğe özgü bir ayırt edici özellik değildir. Bir malzemeyi çelik yapan şey, yüzey rengi değil; demirin belirli oranlarda karbon ve diğer alaşım elementleriyle oluşturduğu kimyasal bileşim ve mikro yapıdır. Çeliğin tanımlanması da ancak bu bileşim ve yapısal özellikler üzerinden yapılabilir, gözle görülen renk üzerinden yapılamaz.

Karbonsuz, Çelik mi Var?

İngilizce literatürde sıkça kullanılan "carbon steel" terimi, Türkçe'ye doğrudan "karbon çeliği" olarak çevrildiğinde öğrenciler ve sektör çalışanları arasında önemli bir kavramsal yanılsamaya yol açmaktadır. Bu ifadeden, sanki bir de "karbonsuz çelik" sınıfı varmış ve "carbon steel" bunlardan ayrı, özel bir karbonlu malzeme grubunu temsil ediyormuş gibi yanlış bir anlam çıkmaktadır. Oysa "carbon steel", çelik sınıflandırmasında alaşımsız çelikler ya da sade karbonlu çelikler olarak bilinen ve esasen demir–karbon sistemine dayanan çelikler için kullanılan genel bir tanımdır (50–52). Bu çelikler, karbonun yanında yalnızca üretimden gelen çok küçük miktarlarda Mn, Si, P, S gibi kalıntı elementler içerir ve bu nedenle alaşımlı çeliklerden ayrılır.

Alaşımsız çeliklerin mikroyapısı, karbon oranına bağlı olarak ferrit (α-Fe), perlit (ferrit + Fe_3C), sementit (Fe_3C) gibi fazlardan oluşur ve tamamen demir–karbon denge diyagramı tarafından belirlenir. Bu yönüyle yapıları eşit dağılımlı olmayan, faz karışımı içeren heterojen bir alaşımdır. Karbon

miktarına göre düşük karbonlu (%0,25'e kadar), orta karbonlu (%0,25–0,60 arası) ve yüksek karbonlu çelikler (%0,60–1,0 arası) şeklinde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma, çeliğin sertleşebilirliğini, mukavemetini, şekillendirilebilirliğini ve ısıl işlem kabiliyetini doğrudan etkiler. Buna karşılık alaşımlı çelikler, demir ve karbonun yanı sıra özel performans özellikleri kazandırmak amacıyla belirli oranlarda Ni, Cr, Mo, V, W, Co gibi alaşım elementleri içeren çeliklerdir. Bu alaşım elementleri çeliğe;

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Korozyon direnci,
- Aşınma direnci,
- Sertleşebilirlik artışı,
- Tane inceltme,
- Temper gevrekliğine direnç gibi özel işlevler kazandırır. Dolayısıyla alaşımlı çelikler, karbon çeliklerinin sınırlı özelliklerinin ötesine geçmek için tasarlanan mühendislik malzemeleridir (53,54).

Sonuç olarak "carbon steel" terimi, "karbon eklenmiş çelik" veya "karbonca zengin özel çelik" anlamına gelmez; çelik ailesinin temelini oluşturan alaşımsız ya da sade karbonlu çeliklerin genel karşılığıdır. Bu kavramsal ayrım doğru yapılmadığında, çelik türlerinin sınıflandırılması, mikroyapısal içerikleri ve mühendislik uygulamalarındaki yerleri yanlış anlaşılmakta; bu da özellikle öğrencilerde "karbonlu–karbonsuz çelik" şeklinde gerçekte var olmayan bir ikiliğine neden olmaktadır.

Paslanmaz Çelik Gerçekten Her Zaman Paslanmaz mı?

"Paslanmaz çelik", en az %10,5 oranında krom içeren ve yüzeyinde kendi kendini yenileyebilen (self-passivating) bir krom oksit filmi oluşturan çelik türüdür. Bu Cr_2O_3 tabakası son derece ince, kararlı ve sıkı yapışan bir pasif film olduğu için oksijenle temas ettiği sürece kendini sürekli yenileyebilir. Böylece alt tabakadaki metalin oksijen, su ve diğer aşındırıcı bileşenlerle temasını keser ve korozyon direncinin temelini oluşturur (55,56). Paslanmaz çeliklerin yüksek dayanımının temelinde, bu pasif tabakanın bütünlüğü, yapışması ve Pilling–Bedworth oranının (26) koruyucu değerde olması yer alır. Ancak bu durum "paslanmaz çeliğin her ortamda korozyona tamamen dirençli olduğu" anlamına gelmez. Pasif film belirli koşullarda bozulabilir, incinebilir veya yer yer delinerek malzemenin lokal korozyon mekanizmalarına karşı savunmasız hale gelmesine neden olabilir. Özellikle klorür iyonu içeriği yüksek ortamlarda (deniz suyu, havuz kimyasalları, temizlik maddeleri, tuzlu atmosferler) klorür iyonları pasif filmi noktasal olarak delerek çukurcuk (pitting) korozyonunu başlatabilir (57). Çukurcuk korozyonu, paslanmaz çeliklerde en tehlikeli korozyon türlerinden biridir çünkü dışarıdan küçük bir iz olarak görünürken, metalin içinde derin ve hızlı

ilerleyen oyuklar oluşturabilir. Buna ek olarak, paslanmaz çelik pasif tabakası yüksek çekme gerilmeleri altında veya klorür içeren sıcak ortamlarda gerilmeli korozyon çatlamasına (Stress Corrosion Cracking) uğrayabilir. Bu mekanizma genellikle aniden kırılma ile sonuçlandığı için kritik ekipmanlarda büyük risk oluşturur (58,59). Benzer şekilde, pasif film oksijence fakir ortamlarda yenilenemediğinde, yarık korozyonu (crevice corrosion) olarak bilinen lokal bir korozyon türü gelişebilir (60–62). Bu nedenle paslanmaz çeliğin korozyon direnci her zaman ortamın bileşimine, sıcaklığa, gerilme durumuna ve oksijen mevcudiyetine bağlıdır.

Paslanmaz çeliklerin paslanmazlığını olumsuz etkileyen bir diğer önemli mekanizma ise yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan tane sınırı çökelmesi (Grain boundary precipitation/sensitization) olayıdır (63–65). Malzeme 450–850°C aralığında tutulduğunda karbon, krom ile birleşerek tane sınırlarında krom karbür ($Cr_{32}C_6$) çökeltileri oluşturur. Bu çökeltilerin oluştuğu bölgelerde krom miktarı azalır ve krom oranı pasif tabakanın oluşması için gerekli minimum seviyenin altına düşer. Böylece tane sınırlarında pasif film bütünlüğü bozulur ve malzeme tane sınırı korozyonu, bıçak sırtı korozyonu (knife-line corrosion) (66–68) ve kaynak bölgesinde görülen korozyon türlerine karşı duyarlı hale gelir. Bu nedenle özellikle kaynaklı yapılarda, yanlış ısıl işlem uygulamalarında veya yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlarda paslanmaz çeliğin dayanımı beklenmedik şekilde azalabilir. Bu problemi önlemek için düşük karbonlu (L sınıfı) paslanmaz çelikler, Ti veya Nb ile stabilize edilmiş alaşımlar ve uygun tavlamalar (solution annealing) gibi metalurjik önlemler kullanılmaktadır. Dolayısıyla "paslanmaz" ifadesi mutlak ve koşulsuz bir korozyon dayanımı anlamına gelmez; yalnızca pasif tabakanın uygun çevre koşullarında metal yüzeyini etkin biçimde koruyabileceğini ifade eder. Yanlış alaşım seçimi, uygun olmayan servis şartları, pasif filmi bozan agresif iyonların varlığı veya yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan metalurjik dönüşümler sonucunda paslanmaz çelik dahi korozyona uğrayabilir.

Karbon Her Zaman Kaliteyi mi İfade Eder? Çelik ve Kompozitlerdeki Karbon Yanılgısı Nedir?

Halk arasında sık rastlanan "karbonu yüksek çelik = kaliteli çelik" algısı, teknik açıdan doğru değildir. Çelikte karbon oranının artması belirli etkiler yaratır, ancak bunlar her zaman "kalite artışı" anlamına gelmez. Örneğin karbon miktarı arttıkça çeliğin sertleşme kabiliyeti yükselir, ancak bu etkinin bir sınırı vardır. Yaklaşık % 0,85-1 karbon içeriğinin üzerinde sertlik artsa bile gevreklik belirgin şekilde yükselir ve malzeme kırılgan bir davranış göstermeye başlar. Karbon, çeliğin mekanik özelliklerini belirleyen tek unsur değildir. Dayanım, tokluk, aşınma direnci, işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi birçok özellik; mangan, krom, nikel, vanadyum gibi alaşım elementleriyle, ısıl işlemle ve üretim parametreleriyle birlikte şekillenir. Çeliklerde karbon oranı arttıkça işlenebilirlik, süneklik ve tokluk genellikle

azalır. Bu nedenle yüksek karbon her zaman arzu edilen bir durum değildir; kullanım amacına göre optimum karbon seviyesinin belirlenmesi gerekir. Dolayısıyla karbon oranı, alaşım tasarımında tek başına bir kalite göstergesi değildir. Çeliğin performansı, karbonun yanı sıra mikroyapı, ısıtma–soğutma süreçleri, alaşım elementi dengesi ve imalat yöntemi gibi çok sayıda faktörün bir bileşkesidir. Benzer bir yanlış algı, günlük hayatta "ürün karbon malzemeden üretilmiş" ifadesinde de ortaya çıkar. Jant, bisiklet, araba parçası veya spor ekipmanı gibi ürünlerde "karbon" sözcüğü çoğu zaman dayanıklı, üstün nitelikli ve hafif malzeme anlamında bir pazarlama ifadesi olarak kullanılır. Ancak bu ifadeyi kullanan kişilerin önemli bir kısmı kompozit malzeme kavramını bilmemektedir. Gerçekte bu tür ürünlerde "karbon" olarak adlandırılan malzeme: ne tamamen karbon elementinden oluşan bir ametaldir, ne de yalnızca "karbon liflerinden" oluşan tekil bir yapıdadır. Bu malzemeler teknik olarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerdir (CFRP). Yapı iki temel bileşenden oluşur: Karbon fiberler, yükü taşıyan, yüksek çekme dayanımlı, yönlendirilmiş lifler; polimer matris (genellikle epoksi) ise fiberleri bir arada tutan, yük aktarımını sağlayan, şekil veren faz bu iki faz birlikte çalışarak yüksek özgül dayanım, hafiflik ve yorulma direnci sağlayan kompozit bir yapı oluşturur. Dolayısıyla "karbon jant", "karbon bisiklet" gibi ifadelerde kastedilen şey karbon elementinin kendisi değil, karbon fiberlerle güçlendirilmiş polimer matriksli kompozit bir malzemedir. Kısacası hem çeliklerdeki karbon içeriği hem de "karbon malzeme" kavramı, günlük dilde sıkça yanlış anlaşılan konulardır. Teknik terminolojinin doğru kullanılması, malzeme seçimi ve ürün performansı değerlendirmelerinde yanlış kanıların önüne geçilmesini sağlar.

Sarı Metal Yanılgısı: "Her Sarı Metal Aynı Mıdır?

Günlük kullanımda sıkça duyulan "sarı metal" ifadesi, çoğu zaman yanlış biçimde tek bir elementmiş gibi algılanır. Oysa teknik olarak sarı metal, belirli bir element değil, bakır ve çinkonun farklı oranlarda birleşmesiyle oluşan alaşımların genel adıdır. Başka bir deyişle, "sarı metal" tek bir metal ya da tek bir kimyasal bileşime sahip bakır çinko alaşım değil, geniş bir pirinç (brass) alaşımları ailesidir. Bu yanlış algı özellikle öğrenciler, makine–metal işleri eğitimi alanlar ve bazı saha uygulayıcıları arasında sık görülür. Kullanıcı "sarı metal" dendiğinde, sanki demir, bakır, alüminyum gibi tek bir elementten oluşan bir malzeme varmış gibi düşünür. Oysa pirinç alaşımları; Cu–Zn oranına, içerdiği Pb, Sn, Al, Si, Mn gibi katkılara, mekanik ve mekanik olmayan özelliklerine, kullanım alanına göre yüzlerce farklı varyanta sahiptir. Bu nedenle "sarı metal" demek, teknik bir tanımdan çok genel halk deyimi niteliğindedir. Örneğin 60% Cu – 40% Zn ile 70% Cu – 30% Zn oranına sahip iki malzeme renk olarak benzer görünse de akma dayanımı, işlenebilirliği, korozyon direnci, sertlik, soğuk şekillendirme kabiliyeti gibi özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. Bu nedenle eğitim ortamlarında ve sanayide

doğru terminoloji kullanmak önemlidir. "Sarı metal", bakır–çinko alaşımlarına verilen genel addır; tek bir element veya tek bir alaşım değildir. Bu ayrımın netleşmesi, hem malzeme seçimi sırasında hataların önüne geçer hem de öğrencilerde doğru malzeme bilimi algısının gelişmesini sağlar.

Protezlerde Kullanılan Metal, Platin mi?

Halk arasında "platin" olarak anılan protez ve implantların büyük çoğunluğu gerçekte platin değildir; bunlar Ti6Al4V olarak bilinen titanyum–alüminyum–vanadyum alaşımından üretilir (69–71). Gerçek platin ise çok daha ağır (yoğunluğu 21,45 g/cm^3), son derece sünek, pahalı ve kimyasal olarak soy (inert) bir metaldir. Bu nedenle tıp ve ortopedik implant sektöründe yaygın olarak kullanılmaz (72–74).

Gündelik konuşmalarda titanyum alaşımlarının hafif (yaklaşık 4,5 g/cm^3 yoğunlukta), dayanıklı ve biyouyumlu oluşu, halk arasında 'platin' kavramıyla özdeşleşmiş durumdadır. Bu nedenle insanlar, vücuda yerleştirilen her türlü metal implantı yanlış bir şekilde "platin takıldı" diye ifade etmektedir. Oysa bu kullanım teknik olarak hatalıdır ve tıbbi malzemelerin gerçek bileşimlerini yansıtmaz.

Altın, En İyi İletken Metal mi?

Halk arasında ve bazı popüler kültür kaynaklarında altının (Au) en iyi elektriksel iletken olduğu yönünde yaygın bir algı bulunmaktadır. Bu durum, malzeme bilimi açısından teknik bir yanılgıdır. Gerçekte saf metaller arasında, oda sıcaklığında (≈20 °C) en yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan element Gümüş (Ag)'tür. Gümüşün elektriksel özdirenci yaklaşık $1{,}59 \times 10^{-8}$ Ω·m (iletkenlik ≈ 63 MS/m) olup, bu değer metaller arasında en düşüktür. Gümüşü, özdirenci $1{,}68 \times 10^{-8}$ Ω·m (iletkenlik ≈ 59,6 MS/m) olan Bakır (Cu) izler. Altın (Au) ise $2{,}44 \times 10^{-8}$ Ω·m özdirenç (iletkenlik ≈ 41 MS/m) değeriyle bu sıralamada üçüncü sırada yer almaktadır (75,76).

Altının iletkenlik açısından gümüş ve bakırın gerisinde kalmasına rağmen "en iyi iletken" olarak algılanmasının temel nedeni, elektronik endüstrisinde kritik bağlantı noktalarında (pinler, konnektörler, temas yüzeyleri ve kaplamalar) yaygın biçimde kullanılmasıdır. Ancak altın, en yüksek iletkenliğe sahip olduğu için değil; üstün korozyon direnci ve kimyasal kararlılığı nedeniyle tercih edilmektedir. En iyi iletken olan gümüş, havayla temas ettiğinde sülfidasyona uğrayarak yüzeyinde iletken olmayan gümüş sülfür (Ag_2S) tabakası oluşturur ve bu durum temas direncinin zamanla artmasına yol açar. Benzer şekilde bakır da oksitlenerek yüzeyinde oluşan oksit tabakası nedeniyle elektriksel direncini artırır. Buna karşılık altın, atmosferik koşullar altında oksitlenmez veya sülfürleşmez; dolayısıyla yüzeyinde sürekli düşük ve kararlı temas direnci sağlar. Bu yüksek kimyasal kararlılık sayesinde altın, özellikle uzun ömürlü, güvenilir ve kesintisiz

elektriksel temas gerektiren uygulamalarda (havacılık, savunma sanayi, uzay teknolojileri ve yüksek performanslı bilgisayar sistemleri) vazgeçilmez bir malzeme hâline gelmiştir. Sonuç olarak, altının elektronik uygulamalardaki tercih edilme sebebi en iyi iletken olması değil; en güvenilir ve en kararlı iletken bağlantı malzemesi olmasıdır.

Her Polimer, Plastik mi? Her Plastik, Naylon mu?

"Naylon", 1935 yılında DuPont tarafından geliştirilen ilk sentetik poliamid türünün ticari adıdır ve kelime kökeni İngilizce "nylon"dan gelir. Şehir isimlerinin kısaltılması olduğu yönündeki yaygın söylentiler gerçeği yansıtmaz; firma yalnızca teknik, akılda kalıcı ve küresel pazara uygun bir marka ismi olarak "nylon"u seçmiştir (77–80). Zamanla bu ticari ad, belirli bir polimer sınıfını temsil eden genel bir terime dönüşmüş, özellikle Türkiye'de çok daha geniş bir kültürel ve mecazi anlam kazanmıştır. Günlük dilde "naylon" kelimesi çoğu zaman plastik poşetleri, ucuz plastik eşyaları veya sentetik kumaşları ifade etmek için kullanılır. Oysa piyasada bu isimle anılan ürünlerin büyük bir bölümü naylon (polyamid) değildir; polietilen (PE), polipropilen (PP) veya PET gibi bambaşka polimer türlerinden üretilir. Dolayısıyla "her plastik naylondur" düşüncesi yanlıştır. Aynı şekilde Türkiye'deki alışveriş poşetlerinin neredeyse tamamı polietilendir ve teknik anlamda "naylon poşet" değildir. Ayrıca naylonun ucuz veya kalitesiz olduğu düşüncesi de halk arasındaki bir yanılgıdır; naylon, yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci nedeniyle aslında mühendislik plastiği sınıfında yer alır. Kelimenin Türkçedeki mecaz kullanımları da dikkat çekicidir. "Naylon fatura", "naylon hesap", "naylon işe girmek" gibi ifadelerde sözcük, "sahte, gerçek olmayan, kâğıt üzerinde var görünen" anlamına gelir. Bu mecazi anlam, naylonun halk arasında "suni, yapay, doğal olmayan" bir şeyle özdeşleşmesinden kaynaklanmıştır. Burada "naylon" ile "plastik" kavramlarının da doğru ayrılması gerekir. Türkçede plastik çoğu zaman tüm polimer malzemelerin genel adı gibi yanlış bir anlamda kullanılır. Oysa teknik terminolojide "plastik" bir malzeme türü değil, bir malzemenin şekil değiştirme davranışı, yani plastiklik (plasticity) anlamına gelir. Plastiklik; bir malzemenin yük kalktığında kalıcı şekil değiştirmiş halde kalmasıdır (81). Bu davranış yalnızca polimerlere özgü değildir: Metaller de plastik şekil değiştirebilir, hatta metal şekillendirme süreçlerinin tümü (haddeleme, dövme, ekstrüzyon, çekme vb.) metalin plastik deformasyon kabiliyetine dayanır. Buna karşın seramikler plastik değildir, çünkü atomik yapıları kırılgandır ve elastik deformasyon sınırını aşınca akmadan, doğrudan kırılarak hasar görürler. Öte yandan her polimer de plastik değildir. Bazı polimerler kauçuksu (elastomerik) davranır; yük kalktığında eski haline döner ve kalıcı şekil değiştirme göstermez (82). Bu nedenle teknik açıdan malzeme sınıfı olarak en doğru kullanım "polimer"dir; "plastik" ise bir malzemenin şekillendirilebilirlik/kalıcı deformasyon davranışını tanımlar. Halk arasında

ise plastik sözcüğü hem malzeme hem davranış anlamında kullanıldığından terminolojik karışıklık oluşur.

Naylonun sağlık açısından zararlı olduğu yönündeki yaygın kanaat de büyük ölçüde yanlış anlaşılmalara dayanır. Poliamidin kendisi standart koşullarda toksik veya kanserojen değildir; risk daha çok üretim sırasında kullanılan katkı maddeleri, hatalı üretim koşulları, uygun olmayan kullanım sıcaklıkları veya yanma ürünleriyle ilişkilidir. Sonuç olarak "naylon"; teknik olarak belirli bir polimer ailesinin (poliamidler) adıyken, günlük dilde zamanla bütün plastiklerle özdeşleşmiş, ayrıca kültürel ve mecazi anlamlar kazanmış bir kelimeye dönüşmüştür. Ancak malzeme bilimi açısından bakıldığında naylon, plastik ve polimer kavramlarının birbirinden farklı olduğu; naylonun tüm plastikleri temsil etmediği, plastik kelimesinin ise bir malzemenin cinsi değil, deformasyon davranışını tanımlayan teknik bir kavram olduğu unutulmamalıdır.

Cam, Yalnızca Şeffaf ve Silikat Kırılgan Bir Yapı mı Yoksa Yapısal Bir Düzensizlik Terimi mi?

Bilimsel anlamda cam, kristal yapısı olmayan tüm amorf katıların genel adıdır (83). Bu tanım; yalnızca silika (SiO_2) esaslı pencere camlarını değil, aynı zamanda metalik camları ve polimerik camları da kapsayan geniş ve teknik bir çerçeve sunar. Günlük hayatta "cam" denildiğinde çoğu kişi yalnızca saydam, kırılgan ve silikat esaslı yapıların akla gelmesi nedeniyle kavram önemli ölçüde daraltılmaktadır. Oysa malzeme bilimi açısından cam, uzun menzilli atomik düzen içermeyen, yani kristal yapıya sahip olmayan tüm amorf katılar için kullanılan yapısal bir tanımdır (84). Bu bağlamda en yaygın kavramsal yanılgılardan biri, "cam" kelimesinin yalnızca SiO_2 esaslı, şeffaf ve kırılgan malzemeleri ifade ettiği düşüncesidir. Oysa kristal yapıya sahip olmayan herhangi bir katı —renkli, opak, metalik ya da polimerik fark etmeksizin— bilimsel olarak cam olarak sınıflandırılabilir. Örneğin metalik camlar (amorf metal alaşımları), çok yüksek soğuma hızlarıyla üretildikleri için kristallenmeye fırsat bulamayan metal sistemlerinden oluşur. Bu malzemeler saydam değildir; buna karşın yüksek elastik sınırları, yüksek mukavemetleri ve atomik düzensizlikleri nedeniyle açıkça cam fazı niteliği taşırlar. Benzer biçimde polimerik camlar, polimerlerin cam geçiş sıcaklığının (Tg) altında sert ve rijit hâle gelen amorf durumlarını temsil eder. Görünüm olarak pencere camına benzemeseler bile, atomik ölçekte kristal düzen içermedikleri için cam fazı olarak değerlendirilirler.

Cam kavramının yalnızca katı–kırılgan–şeffaf üçlüsüyle açıklanamaması, literatürde daha ileri ve tartışmalı yorumların ortaya çıkmasına da zemin hazırlamıştır. Hatta bazı yaklaşımlarda cam, klasik anlamda bir katıdan ziyade "aşırı soğutulmuş (supercooled) bir sıvı" olarak tanımlanmıştır (85). Bu görüşe göre cam, termodinamik dengeye ulaşamamış; kristallenmesi kinetik olarak engellenmiş bir sıvıdır. Atomlar sıvıya benzer

biçimde düzensiz konumlanmış, ancak soğutma süreci yeterince hızlı olduğu için bu düzensiz yapı donarak katı benzeri bir rijitlik kazanmıştır. Bu nedenle camlar, kristal katılarda olduğu gibi keskin bir erime sıcaklığına sahip değildir; sıcaklık arttıkça yumuşar ve akışkanlığa doğru kademeli bir geçiş sergiler. Bu olgu, cam geçişi (glass transition) olarak adlandırılır ve klasik katı–sıvı faz dönüşümlerinden temelde farklıdır. Bu yaklaşımı savunan görüşler, camın çok uzun zaman ölçeklerinde son derece yüksek viskoziteli bir akış gösterebileceğini ve bu yönüyle "akmayan katı"dan ziyade "son derece yavaş akan bir sıvı" olarak da yorumlanabileceğini ileri sürmektedir. Özellikle silikat camların atomik düzeyde sıvıya benzer bir düzensizliğe sahip olması, bu düşüncenin temel dayanaklarından biridir. Bu nedenle literatürde camın katı mı yoksa donmuş bir sıvı mı olduğu sorusu, kesin ve tek bir yanıtı olmayan; tanıma, zaman ölçeğine ve bakış açısına bağlı olarak değişen bir tartışma konusu hâline gelmiştir. Bu çerçevede günlük hayatta zaman zaman dile getirilen "cam aslında sıvıdır" iddiası, bütünüyle bilim dışı bir söylem olarak değil; camın denge dışı yapısı, cam geçişi olgusu ve amorf sistemlerin çok yüksek viskoziteli davranışı bağlamında ortaya çıkan bilimsel tartışmaların popülerleştirilmiş bir yansıması olarak değerlendirilmelidir. Başka bir deyişle, cam için yalnızca "kırılgan bir SiO_2 katısı" demek kadar, onu "donmuş bir sıvı" olarak nitelendiren yaklaşımlar da malzeme bilimi literatüründe tarihsel ve kavramsal bir karşılığa sahiptir.

Sonuç olarak cam, ne yalnızca şeffaf bir silikat malzemeye indirgenebilir ne de basit bir katı–sıvı ikiliği içinde tanımlanabilir. Cam; atomik ölçekte sıvı benzeri düzensizliğe sahip, makroskopik ölçekte ise katı gibi davranan, termodinamik denge dışında kalmış bir amorf fazdır. Bu karmaşık doğa, camın malzeme bilimi eğitiminde neden hâlâ kavramsal tartışmaların merkezinde yer aldığını ve öğretici bir örnek olarak önemini koruduğunu açıkça göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği alanındaki bazı temel terim ve kavramların gündelik dildeki kullanımlarıyla teknik tanımları arasındaki farklılıkları analiz etmiştir. İncelenen bu kavramsal hataların sadece iletişimsel bir sorun olmaktan öte, endüstriyel süreçlerde hatalı malzeme seçimi ve güvenilirlik sorunlarına yol açabilecek ciddi bir mühendislik problemi olduğu saptanmıştır.

Analiz edilen bulgular, beş ana kategori altında toplanan ve disiplinler arası yanılgıları ortaya koyan kritik hataları içermektedir:

- Mekanik Özelliklerin İndirgenmesi: Halk dilinde tek bir kelimeye indirgenen "Dayanıklılık" ve "Yumuşaklık" kavramları, teknik anlamda Çekme Dayanımı, Akma Dayanımı, Yorulma Direnci ve Süneklik gibi ölçülebilir ve bağımsız özellikleri ifade etmekten uzaktır. Özellikle Sertlik ile Mukavemet arasındaki ilişkinin, gevrek malzemeler (seramik) için geçersiz olduğu vurgulanmıştır.
- Kimyasal Süreçlerin Karıştırılması: Oksidasyon, Korozyon ve Paslanma terimlerinin eş anlamlı sanılması yanlıştır; bu süreçler kimyasal olarak farklıdır ve malzemenin bozulma mekanizmalarını doğru anlamak için ayrım kritiktir. Benzer şekilde, Su Verme (Quenching) işleminin, soğutma ortamı su olmak zorunda olmayan genel bir (hızlı) soğutma prosesi olduğu netleştirilmiştir. Ayrıca, elektroliz, elektro kaplama (electroplating) ve akımsız kaplama (electroless plating) kavramlarının birbirinin yerine kullanılması, elektrokimyasal ve kimyasal kaplama yöntemlerinin çalışma prensiplerinin yanlış algılanmasına neden olan önemli bir terminolojik hata olarak belirlenmiştir. Elektrolizin, dışarıdan uygulanan elektrik akımı ile yürütülen genel bir elektrokimyasal süreç olduğu; elektro kaplamanın bu prensibe dayalı bir kaplama uygulaması olduğu; buna karşılık electroless kaplamanın herhangi bir elektrik akımı kullanılmaksızın, kimyasal indirgenme ve otokatalitik mekanizma ile gerçekleştiği vurgulanmıştır. Bu üç kavramın aynı başlık altında değerlendirilmesi, elektrokimyasal ve kimyasal kaplama yöntemlerinin çalışma prensiplerinin yanlış anlaşılmasına neden olmaktadır.
- Bileşim ve Kalite Hataları: Karbon içeriğinin çeliklerdeki sertliği artırırken aynı zamanda gevrekliği de yükseltmesi nedeniyle, yüksek karbonun tek başına bir kalite göstergesi olmadığı ortaya konmuştur. Benzer şekilde, "Karbon Jant" gibi ifadelerde kastedilenin Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit (CFRP) olduğu, saf karbon elementinin olmadığı açıklanmıştır.
- Metal Kimliği Yanılgıları: "Platin" protezlerin aslında Titanyum alaşımları olduğu, "Sarı Metal"in tek bir element değil, yüzlerce farklı Pirinç (Cu-Zn) alaşımını kapsadığı ve Altının iletkenlikte en iyi değil, korozyon direnci sayesinde en güvenilir metal olduğu tespit edilmiştir.
- Yapısal Tanım Hataları: "Cam"ın şeffaflık veya SiO_2 içeriği ile değil, amorf olmasıyla tanımlandığı; "Plastik" teriminin ise bir malzeme türünü değil, kalıcı şekil değiştirme (plastisite) davranışını tanımladığı açıklanmıştır.

Yapılan değerlendirmeler, gündelik dilin neden olduğu bu terminolojik kaymaların, mühendislik eğitiminin temelini zayıflattığını ve imalat sanayinde kalite kontrol süreçlerinde hatalı kararlar alınmasına zemin

hazırladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, teknik dilin doğru kullanımı iki temel alanda kritik önem taşımaktadır. Öncelikle, Malzeme Seçimi sürecinde "Dayanıklı" veya "Paslanmaz" gibi genel ve yetersiz ifadeler yerine, amaçlanan yüke veya çevreye yönelik spesifik özelliklerin (Basma Dayanımı, Korozyon Direnci, Yorulma Dayanımı) kullanılması gerekmektedir. İkinci olarak, Proses Kontrolü aşamasında, ısıl işlem gibi kritik süreçlerde "Su Verme" gibi gelenekselleşmiş ancak teknik kapsamı daraltılmış terimlerin yerine, "Hızlı Soğutma" veya "Su verme (Quenching) Ortamı Seçimi" gibi malzemenin mikro yapısını doğrudan etkileyen daha doğru ve teknik kavramların kullanılması zorunludur.

Sonuç olarak bu çalışma, Malzeme Bilimi bağlamında daha tutarlı, kesin ve bilimsel temelli bir terminoloji kullanımına geçilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu dil birliği hem akademik altyapıyı güçlendirecek hem de endüstriyel uygulamalarda hata ve kayıpları azaltarak ulusal üretim kalitesine doğrudan katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Taubaldiyev M, Mambetova M, Kulmanov S, Yelemessova Z, Ashimbayeva N. Problems and prospects of systematization of the general scientific terminology. Scientific Herald of Uzhhorod University Series Physics. 2024 Apr 14;(56):758–67.
2. Girişen N. Definition typology in terminology [Doctorate]. [Eskişehir]: Eskişehir Osmangazi University; 2019.
3. Friis J, Goldbeck G, Gouttebroze S, Bleken FL, Ghedini E. Materials science and ontologies. In: Digitalization and Sustainable Manufacturing. London: Routledge; 2024. p. 117–35.
4. Iļjinska L, Smirnova T. Conflicting Tendencies in the Development of Scientific and Technical Language Varieties: Metaphorization vs. Standardization. Research in Language. 2014 Mar 30;12(1):93–111.
5. GEORGE E. DIETER. MECHANICAL METALLURGY . 1961.
6. Callister WD; RDG. Fundamentals of Materials Science and Engineering. . Wiley; 2015.
7. Rosler J, HH and BM. Mechanical Behaviour of Engineering Materials—Metals, Ceramics, Polymers, and Composites. Springer; 2007.
8. qizi NRK, Turabayevich YA. The Mechanical and Thermal Properties of Ceramic Materials. American Journal of Applied Science and Technology. 2025 Apr 1;5(4):98–101.
9. Roy S, Mandal P kumar. Corrosion Resistance Methods for Stainless Steel. In 2020. p. 208–25.

10. Xu Y, Li Y, Chen T, Dong C, Zhang K, Bao X. A short review of medical-grade stainless steel: Corrosion resistance and novel techniques. Journal of Materials Research and Technology. 2024 Mar;29:2788–98.
11. Pineau A, Bathias C. Introduction to Fatigue: Fundamentals and Methodology. In: Fatigue of Materials and Structures. Wiley; 2013. p. 1–21.
12. Schijve J, editor. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Springer Netherlands; 2009.
13. William Johnson. Impact Strength of Materials. 1972.
14. Pintaude G. Hardness as an indicator of material strength: a critical review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2023 Sep 3;48(5):623–41.
15. Zhang P, Li SX, Zhang ZF. General relationship between strength and hardness. Materials Science and Engineering: A. 2011 Nov;529:62–73.
16. Li L, Khraishi T, Shen YL. Indentation and Hardness of Materials: An Inherently Multiscale-Dependent Problem. Metals (Basel). 2025 Feb 28;15(3):265.
17. D. CH. The Hardness of Metals and its Measurement. Nature. 1935 Sep 14;136(3437):415–415.
18. Oganov AR, Lyakhov AO. Towards the theory of hardness of materials. Journal of Superhard Materials. 2010 Jun 2;32(3):143–7.
19. Anand L, Kamrin K, Govindjee S. Hardness of a material. In: Introduction to Mechanics of Solid Materials. Oxford University PressOxford; 2022. p. 518–23.
20. Fischer-Cripps AC. The measurement of hardness of very hard materials. Surf Coat Technol. 2016 Apr;291:314–7.
21. Campos RP, Contreras-Cuevas A, Muñoz RAE. Structural and Chemical Characterization of Metals, Alloys and Compounds. Vol. 755. Trans Tech Publications Ltd; 2013.
22. Habashi F, editor. Alloys. Wiley; 1998.
23. Mizutani U. Hume-Rothery Rules for Structurally Complex Alloy Phases. CRC Press; 2016.
24. Smallman RE, Ngan AHW. Oxidation, corrosion and surface treatment. In: Physical Metallurgy and Advanced Materials Engineering. Elsevier; 2007. p. 481–511.
25. Britton SC. The Corrosion and Oxidation of Metals. British Corrosion Journal. 1977 Jan 20;12(1):5–5.
26. Xu C, Gao W. Pilling-Bedworth ratio for oxidation of alloys. Materials Research Innovations. 2000 Mar 13;3(4):231–5.
27. Burns RM. The Corrosion of Metals-I. Mechanism of Corrosion Processes. Bell System Technical Journal. 1936 Jan;15(1):20–38.
28. Akhtar J. A Review on Corrosion Protection of Iron and Steel. Recent Patents on Corrosion Science. 2014 Apr 31;3(2):79–147.
29. Cushman AS. The Corrosion of Iron and Steel. Science (1979). 1912 Aug 16;36(920):214–6.
30. Knight B. A review of the corrosion of iron from terrestrial sites and the problem of post-excavation corrosion. The Conservator. 1990 Jan;14(1):37–43.
31. Whitman WG. Corrosion of Iron. Chem Rev. 1926 Jan 1;2(4):419–35.
32. Cornell RM, Schwertmann U. The Iron Oxides. Wiley; 2003.

33. Fontaine H, Fontaine H. Electrolysis: a practical treatise on nickeling, coppering, gilding, silvering, the refining of metals and treatment of ores, by means of electricity. Electrolysis: a practical treatise on nickeling, coppering, gilding, silvering, the refining of metals and treatment of ores, by means of electricity. 2011.
34. Gugua EC, Ujah CO, Asadu CO, Von Kallon DV, Ekwueme BN. Electroplating in the modern era, improvements and challenges: A review. Vol. 7, Hybrid Advances. 2024.
35. Parthasaradhy N V. Practical Electroplating Handbook.(Retroactive Coverage). Prentice-Hall, Inc(USA),. 1989;
36. Schlesinger M, Paunovic M. Modern electroplating: Fifth edition. Modern Electroplating: Fifth Edition. 2011.
37. Riedel W. Electroless nickel plating. Metal Finishing. 2003 Mar;101(3):34.
38. Baudrand DW. Electroless Nickel Plating. In: Surface Engineering. The Netherlands: ASM International; 1994. p. 290–310.
39. Sudagar J, Lian J, Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review. Vol. 571, Journal of Alloys and Compounds. 2013.
40. Bulbul F. The effects of deposition parameters on surface morphology and crystallographic orientation of electroless Ni-B coatings. Metals and Materials International. 2011;17(1).
41. Liščić B, Tensi HM, Luty W, editors. Theory and Technology of Quenching. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1992.
42. Bell T. Heat treatment. International Metals Reviews. 1977 Jan 18;22(1):156–7.
43. Heat Treatment of Steels. MDPI; 2021.
44. Domanski M, Webb J. A Review of Heat Treatment Research. Lithic Technology. 2007 Jan;32(2):153–94.
45. Czerwinski F, editor. Heat Treatment - Conventional and Novel Applications. InTech; 2012.
46. Hosford WF. Iron and Steel. Cambridge University Press; 2012.
47. Wertime TA. Iron and Steel by W. K. V. Gale (review). Technol Cult. 1970 Oct;11(4):630–1.
48. Janke D. Book review: Nitrogen and Carbon in Iron and Steel. Thermodynamics. Steel Research. 1992 Oct 13;63(10):464–464.
49. Cann D. Color from Transition Metals. In 2025. p. 67–74.
50. Classifications and Designations of Carbon and Alloy Steels. In: Metals Handbook Desk Edition. ASM International; 1998. p. 203–19.
51. Islam T, Rashed HMMA. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier; 2019.
52. Plain Carbon Steels. In: Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. ASM International; 2008. p. 349–70.
53. Alloy Steels. In: Iron and Steel. Cambridge University Press; 2012. p. 195–7.
54. Tuttle R. Alloy Steels. Metals (Basel). 2018 Feb 8;8(2):116.
55. Manufacturing and Application of Stainless Steels. MDPI; 2020.
56. Singh A, editor. Stainless Steels. IntechOpen; 2022.

57. Pardo A, Merino MC, Coy AE, Viejo F, Arrabal R, Matykina E. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions. Corros Sci. 2008 Jun;50(6):1796–806.
58. Cheng YF. Stress Corrosion Cracking of Pipelines. Wiley; 2013.
59. Parker JG. 'Stress corrosion cracking and corrosion fatigue of steam-turbine rotor and blade materials.' British Corrosion Journal. 1991 Jan 20;26(3):170–2.
60. Costa EM, Dedavid BA, Santos CA, Lopes NF, Fraccaro C, Pagartanidis T, et al. Crevice corrosion on stainless steels in oil and gas industry: A review of techniques for evaluation, critical environmental factors and dissolved oxygen. Eng Fail Anal. 2023 Feb;144:106955.
61. BETTS AJ, BOULTON LH. Crevice corrosion: review of mechanisms, modelling, and mitigation. British Corrosion Journal. 1993 Jan 18;28(4):279–96.
62. Iannuzzi M, Salasi M, Hornus E. Crevice corrosion. 2019.
63. Ricks RA. Duplex grain boundary precipitation in austenitic stainless steels containing aluminium and titanium. Acta Metallurgica. 1984 Jul;32(7):1105–15.
64. Brailsford AD, Aaron HB. Growth of Grain-Boundary Precipitates. J Appl Phys. 1969 Mar 15;40(4):1702–10.
65. Qi YL, Zhao L, Sun X, Zong HX, Ding XD, Jiang F, et al. Enhanced mechanical performance of grain boundary precipitation-hardened high-entropy alloys via a phase transformation at grain boundaries. J Mater Sci Technol. 2021 Sep;86:271–84.
66. Streicher MA. Effect of Heat Treatment, Composition and Microstructure on Corrosion of 18 Cr-8Ni-Ti Stainless Steels in Acids. In: Advances in the Technology of Stainless Steels and Related Alloys. ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959; 1965. p. 257–72.
67. Streicher M. Theory and Application of Evaluation Tests for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Stainless Steels and Related Alloys—Problems and Opportunities. In: Intergranual Corrosion of Stainless Alloys. ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959; 1978. p. 3–84.
68. Sensitization or Weld Decay and Knife-line Attack in Stainless Steels. In: A Practical Guide to Welding Solutions. Wiley; 2019. p. 247–55.
69. Zhang L, Chen L. A Review on Biomedical Titanium Alloys: Recent Progress and Prospect. Adv Eng Mater. 2019 Apr 20;21(4).
70. Ezugwu EO, Wang ZM. Titanium alloys and their machinability—a review. J Mater Process Technol. 1997 Aug;68(3):262–74.
71. Marin E, Lanzutti A. Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review. Materials. 2023 Dec 25;17(1):114.
72. Wise EM. The Platinum Metals: A Review of Their Properties and Uses. J Electrochem Soc. 1950;97(3):57C.
73. Darling AS. Some Properties and Applications of the Platinum-Group Metals. International Metallurgical Reviews. 1973 Sep 18;18(3):91–122.
74. The Occurrence, Extraction, Properties and Uses of the Platinum Group Metals. In 1991. p. 9–31.

75. Electrical Conductivity in Metals. In: Statistical Physics. WORLD SCIENTIFIC; 1999. p. 466–84.
76. Rossiter PL. The Electrical Resistivity of Metals and Alloys. Cambridge University Press; 1987.
77. Shakiba M, Rezvani Ghomi E, Khosravi F, Jouybar S, Bigham A, Zare M, et al. Nylon—A material introduction and overview for biomedical applications. Polym Adv Technol. 2021 Sep 11;32(9):3368–83.
78. Peterson GG, Zhao WB, Abouhussein R. Nylon 6,12. In: Polymer Data Handbook. Oxford University PressNew York, NY; 2009. p. 293–5.
79. Schmidt GJ. Nylon plastics, Melvin I. Kohan, Ed., Wiley, New York, 1973, 683 pp. Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition. 1975 Mar 11;13(3):184–184.
80. Gao J, Wu Y, Li J, Peng X, Yin D, Jin H, et al. A review of the recent developments in flame-retardant nylon composites. Composites Part C: Open Access. 2022 Oct;9:100297.
81. Khraishi T, Ayoub G, Mesarovic S, Shehadeh M. Preface: the physics of metal plasticity. J Mater Sci. 2024 Mar 27;59(12):4723–7.
82. Shea JJ. Handbook of plastics, elastomers, & composites, 4th ed. [Book Review]. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2003 Jan;19(1):53–53.
83. Kamaraj SK, Thirumurugan A, editors. Glass-based Materials. IOP Publishing; 2024.
84. Möncke D, Topper B, Clare AG. Glass as a State of Matter—The “newer” Glass Families from Organic, Metallic, Ionic to Non-silicate Oxide and Non-oxide Glasses. Rev Mineral Geochem. 2022 May 1;87(1):1039–88.
85. Debenedetti PG, Stillinger FH. Supercooled liquids and the glass transition. Nature. 2001 Mar 8;410(6825):259–67.

Elektriksiz Kaplamalarla Manyetik Özelliklerin Modifikasyonu: Bir Derleme

Ferhat BÜLBÜL[1]
Merve Gizem ÖZDEN[2]

1- Prof. Dr.;Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
ferhat.bulbul@erzurum.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3060-1619
2- Dr. Öğr. Üyesi; Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
merve.ozden@erzurum.edu.tr ORCID No: 0000-0002-1067-8881

ÖZET

Elektriksiz (akımsız) kaplama yöntemleri, karmaşık geometrilerde dahi homojen metal birikimi sağlayabilen, kimyasal bileşim ve mikroyapı üzerinde yüksek kontrol imkânı sunan gelişmiş yüzey mühendisliği teknikleridir. Son yıllarda bu yöntemler, yalnızca aşınma ve korozyon direncini artırmak amacıyla değil; aynı zamanda manyetik özelliklerin hassas biçimde modifiye edilmesi için de yoğun biçimde araştırılmaktadır. Özellikle Ni–P, Ni–B ve bunların alaşımlı, kompozit ve çok katmanlı türevleri; doygunluk manyetizasyonu, koersivite, (zorlayıcı alan), remanans (kalıcı mıknatıslanma) ve manyetik anizotropi gibi temel manyetik parametrelerin tasarlanabilir hâle getirilmesine olanak tanımaktadır.

Bu derleme çalışmasında, elektriksiz kaplamalarda manyetik özellik modifikasyonuna yönelik literatürde rapor edilen çalışmalar; kimyasal bileşim ayarı, mikroyapı mühendisliği, ısıl işlemle faz dönüşümlerinin kontrolü, manyetik alan destekli kaplama süreçleri ve kompozit/çekirdek–kabuk mimarileri başlıkları altında bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Fosfor ve bor içeriğinin amorf–kristal faz dengesi üzerindeki etkileri, ısıl işlem sıcaklığına bağlı Ni, Ni_3P ve Ni_3B fazlarının manyetik davranışı nasıl yönlendirdiği ve arayüz mühendisliğinin exchange coupling (değişim etkileşimi) mekanizmaları üzerinden manyetik performansı nasıl belirlediği sistematik olarak tartışılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, elektriksiz kaplamaların manyetik özellik mühendisliği açısından çok boyutlu bir tasarım alanı sunduğunu ortaya koymakta; literatürde dağınık hâlde bulunan kimyasal, mikroyapısal, termal ve arayüz temelli yaklaşımları tek bir çerçevede birleştirerek, manyetik olarak tasarlanabilir elektriksiz kaplamalar için yol gösterici bir referans sunmaktadır.

Anahtar kelimeler − Elektriksiz Kaplama, Manyetik Özellikler, Koersivite, Manyetik Yumuşaklık, Manyetik Bozulma.

GİRİŞ

Elektriksiz (akımsız) kaplamalar, dışardan elektrik akımı gerektirmeyen kendi kendine katalitik indirgeme mekanizmaları sayesinde karmaşık geometrilerde dahi homojen metal çökelmesi sağlayan, modern yüzey mühendisliğinin en esnek ve yüksek kontrol imkânı sunan yöntemlerinden biridir (1–14). Ni-P, Ni-B ve bunların kompozit türevleri; ayarlanabilir kimyasal bileşimleri, geniş taban malzeme uyumlulukları ve yüksek kaplanabilirlikleri sayesinde yalnızca korozyon ve aşınma direnci açısından değil, aynı zamanda manyetik özelliklerin hassas biçimde modifikasyonu bakımından da endüstriyel ve bilimsel açıdan önemli bir araştırma platformu oluşturur (1–7,12,15).

Elektriksiz kaplamalarda elde edilen manyetik davranış; bileşim, faz evrimi, kristal–amorf oranı, tane boyutu, iç gerilme, arayüz tasarımı ve işlem parametreleri gibi çok sayıda değişkenin eşzamanlı etkisiyle belirlenir. Fosfor içeriği arttıkça Ni-P kaplamalarda amorf faz hâkimiyeti güçlenmekte, bu durum doygunluk manyetizasyonunu düşürürken manyetik yumuşaklığı artırmaktadır (1–5). Buna karşılık Ni-B kaplamalar daha yüksek manyetizasyon sunmakta ancak borun artırdığı iç gerilme nedeniyle koersivite yükselebilmektedir (6,12). Isıl işlemler sonucunda Ni, Ni_3P ve Ni_3B gibi fazların kontrollü kristalleşmesiyle manyetik moment, geçirgenlik ve koersivite önemli ölçüde yeniden şekillenmektedir; özellikle 500–600 °C aralığı hem Ni-P hem Ni-B kaplamalarda optimum manyetik performansın elde edildiği kritik sıcaklık bölgesi olarak rapor edilmiştir (7,8,15–17).

Manyetik alan destekli elektriksiz kaplama teknikleri hem reaksiyon kinetiği hem de mikroyapısal evrim üzerinde güçlü etkilere sahiptir. Manyetik alan, hipofosfit oksidasyonunu hızlandırarak çekirdeklenme yoğunluğunu artırabilmekte; mikro-MHD etkisi ile kütle transferini iyileştirerek kaplama hızını ve yüzey morfolojisini optimize edebilmektedir (1–5). Manyetik alanın bu etkisi tek yönlü olmayıp; alan şiddeti, yönelimi ve mikroyapı ölçeğine bağlı olarak değişmektedir. Uygun koşullarda domain hizalanmasını teşvik ederek yumuşak manyetik davranışı güçlendirebilirken, farklı parametrelerde yönlü manyetik anizotropi oluşturarak manyetik özelliklerin doğrultu bağımlı hâle gelmesine yol açabilmektedir. Serbest radikal mekanizmasına dayalı modeller, manyetik alanın $Ni^{+}\cdot/H\cdot$ radikal çiftlerinin spin dönüşümlerini hızlandırarak aktivasyon enerjisini düşürdüğünü göstermektedir (2). Manyetik alan altında Co nanotellerin çizgisel büyümesi (3) ve Ni–Fe–P gibi alaşımların 3D baskı reçineleri üzerinde manyetik kontrollü modifikasyonu (8) bu etkinin farklı uygulama alanlarındaki somut örnekleridir. Ayrıca haricî alan, tane oryantasyonu ve manyetik anizotropiyi doğrudan yönlendirerek kaplama tasarımına yeni bir boyut kazandırmaktadır (18).

Güncel literatür, kompozit ve çok katmanlı yapılar aracılığıyla manyetik özelliklerin daha karmaşık biçimde mühendislik edilebileceğini göstermektedir. $SmCo_5$/FeCo (9), Co–Zn–P/C-fiber (10), Ag/TiO_2 çekirdek–kabuk sistemleri (7), Ni-P/SiC (13), Ni-B/Mg (19) ve Ni tabanlı mikromanyetik robotik yapılar (15) gibi sistemlerde arayüz mühendisliği; manyetizasyon, remanans, koersivite ve magnetik anizotropi üzerinde belirleyici rol oynar. Grafen, CNT veya hBN gibi iki boyutlu malzemelerle oluşturulan hibrit kaplamalar, yüzey dipollerini ve elektron geçişlerini modifiye ederek hem elektriksel hem manyetik performansı geliştirir (12). Bu gelişmeler, Elektriksiz (akımsız) yöntemin yalnızca konvansiyonel kaplama tekniği değil; aynı zamanda nano-yapı sentezi, enerji uygulamaları ve mikroelektronik için çok yönlü bir fonksiyonel malzeme üretim platformu olduğunu göstermektedir (8,20,21).

Karıştırma türü, banyo bileşimi, indirgeme ajanı konsantrasyonu, nikel tuzlarının kimyasal formu ve oksidatif yaşlanma gibi proses değişkenleri de

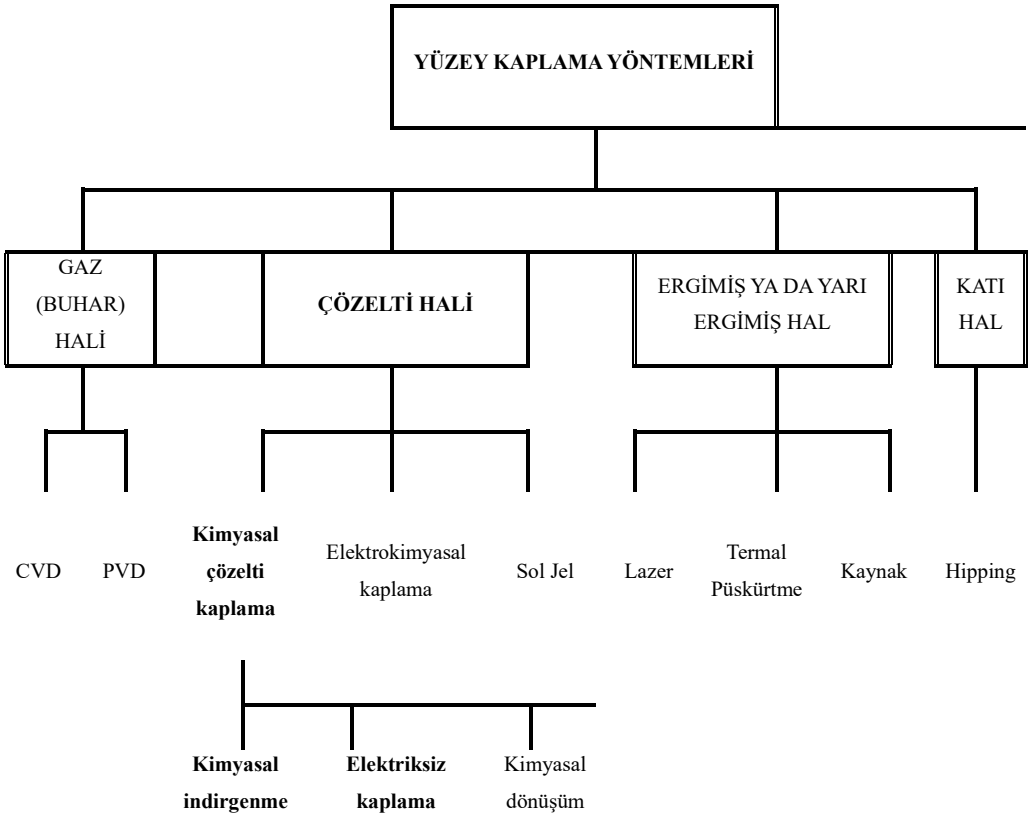
kaplama morfolojisi, iç gerilme ve manyetik parametreler üzerinde doğrudan belirleyicidir (13,22–25). Pürüzlülük düzeyinin domain duvarı hareketini kontrol ederek manyetik yumuşamayı etkilediği (24) ve indirgeme kinetiğinin doygunluk manyetizasyonu ile koersiviteyi belirlediği bilinmektedir. Bu kapsamda, haricî manyetik alanla seçici metalizasyon (SMMF) tekniği, yalnızca manyetik alan uygulanan bölgelerde metal çöktürme prensibiyle maskesiz, yüksek çözünürlüklü ve çevreci bir üretim yöntemi sunmaktadır (12).

Tüm bu çalışmalar (5,11,15,17,19,21,23,25–28), elektriksiz kaplamaların manyetik özellik mühendisliği açısından yalnızca bir yüzey kaplama işlemi değil; kimyasal bileşim, faz dönüşümleri, mikroyapı kontrolü, arayüz tasarımı, manyetik alan uygulaması ve proses optimizasyonunun birlikte işletildiği çok boyutlu bir tasarım alanı olduğunu göstermektedir. Bu derleme, literatürde dağınık hâlde bulunan kimyasal, mikroyapısal, termal, kompozit, manyetik alan destekli ve uygulamaya yönelik tüm deterministik parametreleri bütünleşik bir çerçevede değerlendirmekte; böylece manyetik olarak tasarlanabilir elektriksiz (akımsız) kaplamaların gelecekteki araştırmalarına yön verecek kapsamlı ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır.

Yüzey Kaplama Yöntemleri

Yüzey özelliklerini iyileştirmek için birçok kaplama tekniği ve yüzey işlemi ortaya çıkmıştır. Yüzeye malzeme ilavesi söz konusu ise, yapılan işlem kaplama işlemi; yüzeyin mikroyapı ve/veya kimyasının değişmesi söz konusu ise, yapılan işlem termokimyasal yüzey işlemidir (29–31). Yapılan kaplamanın ve yüzey işleminin etkinliği (yük taşıma kapasitesi, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı vd.) kullanılan kaplama ve yüzey işleminin türüne bağlıdır.

Kaplama tekniği ya da yüzey işleminin seçiminde, taban malzemenin şekli, boyutu ve metalürjisi, kaplama malzemesinin istenen yapıda oluşturulabilmesi, kaplama malzemesinin uygulanan tekniğe uyumu, arzu edilen adezyon seviyesi, kaplama cihazının kullanışlılığı ve maliyet gibi hususlar dikkate alınır. Geçmişten günümüze kadar, yukarıda bahsedilen parametreler göz önüne alınarak tribolojik uygulamalarda yüzey özelliklerini iyileştirmek için önemli avantajlar sağlayan birçok kaplama teknolojisi geliştirilmiştir. Şekil 1'de geliştirilen bu farklı kaplama tekniklerinin sınıflandırılması yapılmıştır.



Şekil 1. Yüzey kaplama teknikleri (32)

Elektriksiz (Akımsız/Electroless) Kaplamalar

Elektriksiz kaplama (otokatalitik kaplama), yüzey mühendisliği alanında en etkili ve yaygın teknolojilerden biri olarak kabul edilmekte olup, farklı metalik ve metal dışı yüzeylerin korunması ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal iyonlarının uygun bir indirgeme ajanı içeren sulu bir çözeltide kimyasal olarak indirgenmesi ve herhangi bir harici elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaksızın metalik kaplamanın yüzeye çökelmesi esasına dayanır. Bu yönüyle elektriksiz kaplama, geleneksel elektrokaplama yöntemlerinden temel olarak ayrılmaktadır (33). Şöyle ki elektriksiz kaplama, dışarıdan uygulanan elektrik akımına dayalı elektroliz ve elektro kaplama yöntemlerinden ayrılmakta; metal iyonlarının indirgenmesi tamamen kimyasal indirgenme ve otokatalitik yüzey reaksiyonlarıyla gerçekleşmektedir.

Elektriksiz kaplamanın temelleri 1835 yılında Liebig tarafından önerilmiş, 1844'te Wurtz tarafından hipofosfit içeren nikel tuz banyosunda ilk nikel birikimi gözlemlenmiştir. Ancak yöntemin endüstriyel anlamda kabul

görmesi, Brenner ve Riddell'in 1946 yılında yayımladıkları çalışmadan sonra hız kazanmıştır. Bu tarihten itibaren, özellikle son yirmi yılda, elektriksiz kaplamaların özellikleri ve endüstriyel uygulamaları üzerine yoğun araştırmalar yapılmış; süreç, yüksek performanslı yüzey kaplama teknolojileri arasında önemli bir yer edinmiştir (34).

Elektriksiz kaplama süreci; taban malzeme, metal iyonları, indirgeme ajanı, bileşik (kompleks) yapıcı madde, pH tamponu ve katalizör olmak üzere temel bileşenlerden oluşur. Taban malzeme; metal, plastik, seramik, cam, tekstil veya kauçuk gibi elektriksel iletkenliği olmayan yüzeyler dâhil olmak üzere oldukça geniş bir malzeme yelpazesine sahip olabilir. Bu özellik, elektriksiz kaplamayı özellikle karmaşık geometrilere ve düzensiz yüzeylere sahip parçalar için cazip kılmaktadır (35). Metal iyonları kaplama banyosunda çözünmüş hâlde bulunurken, indirgeme ajanı bu iyonları metalik forma dönüştürür. Bileşik yapıcı maddeler metal iyonlarını çözeltide stabilize ederken, pH tamponları kaplama hızını ve kaplama kalitesini doğrudan etkileyen ortam pH'ının sabit tutulmasını sağlar. Katalizörler ise indirgeme reaksiyonunu başlatarak otokatalitik sürecin devamlılığını sağlar.

Malzeme yüzeylerinin fiziksel ve mekanik özellikleri; aşınma, korozyon, bakteriyel aktivite ve erozyon gibi dış etkilere karşı dayanımı belirlediğinden, özellikle metal dışı yüzeylerde istenen fonksiyonelliklerin elde edilmesi için çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanmaktadır (36). Elektriksiz kaplamalar, uniform kalınlıkta kaplama yapabilme kabiliyeti, üstün aşınma ve korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve estetik yüzey kalitesi gibi avantajları sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (37,38).

Elektriksiz kaplama teknolojisinin önemli bir gelişimi, büyüyen metalik film içerisine mikro ve nano boyutlu ikinci faz partiküllerinin birlikte çöktürülmesiyle elde edilen elektriksiz kompozit kaplamalardır. Bu kaplamalar; saf metal veya alaşım kaplamalara kıyasla üstün mekanik, tribolojik, manyetik, optik ve elektriksel özellikler sergilemektedir (39,40). Elektriksiz nikel esaslı kaplamalarda, indirgeme ajanı ve banyo katkılarının sürece katılımı nedeniyle kaplamalar genellikle alaşım yapısında oluşur. Özellikle Ni–P kaplamalarda fosfor içeriği, kaplamanın metalurjik özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bu doğrultuda Ni–P kaplamalar, fosfor içeriğine bağlı olarak düşük (%1–7), orta (%7–10) ve yüksek (%10–12) fosforlu olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Yüksek fosforlu Ni–P kaplamaların üstün korozyon ve aşınma direnci sunduğu literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir (41).

Elektriksiz kompozit kaplamalarda, metal veya alaşım matris içerisine Al_2O_3 (42), SiC (43), B_4C (44,45), elmas (46) ve WC (47) gibi sert seramik partiküllerin ilavesiyle yüzey sertliği ve aşınma direnci önemli ölçüde artırılabilmektedir. Örneğin Mazaheri ve arkadaşları (47), elmas partikülleri içeren elektriksiz kaplamaların yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve üstün aşınma direnci sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, bazı metaller

tek başına elektriksiz yöntemle çöktürülemezken, uygun bir taşıyıcı metal matrisi ile birlikte yardımcı çöktürme (codeposition) yoluyla kaplama bünyesine dâhil edilebilmektedir.

Elektriksiz Ni-B kaplamalar

Tablo 1'de banyo bileşenlerinin görevleri verilmiştir. Elektriksiz banyoları kontrol eden temel parametreler, nikel iyon miktarı, bileşik yapıcı (complexing agent) madde miktarı, sıcaklık, pH, dengeleyici (stabilizer) miktarı, banyo yaşı, banyo yükü ve karıştırmadır (48,49).

Tablo 1. Genel elektriksiz banyo bileşimi

Bileşikler	**İşlevi**
Metalik iyonlar	Kaplanacak metal kaynağı
İndirgeyici madde	Elektron kaynağı
Bileşik yapıcı madde	Metalle bir bileşik (kompleks) oluşturur: metalik iyon çözünürlüğünü artırır, hidroksitlerin çökelmesini önler, bu da kararlılığı artırır.
Dengeleyici	Kararlılığı artırır

Elektriksiz nikel kaplama işleminde, çeşitli indirgeyici maddeler kullanılabilir. En çok kullanılanları, (a) sodyum hipofosfit (NaH_2PO_2) (Ni-P kaplama için), (b) amino-boranlar (DMAB), (c) sodyum bor hidrür ($NaBH_4$), (d) hidrazin (NH_2NH_2)'dir (50). Bu banyolar, iyi kaplama oranı elde etmek için yüksek sıcaklıkta (>90°C) kullanılırlar.

Elektriksiz kaplama yönteminde kullanılabilecek en güçlü indirgeyici madde bor hidrür iyonudur. Asidik veya nötral çözeltilerde, bor hidrür iyonlarının hidrolizi çok hızlıdır. Nikel iyonlarının varlığında, nikel borür aynı anda oluşabilir. Fakat kaplama çözeltisinin pH'ı, 12–14 arasında sürdürülebilmesine rağmen, borür oluşumu durabilir ve tepkime ürünü ilke olarak elementel nikeldir. Sodyum bor hidrürün bir molu, yaklaşık nikelin yaklaşık 1 molunu indirgeyebilir, bu nedenle 1 kg nikelin indirgenmesi, 0.6 kg sodyum bor hidrür gerektirir. Bor hidrürle indirgenmiş elektriksiz nikel çözeltilerinden elde edilen kaplamalar, %3–8 arasında (bazı kaynaklarda %1–10 olarak veriliyor (49)) bor içerirler. Nikel hidroksit çökelmesini önlemek için, 12–14 pH arasında etkili olan etilen diamin gibi bileşik yapıcı maddeler kullanılmalıdır. Fakat bu tür güçlü maddeler, kaplama hızını (oranını) azaltır. 90–95°C çalışma sıcaklığında, ticari banyolardaki kaplama hızı, 25–30 μm/saat'ttir. Bor hidrürle indirgenen elektriksiz nikel kaplama banyosunun bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir (51). Tablo 2, literatürde yaygın olarak kullanılan aminoboran ve bor hidrür esaslı banyoların kimyasal içeriklerini ve proses parametrelerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Aminoboran esaslı banyolar (Banyo 1 ve 2), genellikle orta asidik–nötr pH aralığında (pH 5–7) ve yüksek sıcaklıklarda (65–70°C) çalıştırılmaktadır. Bu banyolar, kontrollü kaplama hızları (7–12 μm/saat) ve iyi yüzey düzgünlüğü sağlamaları nedeniyle hassas ve üniform kaplama gerektiren uygulamalarda tercih

edilmektedir. DMAB veya DEAB gibi aminoboran indirgeme ajanları, bor hidrür sistemlerine kıyasla daha stabil bir reaksiyon kinetiği sunmakta ve kaplama kalınlığının daha homojen şekilde artmasına olanak tanımaktadır. Bor hidrür esaslı banyolar (Banyo 3 ve 4) ise yüksek alkalin koşullarda (pH 10–14) çalışmakta olup, indirgeme ajanı olarak sodyum bor hidrür kullanılması nedeniyle daha agresif kimyasal ortamlara sahiptir. Düşük sıcaklıkta çalışan bor hidrür banyoları (Banyo 3, 25°C) enerji açısından avantaj sağlarken, yüksek pH nedeniyle banyo stabilitesi ve yüzey aktivasyonu daha kritik hâle gelmektedir. Buna karşılık, yüksek sıcaklıkta çalışan bor hidrür banyoları (Banyo 4, 95°C) daha yüksek kaplama hızları (15–20 µm/saat) sunarak üretkenliği artırmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, aminoboran banyoları daha iyi yüzey kalitesi ve proses kontrolü sağlarken, bor hidrür banyoları daha yüksek kaplama hızları ve bazı uygulamalarda daha sert kaplamalar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle banyo seçimi; hedeflenen kaplama hızı, yüzey kalitesi, enerji tüketimi ve kaplamanın nihai kullanım koşulları göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Tablo 2. Elektriksiz nikel kaplama banyolarının bileşimi ve tipik çalışma şartları

Bileşen ya da Şart	**Aminoboran Banyosu 1**	**Aminoboran Banyosu 2**	**Borohidrür Banyosu 3**	**Borohidrür Banyosu 4**
Bileşim				
Nikel klorür, g/L	30	24–48	–	20
Nikel sülfat, g/L	–	–	50	–
DMAB (Dimetilaminoboran), g/L	–	3–4.8	3	–
DEAB (Dietilaminoboran), g/L	3	–	–	–
İzopropanol, mL	50	–	–	–
Sodyum sitrat, g/L	10	–	–	–
Sodyum süksinat, g/L	20	–	–	–
Potasyum asetat, g/L	–	18–37	–	–
Sodyum pirofosfat, g/L	–	–	100	–
Sodyum borohidrit, g/L	–	–	–	0.4
Sodyum hidroksit, g/L	–	–	–	90
Etilen diamin (%98), g/L	–	–	–	90
Talyum sülfat, g/L	–	–	–	0.4
Çalışma Şartları				
pH	5–7	5.5	10	14
Sıcaklık, °C	65	70	25	95
Kaplama hızı, µm/saat	7–12	7–12	–	15–20

İndirgenme sırasında–bir alkali hidroksitin sabit ilavelerini gerektirdiği için–çözeltinin pH'I azalır. Banyonun pH'ı 12'nin altına düşerse, aynı anda çözelti çözünmesi (decomposition) meydana gelebilir. Yüksek çalışma pH'ından dolayı, bor hidrür kaplama banyoları alüminyum taban malzemeler için kullanılamaz (52,53). Hidrazin kullanılarak indirgenme yapılan banyolar,

kararsız ve kontrolü çok zordur. Oluşan kaplamada metalik görünüm yoktur. Kaplama gevrek ve düşük korozyon direncine sahiptir. Sertliği hipofosfit ve bor indirgeyicili banyolarda üretilen kaplamalarınki gibi, ısıl işlemle artmaz. Tüm bu sebeplerden dolayı hidrazin indirgeyici maddeler Elektriksiz nikel kaplama üretiminde çok az kullanıma sahiptir. Elektriksiz nikel kaplama işleminde sıcaklık çok önemli bir parametredir. Çünkü bir kaplama işleminde, sıcaklık enerji seviyesinin bir ölçüsüdür. Kaplama hızı sıcaklığa bağlı olarak değişir. Sıcaklığın artışıyla kaplama hızı da artar. Asit hipofosfit indirgeyici işlemlerde, 65°C'nin altındaki sıcaklıklarda kaplama hızı çok düşüktür. Çoğu çözelti için tercih edilen sıcaklık aralığı 85–95°C'dir (51).

Elektriksiz nikel kaplamaların kendiliğinden (bir anda) çözünmesini engellemek ve sadece tepkimenin katalitik yüzey üzerinde meydana gelecek şekilde olmasını ayarlamak için, bileşik yapıcı maddeler eklenir. Bu maddeler, organik asitler ya da onların tuzlarıdır. Bu maddeler, tepkimede serbest mevcut nikel miktarını ayarlamak için katılır. Böylece onlar, çözeltinin dengelenmesini ve nikel fosfitin çökelmesinin oluşumunu geciktirir (elektriksiz Ni-P kaplamalar için). Bileşik yapıcı maddeler, aynı zamanda kaplama çözeltisinde tampon (şiddet azaltıcı, sönümleyici) görevi yapar ve hidrojen iyonlarını indirgenme tepkimesi ile üretilecek kadar pH'ın çok hızlı bir şekilde düşmesini engeller. Fakat amonyak, hidroksitler ya da karbonatlar, hidrojeni periyodik olarak etkisizleştirmek (nötralize etmek) için de eklenebilirler. Ayrıca, kaplama çözeltisi içerinden kullanılan bileşik yapıcı element, kaplamanın kalitesi, iç gerilmesi ve gözenekliliği açısından önemli etkilere sahiptir. Bu çalışmada, bileşik yapıcı madde olarak etilen diamin (NH_2-CH_2-CH_2-NH_2) kullanılır.

Bileşik yapıcı maddeler, kaplama hızını azaltabilirler. Bunu ortadan kaldırmak için, genellikle çözelti içerisine hızlandırıcılar (accelerators) ya da coşturucu (exultants) denilen organik maddeler, az miktarda eklenirler. Hızlandırıcıların hidrojen ile fosfor arasındaki bağı zayıflatma görevi ifa ettiği düşünülmektedir (elektriksiz Ni-P kaplamalarda hipofosfit molekülü için). Bu nedenle, kolaylıkla kaldırılır ya da emilebilir. Hipofosfitle indirgenen çözeltilerde, süksinik asit hızlandırıcı olarak kullanılırken, diğer karbonik asit, çözünür floritler ve bazı çözücüler de kullanılabilmektedir.

Bir elektriksiz nikel kaplama banyosundaki indirgenme tepkimesi, uygun bir hızda taban malzeme kaplanacak seviyede ayarlanmalıdır. Bunu sağlamak için, dengeleyiciler (stabilizer) olarak da adlandırılan engelleyiciler katılır. Elektriksiz nikel kaplama çözeltileri, engelleyici maddeler olmadan saatler ya da günlerce çalışabilir. Çözünme genellikle çözelti içerisinde koloidal, katı çekirdeklerin olması halinde meydana gelir. Bu parçacıklar, yabancı maddeden (toz ya da püskürtme ortamı gibi) kaynaklanabilir ya da ortofosfitin konsantrasyonu, çözünürlük sınırını aştıkça ortaya çıkabilir. Kaynak her ne olursa olsun, büyük yüzey alanının sahip parçacıklar, kendiliğinde hızlanan zincir tepkimesine ve çözünmeye yol açarak indirgenmeyi hızlandırır (katalize eder). Bu genellikle, hidrojen gelişimini

artırılması ile önce meydana gelir ve çözeltiden ince dağılı siyah çökelti görünümündedir. Bu çökelti ise, nikel, nikel fosfit veya nikel borit olabilir.

Kendiliğinden çözünme, çözeltiye az miktarda katalitik engelleyicilerin eklenmesi ile kontrol edilebilir. Bu engelleyiciler, çözeltide mevcut koloidal parçacıkları üzerinde emilir ve yüzeyleri üzerindeki nikel indirgenmesini önler. Geleneksel olarak, hipofosfitle indirgenmiş elektriksiz nikel ile kullanılan engelleyiciler, üç türdür: (a) thiouorea gibi kükürt bileşikleri, (b) molibdat ya da iyodatlar gibi oksi anyonlar, (c) kurşun, bizmut, kalay ya da kadmiyum gibi ağır metaller. Daha sonraları, oleates ve doymuş asitler içeren organik bileşikler, bazı çözeltiler için kullanılmışlardır. Organik sülfit, thio bileşikleri, selenyum ve talyum gibi metaller, aminoboran ve bor hidrür indirgemeli elektriksiz nikel çözeltilerinde engelleyici olarak kullanılırlar (51).

Engelleyici maddelerin ilavesi, kaplama banyosu ve kaplama üzerinde faydalı etkilerin yanı sıra zararlı etkilere de yol açabilir. Düşük miktarlarda ilave edilen bazı engelleyiciler, kaplama hızını ve/veya kaplamanın (özellikle metal veya kükürt bileşikleri) parlaklığını, iç gerilmeyi ve gözenekliliği artırırken, kaplamanın sünekliliği, korozyon ve aşınma direncini azaltır (49,52).

Kaplamaların manyetik özellikleri

Kaplama teknolojileri, yüzeylere fonksiyonel özellikler kazandırmak amacıyla geliştirilen en önemli malzeme mühendisliği yaklaşımlarından biridir. Özellikle manyetik kaplamalar; manyetik depolama, sensörler, mikroelektronik, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama, enerji dönüşüm sistemleri ve mikrorobotik gibi ileri teknoloji uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır (54,55). Kaplamaların manyetik davranışı yalnızca kullanılan malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olmayıp, aynı zamanda mikroyapı, kristal yapı, tane boyutu, faz dağılımı, iç gerilmeler ve kaplama–taban malzeme arayüzünün doğası tarafından belirlenmektedir (56).

Manyetik kaplamalarda sertlik ve yumuşaklık kavramları, koersivite (H_c), doygunluk manyetizasyonu (M_s) ve remanans (M_r) gibi temel parametrelerle tanımlanır. Yumuşak manyetik kaplamalar düşük koersivite ve yüksek manyetik geçirgenlik sunarak sensörler ve manyetik çekirdek uygulamaları için tercih edilirken; sert manyetik kaplamalar yüksek koersivite ve remanans değerleri sayesinde kalıcı mıknatıs ve manyetik kayıt ortamlarında kullanılmaktadır (57–59). Kaplama süreçleri sırasında oluşan nanokristalin veya amorf yapılar, domain duvarı hareketini ve spin hizalanmasını doğrudan etkileyerek manyetik yumuşama veya sertleşme davranışına yol açabilmektedir (60).

Kaplamaların mikroyapısal evrimi, üretim tekniği ve işlem parametreleriyle yakından ilişkilidir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), termal sprey ve çözelti bazlı kaplama

yöntemleri; farklı kristal tekstürler, tane boyutları ve iç gerilme durumları oluşturarak manyetik anizotropinin yönünü ve şiddetini belirleyebilmektedir (61,62). Özellikle çok katmanlı kaplamalar ve çekirdek–kabuk mimarileri, sert ve yumuşak manyetik fazların birlikte tasarlanmasına olanak tanıyarak değişim etkileşimi (exchange coupling) mekanizması üzerinden üstün manyetik performanslar elde edilmesini mümkün kılmıştır (55,63).

Isıl işlemler, manyetik kaplamalarda faz dönüşümleri ve tane büyümesi yoluyla manyetik özelliklerin ayarlanmasında temel araçlardan biridir. Kontrollü ısıl işlemler sayesinde amorf yapıdan nanokristalin fazlara geçiş sağlanabilirken, tane büyümesi (100 nm-10 μm) durumunda koersivite artışı (5 kA/m'ye kadar) (64) ve manyetik yumuşaklığın kaybı gözlenebilmektedir (56,60). Bu olumlu etki, yalnızca ilk kristalleşme evresi ile sınırlı olup, nanokristalin ferromanyetik fazların (örneğin fcc-Ni) oluşumuna karşılık gelmektedir. Isıl işlem sıcaklığının daha da artırılmasıyla birlikte tane kabaşması ve manyetik olmayan veya zayıf manyetik intermetalik fazların baskın hâle gelmesi, yumuşak manyetik özelliklerin bozulmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve arayüz süreksizlikleri domain yapısını etkileyerek manyetik kayıplar ve anizotropi üzerinde önemli rol oynamaktadır (57).

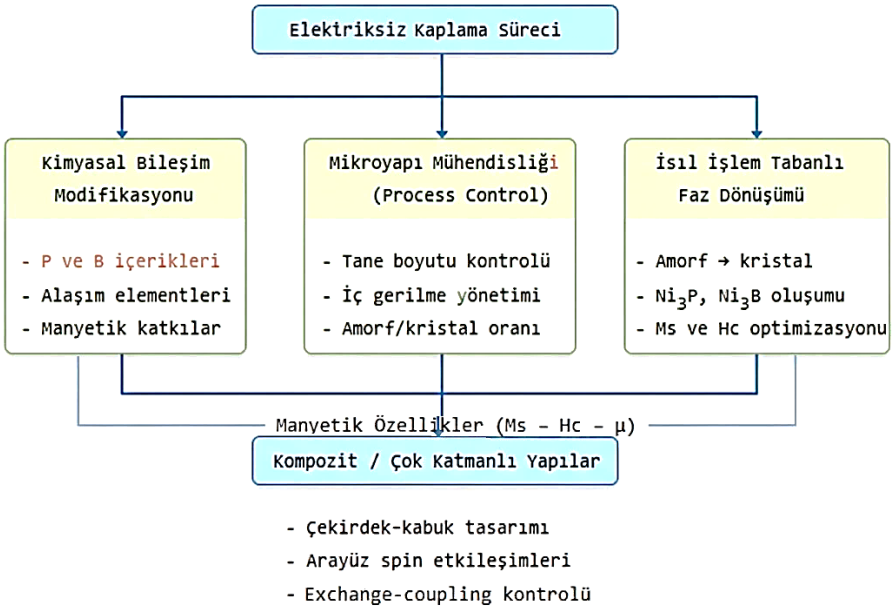
Son yıllarda manyetik kaplamalar, yalnızca tek fonksiyonlu yüzeyler olmaktan çıkarak çok işlevli sistemlere dönüşmüştür. Manyetik–mekanik, manyetik–elektriksel ve manyetik–korozyon dirençli hibrit kaplamalar, akıllı malzeme tasarımının önemli bir parçası hâline gelmiştir (65). Bu bağlamda kaplamalar, manyetik özelliklerin kimyasal bileşim, mikroyapı, faz mimarisi ve proses parametreleri üzerinden hassas biçimde kontrol edilebildiği bütünleşik bir mühendislik platformu sunmaktadır.

Elektriksiz Kaplamalarda Manyetik Özellik Modifikasyonunun Yöntemsel Sınıflandırılması

Elektriksiz kaplamalarda manyetik özelliklerin optimizasyonu, temelde kimyasal bileşimin ayarlanması, mikroyapı mühendisliği, ısıl işlemle faz dönüşümlerinin yönetilmesi ve çok katmanlı–kompozit yapılarda arayüz etkileşimlerinin tasarlanması üzerine kurulu çok boyutlu bir süreçtir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde bu modifikasyon stratejilerinin dört ana kategori altında toplandığı görülmektedir: *kimyasal bileşim modifikasyonu, mikroyapı mühendisliği, ısıl işlem ve faz dönüşümü tabanlı kontrol ve kompozit/çok katmanlı yapı tasarımı* (Şekil 2*)*.

Kimyasal Bileşim Modifikasyonu, Ni-P ve Ni-B kaplamalarında fosfor ve bor içeriklerinin ayarlanmasıyla manyetik yumuşaklık, doygunluk manyetizasyonu ve koersivite değerlerinin kontrol edildiği en doğrudan stratejidir. Yani bu yaklaşımda amaç, manyetik etkiyi iyileştirmek için kaplamanın P, B, Co, Fe, Zn, Re, Mo, W gibi elementlerle zenginleştirilmesidir. Ni-P kaplamalarda P oranına bağlı olarak amorfluğun

arttığı, manyetizasyonun düştüğü ve koersivitenin azaldığı ve kayıt ortamları için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Şöyle ki yüksek fosfor içerikli amorf Ni-P kaplamaların manyetik yumuşaklığı artırdığı; bor oranı yüksek Ni-B kaplamaların ise daha güçlü manyetik moment sağladığı ancak artan iç gerilme nedeniyle koersiviteyi yükseltebildiği ve kontrollü kristalleşme ile yumuşak manyetik özelliğin optimize edilebileceği rapor edilmiştir (1–6,12). Ancak yüksek doygunluk mıknatıslanması, her durumda yumuşak manyetik davranış anlamına gelmemektedir. Ni–B sistemlerinde artan iç gerilmeler ve yapısal düzensizlikler, domain duvarı hareketini sınırlandırarak koersivitenin yükselmesine neden olabilmektedir. Ayrıca Fe, Co, Cu, Zn gibi alaşım elementlerinin kontrollü ilavesi—özellikle Fe-Ni-P ya da Co-Zn-P sistemlerinde—doygunluk manyetizasyonunu ve remanansı belirgin biçimde değiştirmektedir. CoP, CoNiP, CoNiFeB gibi sistemler yüksek H_c ve yüksek (manyetik akı yoğunluğu) B_s özellikleriyle manyetik kafa ve sensör teknolojilerinde kullanılabilmektedir. Mo, W, Re ve Zn alaşım elementleri kullanılarak elde edilen direnç filmleri, difüzyon bariyerleri ve yüksek termal stabilite için kullanılmakta ve manyetik davranış değiştirilebilmektedir (3,10,27).



Şekil 2. Elektriksiz Kaplamalarda Manyetik Özellik Modifikasyonunun Yöntemsel Sınıflandırılması

Mikroyapı mühendisliği, tane boyutunun, kristallik oranının, iç gerilmenin ve arayüz keskinliğinin kontrol edildiği ikinci büyük stratejiyi oluşturur. Amorf yapının domain duvarı hareketini kolaylaştırması nedeniyle koersiviteyi düşürdüğü, buna karşılık kristalleşmenin manyetizasyonu

artırdığı bilinmektedir (7,8). Ajitasyon türü, banyo sıcaklığı, pH ve indirgeme ajanı konsantrasyonu gibi işlem parametreleri mikroyapısal düzeni belirleyerek manyetik davranış üzerinde dolaylı fakat güçlü etkiler yaratır (13,20–23). Bu ilişkiyi özetleyen Tablo 3, farklı işlem parametrelerinin amorfluk oranı, tane büyüklüğü ve iç gerilme gibi mikroyapısal göstergeler üzerinde nasıl bir eğilim oluşturduğunu ve bunun manyetik parametrelere nasıl yansıdığını sistematik bir şekilde sunar. Bu tablo, özellikle proses tasarımı yapan araştırmacılara hangi değişkenin hangi manyetik çıktıyı kontrol ettiğini hızlı bir biçimde görme imkânı sağlar.

Tablo 3. Elektriksiz Kaplama Süreç Parametrelerinin Mikroyapı ve Manyetik Özelliklere Etkisi

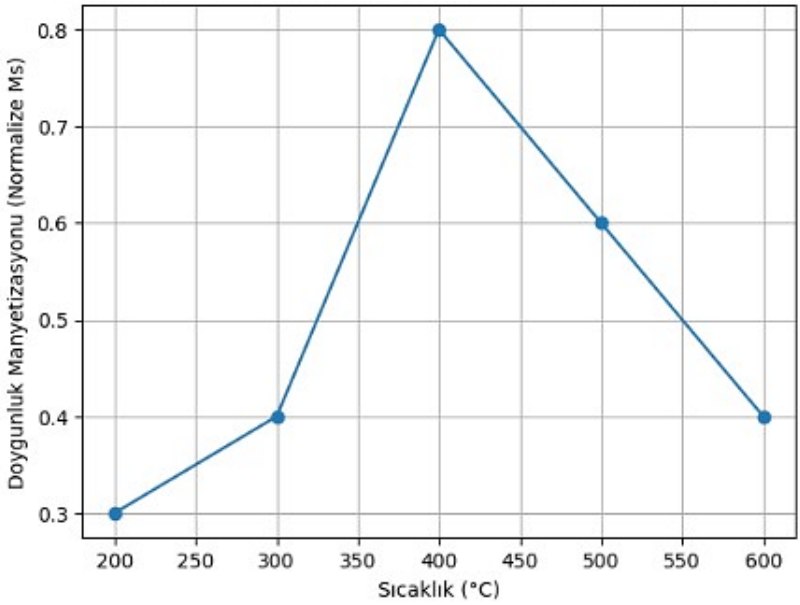
Süreç Parametresi	Mikroyapısal Etki	Manyetik Etki	Açıklama
Banyo sıcaklığı artışı	Kristalleşme eğilimi ↑, tane boyutu ↑	Ms ↑, Hc ↔ veya ↑	Yüksek sıcaklık kristal düzeni artırır; manyetizasyon yükselir ancak iç gerilme artışı koersiviteyi etkileyebilir.
pH artışı	Amorf yapı eğilimi ↓, tane boyutu ↑	Ms ↑, Hc ↑	Yüksek pH kristalleşmeyi teşvik eder; yüksek kristallik hem Ms'yi hem Hc'yi artırabilir.
İndirgeyici ajan ($NaBH_4$, $H_2PO_2^-$) konsantrasyonu artışı	Amorf yapı ↑, iç gerilme ↑	Ms ↓, Hc ↓	Fazla indirgeme ajanı atomik düzensizliği artırarak yumuşak manyetik davranışı güçlendirir.
Ajitasyon (karıştırma) hızı artışı	Tane boyutu ↓, homojenlik ↑	Hc ↓, Ms ↔	İnce taneli yapı domain duvarı hareketini kolaylaştırır; koersivite düşer.
Bekletme/yaşlanma (aging)	Amorf → yarı kristal dönüşümü	Ms ↑, Hc ↑	Hem fosforlu hem borlu kaplamalarda zamanla kısmi kristalleşme gözlenir.
Manyetik alan altında kaplama	Yığın yönlenme (texturing) ↑	Anizotropi ↑	Kaplama sırasında alan uygulanması tek eksenli manyetik doku oluşturur.
Kaplama hızı artışı	Tane boyutu ↑, kusur oranı ↑	Ms ↔, Hc ↑	Çok hızlı çökelme kusur ve gerilme artırabilir; koersivite yükselir.

Not: "↑" artış, "↓" azalış, "↔" nötr/kararsız etkiyi temsil eder.

Üçüncü yöntemsel kategori olan ısıl işlem temelli faz dönüşümü, Ni-P ve Ni-B kaplamalarda amorf yapıdan kristalin fazlara geçişi yöneterek manyetik etkiyi optimize etmeye dayanır. 300–400 °C aralığında başlayan kristalleşme ile manyetik moment artarken, 500–600 °C aralığında oluşan Ni_3P veya Ni_3B gibi ara fazların hem koersiviteyi düşürdüğü hem de yumuşak manyetik özellikleri güçlendirdiği çok sayıda çalışma ile desteklenmiştir (7,8,12,16). Bu dönüşüm dinamiğini görselleştiren Şekil 3, elektriksiz Ni–P ve Ni–B esaslı kaplamalarda ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak doygunluk manyetizasyonunun (M_s) nitel değişimini şematik olarak göstermektedir.

Düşük sıcaklıklarda (≈200–300 °C), kaplama yapısı büyük oranda amorf karakterdedir. Bu sıcaklık aralığında atomik düzenin zayıf olması, uzun menzilli manyetik düzenin gelişmesini sınırlandırmakta; buna bağlı olarak doygunluk manyetizasyonu ve koersivite (H_c) düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu davranış, özellikle yüksek fosfor veya bor içeriğine sahip elektriksiz kaplamalar için literatürde yaygın olarak rapor edilen bir özelliktir.

Isıl işlem sıcaklığının 300–450 °C aralığına yükselmesiyle birlikte amorf matris içerisinde kristallenme başlamakta ve fcc-Ni nanokristallerinin oluşumu gözlenmektedir. Bu kristal çekirdekler, manyetik domainlerin daha etkin biçimde organize olmasına imkân tanıyarak doygunluk manyetizasyonunda belirgin bir artışa yol açmaktadır. Bu sıcaklık aralığı, genellikle düşük koersivite ile birlikte yüksek manyetik geçirgenliğin elde edilebildiği ve kaplamaların yumuşak manyetik karakter sergilediği optimum performans bölgesi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3. Isıl İşlem Sıcaklığına Bağlı Manyetizasyon Evrimi

Daha yüksek sıcaklıklarda (≈450–600 °C) ise Ni_3P veya Ni_3B gibi intermetalik fazların oluşumu belirgin hâle gelmektedir. Bu fazlar, ferromanyetik Ni matrisi içerisinde domain duvarı hareketini kısıtlayan sert bölgeler oluşturarak manyetik etkileşimleri sınırlandırmaktadır. Sonuç olarak, ferromanyetik faz oranındaki azalmanın etkisiyle doygunluk manyetizasyonunda yeniden bir düşüş gözlenmektedir. Bu sıcaklık aralığında kaplama davranışı, yüksek manyetik momentten ziyade faz hâkimiyeti ve yapısal stabilite ile tanımlanmaktadır.

Genel olarak Şekil 3'te sunulan eğilim, elektriksiz kaplamalarda manyetik özelliklerin yalnızca kimyasal bileşime değil; ısıl işlemle geliştirilen faz dönüşümleri, kristallenme derecesi ve mikroyapısal evrime güçlü biçimde bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle manyetik uygulamalar için elektriksiz kaplama tasarımında, hedeflenen optimum $M_s - H_c$ ikilisi için uygun ısıl işlem sıcaklığının seçilmesi kritik öneme sahiptir.

Yukarıda tartışılan ısıl işlem sıcaklığına bağlı manyetik davranış değişimleri, elektriksiz Ni esaslı kaplamalarda gerçekleşen faz dönüşümleriyle doğrudan ilişkilidir. Amorf yapıdan nanokristalin ve intermetalik fazlara doğru ilerleyen bu dönüşüm süreci, doygunluk manyetizasyonu ve koersivite üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu ilişkiyi açık biçimde ortaya koymak amacıyla, farklı elektriksiz sistemlerde ısıl işlem sıcaklığına bağlı oluşan fazlar ve buna eşlik eden manyetik yanıtlar Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Elektriksiz Ni–P ve Ni–B Esaslı Kaplamalarda Isıl İşlemle Oluşan Faz Dönüşümleri ve Manyetik Yanıt

Sistem	Isıl İşlem Sıcaklığı (°C)	Oluşan Baskın Fazlar	Manyetik Yanıt	Ref.
Ni–P	300–400	fcc-Ni + erken Ni_3P çökelmesi	Ms ↑, Hc ↓ (yumuşak manyetik davranış başlar)	(7,8)
Ni–P	500–600	fcc-Ni + belirgin Ni_3P	Optimum manyetik yumuşaklık, yüksek Ms	(7,8,16)
Ni–P (yüksek T)	>600	Tane büyümesi, faz kabaşması	Ms ↓, manyetik sertleşme	(12)
Ni–B	400–500	fcc-Ni + Ni_3B	Manyetik yumuşama, Ms ↑	(12)
Ni–B (yüksek T, Cu taban malzeme)	>500	$Cu_{3.8}Ni$ oluşumu	Manyetik bozulma, Ms ↓	(12)

Not: "↑" artış, "↓" azalış, "↔" nötr/kararsız etkiyi temsil eder.

Son büyük strateji grubu, kompozit ve çok katmanlı yapılar aracılığıyla manyetik özelliklerin daha karmaşık ve tasarlanabilir hâle getirildiği sistemlerdir. Bu yaklaşımda manyetik davranış, yalnızca kaplamanın kimyasal bileşimiyle değil; çekirdek–kabuk mimarisi, arayüz bağlanma mekanizması ve difüzyon derecesi gibi çoklu etkileşimlerin birlikte tasarlanmasıyla kontrol edilmektedir. Literatürde rapor edilen çalışmalar arayüzde oluşan spin hizalanması ve exchange coupling etkilerinin, doygunluk manyetizasyonu (M_s), remanans ve koersivite (H_c) üzerinde belirleyici rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Tablo 5, farklı elektriksiz kompozit ve çok katmanlı sistemlerde çekirdek–kabuk arayüzünün manyetik özellikler üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak sunarak bu karmaşık ilişkileri bütüncül bir çerçeveye oturtmaktadır. Örneğin $SmCo_5$/FeCo çekirdek–kabuk yapısında, sert manyetik $SmCo_5$ çekirdeği ile yumuşak manyetik FeCo kabuğu arasında

oluşan güçlü exchange coupling, yüksek remanans ve artırılmış enerji çarpımı ile sonuçlanmaktadır (9). Bu durum, arayüzdeki manyetik sert–yumuşak faz etkileşiminin, tek başına faz özelliklerinden daha etkili bir manyetik performans sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Co–Zn–P kaplamalı karbon lif sistemlerinde (10), paramanyetik karbon lif çekirdeği ile amorf Co–Zn–P matris arasındaki arayüz bağlanma enerjisinin artması, doygunluk manyetizasyonunu yükseltirken koersiviteyi önemli ölçüde değiştirmemektedir. Bu bulgu, arayüz mühendisliği sayesinde manyetik yumuşaklığın korunurken M_s değerinin artırılabileceğini ortaya koymakta ve özellikle EMI kalkanlama ve hafif kompozit uygulamaları açısından dikkat çekici bir avantaj sunmaktadır.

Ni-P/SiC kompozitlerinde ise SiC parçacıklarının manyetik olmayan bir güçlendirici olarak Ni-P matris içinde homojen biçimde dağılması, mekanik kilitlenmeyi ve dispersiyonu artırmakta; bunun sonucunda iç gerilmeler azalmakta ve koersivite düşmektedir (13). Tablo 5'te özetlenen bu eğilim, kompozit yapılarda mekanik–manyetik özellikler arasında doğrudan bir bağ kurulduğunu ve mikroyapısal homojenliğin yumuşak manyetik davranışı desteklediğini göstermektedir. Buna karşılık Ni-B/Mg sisteminde (19) Mg çekirdeği ile Ni-B kaplama arasındaki sınırlı difüzyonlu arayüz, doygunluk manyetizasyonunu artırmasına rağmen koersivitenin de yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum, difüzyon kontrollü arayüzlerin her zaman istenen yumuşak manyetik özellikleri sağlamadığını; tersine, iç gerilme ve kristalleşme eğilimlerinin koersiviteyi artırabileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Daha ileri düzeyde bir tasarım yaklaşımı ise PDA–Ag–Ni (15) çok katmanlı mikrokaplamalarda görülmektedir. Burada çoklu arayüzlerin varlığı, birden fazla spin hizalanma mekanizmasını aynı yapıda mümkün kılmakta ve sonuçta hassas yönlendirilmiş manyetik anizotropi elde edilmektedir.

Tablo 5'te özetlenen bu sistem, elektriksiz kaplamaların yalnızca makroskobik manyetik bileşenler için değil; mikrorobotik ve yönlendirilebilir mikro-sistemler gibi ileri fonksiyonel uygulamalar için de güçlü bir platform sunduğunu göstermektedir. Genel olarak Tablo 5'in sunduğu karşılaştırmalı analiz, kompozit ve çekirdek–kabuk yapılarda "hangi çekirdek + hangi kabuk + hangi arayüz etkileşimi" kombinasyonunun belirli bir manyetik çıktıyı kontrol ettiğini net biçimde ortaya koymaktadır. Bu tablo, araştırmacıların malzeme seçimini deneme-yanılma yaklaşımından çıkararak, hedeflenen manyetik özelliklere göre rasyonel bir tasarım yapmasına olanak tanıyan bütünleştirici bir yol haritası sunmaktadır. Böylece elektriksiz kaplamalar, basit bir yüzey modifikasyon yöntemi olmaktan çıkarak, arayüz mühendisliği temelli çok fonksiyonlu manyetik sistemlerin tasarım aracına dönüşmektedir.

Tablo 5. Elektriksiz Kompozit ve Çok Katmanlı Kaplamalarda Çekirdek–Kabuk Arayüzünün Manyetik Özelliklere Etkisi

Sistem	Çekirdek	Kabuk / Matris	Ana Arayüz Etkileşimi	Manyetik Davranış Çıktısı
$SmCo_5$/FeCo (9)	Sert manyetik $SmCo_5$	Yumuşak manyetik FeCo	Exchange coupling ↑	Yüksek remanans, artırılmış (BH)max
Co–Zn–P / Karbon Lif (10)	Paramanyetik C-fiber	Co–Zn–P amorf matris	Arayüz bağlanma enerjisi ↑	Ms ↑, Hc ↔
Ni-P / SiC (13)	SiC güçlendirici	Ni-P matris	Mekanik kilitlenme ↑, dispersiyon ↑	Daha düşük Hc, artan yumuşak manyetizma
Ni-B / Mg (19)	Mg gövde	Ni-B kaplama	Difüzyon sınırlı arayüz	Ms ↑ fakat Hc de ↑
PDA–Ag–Ni Mikrokaplama (15)	3D polimer mikro yapı	Ag–Ni çok katmanlı	Çoklu arayüz → çoklu spin hizalanması	Hassas yönlendirilmiş anizotropi; mikrorobotikte kullanılabilir
Fe–Ni–P alaşımları (8)	Fe zengin çekirdek	Ni–P amorf faz	Kısmi difüzyon	Ms ↑, remanans ↑
Not: "↑" artış, "↓" azalış, "↔" nötr/kararsız etkiyi temsil eder.				

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu derleme çalışması, elektriksiz (akımsız) kaplamaların manyetik özelliklerin modifikasyonu açısından yalnızca ikincil bir yüzey işlemi değil; kimyasal bileşim, mikroyapı, faz mimarisi ve arayüz etkileşimlerinin birlikte tasarlandığı bütünleşik bir malzeme mühendisliği platformu olduğunu açık biçimde ortaya koymuştur. Literatürdeki bulgular, Ni–P ve Ni–B esaslı kaplamalarda fosfor ve bor içeriğinin amorfluk derecesini ve dolayısıyla manyetik yumuşaklık–sertlik dengesini doğrudan belirlediğini; uygun ısıl işlem stratejileriyle bu dengenin hedeflenen uygulamaya göre hassas biçimde ayarlanabildiğini göstermektedir. Literatürde rapor edilen farklı manyetik eğilimler, gerçek bir çelişkiden ziyade elektriksiz kaplama süreçlerinin banyo kimyası, biriktirme kinetiği ve ısıl işlem koşullarına yüksek duyarlılık göstermesinin doğal bir sonucudur.

Mikroyapı mühendisliği ve proses parametrelerinin (pH, sıcaklık, indirgeme ajanı konsantrasyonu, ajitasyon ve banyo yaşlanması) manyetik domain davranışı üzerinde dolaylı fakat güçlü etkiler yarattığı; özellikle tane boyutu ve iç gerilme kontrolünün koersiviteyi belirleyen kritik faktörler

olduğu vurgulanmıştır. Manyetik alan destekli elektriksiz kaplama yaklaşımları ise yalnızca kaplama kinetiğini değil, aynı zamanda kristal yönlenme ve manyetik anizotropiyi yönlendirebilme potansiyeli ile yönteme yeni bir fonksiyonel boyut kazandırmaktadır.

Kompozit ve çok katmanlı sistemlerde çekirdek–kabuk arayüzlerinin tasarlanması, exchange coupling ve spin hizalanması gibi mekanizmalar üzerinden manyetik özelliklerin daha ileri düzeyde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Sert–yumuşak manyetik fazların birlikte kullanıldığı bu yapılar, yüksek remanans, ayarlanabilir koersivite ve yönlendirilmiş anizotropi gibi üstün manyetik performanslar sunarak sensörler, EMI kalkanlama, mikroelektronik ve mikrorobotik uygulamalar için önemli fırsatlar yaratmaktadır.

Bu çalışmanın özgün değeri, elektriksiz kaplamalarda manyetik özellik modifikasyonunu tekil parametreler üzerinden değil; kimyasal bileşim, mikroyapı, ısıl işlem, manyetik alan uygulaması ve arayüz mühendisliğini kapsayan çok boyutlu ve yöntemsel bir sınıflandırma çerçevesinde ele almasıdır. Sunulan tablolar ve şematik değerlendirmeler, literatürde rapor edilen sonuçları karşılaştırmalı ve bütünleşik bir biçimde yorumlayarak, araştırmacıların hedeflenen manyetik özelliklere göre rasyonel kaplama tasarımı yapabilmesine imkân tanımaktadır. Bu yönüyle derleme, gelecekte geliştirilecek manyetik olarak fonksiyonelleştirilmiş elektriksiz kaplamalar için hem temel bir referans hem de stratejik bir yol haritası niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. Hou JY, Gao HJ. Influence of magnetic field on the mass transfer of Ni–P-diamond electroless composite plating and deposit properties. Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2016;94(6).
2. Chia-Chien L, Chou TC. Effects of magnetic field on the reaction kinetics of electroless nickel deposition. Electrochim Acta. 1995;40(8).
3. Balela MDL, Yagi S, Matsubara E. Fabrication of Cobalt Nanowires by Electroless Deposition under External Magnetic Field. J Electrochem Soc. 2011;158(4):D210.
4. Yokoshima T, Kaneko D, Akahori M, Nam HS, Osaka T. Electroless CoNiFeB soft magnetic thin films with high corrosion resistance. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2000;491(1–2).
5. Hsu RC, Tsai HY. Influence of pretreatments and magnetic field application during electroless plating on the structure and mechanical properties of amorphous Ni-P coatings. Thin Solid Films. 2025;818.

6. Tarozaite R, Kurtinaitiene M, Džiuve A, Jusys Z. Composition, microstructure and magnetic properties of electroless-plated thin Co-P films. Surf Coat Technol. 1999;115(1).
7. Kim SD, Choe WG, Jeong JR. Environmentally friendly electroless plating for Ag/TiO2-coated core–shell magnetic particles using ultrasonic treatment. Ultrason Sonochem. 2013 Nov;20(6):1456–62.
8. Kołczyk-Siedlecka K, Kutyła D, Skibińska K, Jędraczka A, Żabiński P. Catalytic Properties of Electroless Nickel-Based Coatings Modified by the Magnetic Field. Archives of Metallurgy and Materials. 2024 Apr 8;17–24.
9. Poudyal N, Gandha K, Elkins K, Liu JP. Anisotropic SmCo5/FeCo core/shell nanocomposite chips prepared via electroless coating. AIMS Mater Sci. 2015;2(3).
10. Su X, Qiang C. Electroless plating and magnetic properties of Co-Zn-P coating on short carbon fibres. Bulletin of Materials Science. 2012;35(7).
11. Danilova S, Graves JE, Sort J, Pellicer E, Cave GWV, Cobley A. Electroless copper plating obtained by Selective Metallisation using a Magnetic Field (SMMF). Electrochim Acta. 2021 Sep;389:138763.
12. Saito T, Sato E, Matsuoka M, Iwakura C. Effect of heat-treatment on magnetic properties of electroless Ni-B films. Plating and Surface Finishing. 1999;86(2).
13. KALANTARY MR, HOLBROOK KA, WELLS PB. Effects of agitation on conventional electroless plating : implications for production of Ni-P composite coatings. Plating and surface finishing. 1992;79(8).
14. Bulbul F. The effects of deposition parameters on surface morphology and crystallographic orientation of electroless Ni-B coatings. Metals and Materials International. 2011 Feb 26;17(1):67–75.
15. Zhang S, Harms CF, Zhang Z, Lim J, Heron JT, Kim J, et al. Polydopamine-Assisted Electroless Deposition of Magnetic Functional Coatings for 3D-Printed Microrobots. Advanced Intelligent Systems. 2025 Jun 30;7(6).
16. Fléchon J, Karbal S, Machizaud F, du Trémolet de Lacheisserie E. Magnetization of an electroless deposited nickel-phosphorus alloy. Journal de Physique. 1985;46(8):1405–9.
17. Balela MDL, Yagi S, Matsubara E. Electroless Deposition of Cobalt Nanowires in an Aqueous Solution under External Magnetic Field. Electrochemical and Solid-State Letters. 2011;14(6):D68.
18. Danilova S, Graves JE, Cobley AJ. Selective electroless metallization of non-conductive substrates enabled by a Fe3O4/Ag catalyst and a gradient magnetic field. Mater Lett. 2018 May;219:170–3.
19. Bello S, Aguirre Ocampo R, Arias Velandia J, Zuleta Gil A, Correa E, Silva W, et al. Electroless Nickel Plating of Magnesium Particles for Hydrogen Storage. Applied Nano. 2025 Aug 20;6(3):16.
20. Gegechkori T, Mamniashvili G, Zedginidze T, Petriashvili T. Electroless Synthesis of Cobalt Nanowires in Magnetic Field and their Characterization by Resonant Magnetometry Methods. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2024 Dec 2;14(6):18805–9.
21. Skibińska K, Elsharkawy S, Kołczyk-Siedlecka K, Kutyła D, Żabiński P. Influence of the Applied External Magnetic Field on the Deposition of Ni–Cu Alloys. Metals (Basel). 2024 Feb 28;14(3):281.

22. Wang L, Shi C, Wang L. Fabrication of magnetic and EMI shielding wood-based composite by electroless Ni-Fe-P plating process. Bioresources. 2015;10(1).
23. Barrera G, Scaglione F, Celegato F, Coïsson M, Tiberto P, Rizzi P. Electroless Cobalt Deposition on Dealloyed Nanoporous Gold Substrate: A Versatile Technique to Control Morphological and Magnetic Properties. Nanomaterials. 2023 Jan 26;13(3):494.
24. Kalu EE. Aging effects of electroless cobalt bath on microstructure & magnetic properties of Co-P films. Plating and Surface Finishing. 1998;85(3).
25. Minamida D, Okada S, Hashizume M, Sasaki Y, Kikuchi J ichi, Hosoito N, et al. Creation of magnetic cerasomes through electroless plating and their manipulation using external magnetic fields. J Solgel Sci Technol. 2008 Nov 16;48(1–2):95–101.
26. Guo H, Wu Y, Lu D, Fujimoto M, Nomura M. Ultrafine Polishing of Electroless Nickel–Phosphorus-Plated Mold with Magnetic Compound Fluid Slurry. Materials and Manufacturing Processes. 2014 Dec 2;29(11–12):1502–9.
27. Jappes JTW, Brintha NC, Khan MA. Effect of Magnetic Field, Heat Treatment and Dry Wear Analysis on Electroless Nickel Deposits. J Bio Tribocorros. 2021 Mar 2;7(1):20.
28. Jiang L, Pan S, Lu J, Ke X, He W, Yu Y, et al. Magnetic performance and corrosion resistance of electroless plating CoWP film. Rare Metals. 2012 Jun 17;31(3):264–71.
29. Singh S, Kumar S, Khanna V. A review on surface modification techniques. Mater Today Proc. 2023 Jan;
30. Omarov S, Nauryz N, Talamona D, Perveen A. Surface Modification Techniques for Metallic Biomedical Alloys: A Concise Review. Metals (Basel). 2022 Dec 28;13(1):82.
31. El-Awadi GA. Review of effective techniques for surface engineering material modification for a variety of applications. AIMS Mater Sci. 2023;10(4):652–92.
32. Ferhat Bülbül. Darbeli DC güç kaynağı kullanılarak CFUBMSIP ile Büyütülmüş MoS2-Ti Kompozit Filmlerin Yapısal Tribolojik ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi. Atatürk Üniversitesi; 2002.
33. ZHANG H, ZOU J, LIN N, TANG B. Review on Electroless Plating Ni–P Coatings for Improving Surface Performance of Steel. Surface Review and Letters. 2014 Aug 6;21(04):1430002.
34. BREMNER JGM. Nickel Plating by Chemical Reduction. Nature. 1948 Jul;162(4109):183–4.
35. Kang C, Lu H, Yuan S, Hong D, Yan K, Liang B. Superhydrophilicity/superhydrophobicity of nickel micro-arrays fabricated by electroless deposition on an etched porous aluminum template. Chemical Engineering Journal. 2012 Sep;203:1–8.
36. Muraliraja R, Anthoni Sagaya Selvan R, Selvakumar A, Franco M, Tamilarasan TR, Sanjith U, et al. A review of electroless coatings on non-metals: Bath conditions, properties and applications. J Alloys Compd. 2023 Oct;960:170723.

37. Sudagar J, Lian J, Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review. J Alloys Compd. 2013 Sep;571:183–204.
38. Pancrecious JK, Ulaeto SB, Ramya R, Rajan TPD, Pai BC. Metallic composite coatings by electroless technique – a critical review. International Materials Reviews. 2018 Nov 17;63(8):488–512.
39. Huang Y, Shi K, Liao Z, Wang Y, Wang L, Zhu F. Studies of electroless Ni–Co–P ternary alloy on glass fibers. Mater Lett. 2007 Apr;61(8–9):1742–6.
40. Zhou G hong, Ding H yan, Zhou F, Zhang Y. Structure and Mechanical Properties of Ni-P-Nano Al2 O3 Composite Coatings Synthesized by Electroless Plating. Journal of Iron and Steel Research International. 2008 Jan 1;15(1):65–9.
41. Fayyad EM, Abdullah AM, Hassan MK, Mohamed AM, Jarjoura G, Farhat Z. Recent advances in electroless-plated Ni-P and its composites for erosion and corrosion applications: a review. Emergent Mater. 2018 Jun 15;1(1–2):3–24.
42. Gadhari P, Sahoo P. Electroless Nickel-Phosphorus Composite Coatings. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering. 2016 Jan 1;6(1):14–50.
43. Jen Fin Lin, Jeng Chang Lian, Ke Yang Li. The effect of electroless nickel film on the tribological characteristics of alumina coatings. Wear. 1997 Aug;209(1–2):199–212.
44. Ebrahimian-Hosseinabadi M, Azari-Dorcheh K, Moonir Vaghefi SM. Wear behavior of electroless Ni–P–B4C composite coatings. Wear. 2006 Jan;260(1–2):123–7.
45. Araghi A, Paydar MH. Electroless deposition of Ni–W–P–B4C nanocomposite coating on AZ91D magnesium alloy and investigation on its properties. Vacuum. 2013 Mar;89:67–70.
46. Winowlin Jappes JT, Ramamoorthy B, Kesavan Nair P. Novel approaches on the study of wear performance of electroless Ni–P/diamond composite deposites. J Mater Process Technol. 2009 Jan;209(2):1004–10.
47. Mazaheri Tehrani H, Shoja-Razavi R, Erfanmanesh M, Hashemi SH, Barekat M. Evaluation of the mechanical properties of WC-Ni composite coating on an AISI 321 steel substrate. Opt Laser Technol. 2020 Jul;127:106138.
48. Riedel W. Electroless nickel plating. Metal Finishing. 2003 Mar;101(3):34.
49. Mallory GO and HJB. Electroless Plating : Fundamentals And Applications, Rolf Weil and Konrad Parker, “The Properties of Electroless Nickel,” in Electroless Plating: Fundamentals and Applications, eds., Mallory, G. O. and Hajdu, J. B., American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1991. [Internet]. Mallory GO and HJB, editor. Vol. 3, International Business. 1990 [cited 2023 Feb 16]. Available from: https://www.scribd.com/document/457545080/ELECTROLESS-NICKEL-PLATING-Glenn-O-Mallory-Juan-B-Hajdu-pdf#
50. Baudrand DW. Electroless Nickel Plating. In: Surface Engineering. The Netherlands: ASM International; 1994. p. 290–310.
51. Cotell CM. ASM Handbook: Surface Engineering (Vol 5) Surface Engineering. Tribol Int. 1994;33(1).
52. Gawrilov G. Chemical Nickel Coating Today-3right bracket.. Metalloberflaeche. 1972;26(4).
53. Gorbunova KM, Nikiforova AA, Myers HS. Physicochemical Principles of Nickel Plating. J Electrochem Soc. 1963;110(12).

54. O'HANDLEY RC. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. Vol. 13, Physics Bulletin. 2000.
55. Coey JMD. Magnetism and magnetic materials. Vol. 9780521816144, Magnetism and Magnetic Materials. 2010.
56. Cullity BD, Graham CD. Introduction to Magnetic Materials. Introduction to Magnetic Materials. 2008.
57. Bogdanov AN. Magnetic Domains. The Analysis of Magnetic Microstructures. Low Temperature Physics. 1999;25(2).
58. Özden MG, Freeman FS, Morley NA. Soft-Magnetic Behavior of Fe-Based Nanocrystalline Alloys Produced Using Laser Powder Bed Fusion. Adv Eng Mater. 2023 Oct 26;25(19).
59. Özden MG, Morley NA. Optimizing laser additive manufacturing process for Fe-based nano-crystalline magnetic materials. J Alloys Compd. 2023 Oct;960:170644.
60. Herzer G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials. Acta Mater. 2013 Feb;61(3):718–34.
61. Mattox DM. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 2007.
62. Ohring M. The Materials Science of Thin Films. The Materials Science of Thin Films. 2013.
63. Kneller EF, Hawig R. The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets. IEEE Trans Magn. 1991 Jul;27(4):3588–600.
64. Herzer G. Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials. Acta Mater. 2013 Feb;61(3):718–34.
65. Binns C. Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. 2010.

Siyez Unu ile Üretilen Bebe Bisküvilerinde Protein ve Karbonhidrat Sindirilebilirliği: Beslenme ve Sağlik Açısından Önemi

Yasemin KIZILASLAN[1]
Halime PEHLİVANOĞLU[2]
Mustafa YAMAN[3]

1- Yasemin Kızılaslan: Yüksek Gıda Müh. yaseminkizilaslan94@gmail.com ORCID No: 0009-0002-2254-1265
2- Dr. Öğretim.Üyesi: Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi/ Veteriner Fakültesi/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü. hpehlivanoglu@nku.edu.tr. ORCID No: 0000-0003-3138-9568
3- Prof .Dr. Mustafa YAMAN: İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi/Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü/Moleküler Biyoloji ve Genetik. mustafa.yaman@izu.edu.tr ORCID No:0000-0001-9692-0204

ÖZET

Bu çalışma, siyez unu kullanılarak üretilen bebek bisküvilerinde protein ve karbonhidrat sindirilebilirliğinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Siyez buğdayı, yüksek besin değerine sahip olması, düşük glisemik tepki oluşturması ve yapısal olarak modern buğday türlerinden farklı özellikler göstermesi nedeniyle bebek beslenmesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kapsamda araştırmada, siyez unu ile formüle edilen bisküvilerin sindirim davranışlarını belirlemek için standartlaştırılmış bir in vitro gastrointestinal sindirim protokolü uygulanmıştır. Sindirim öncesi ve sonrası örneklerde protein çözünürlüğü, serbest amino azot içeriği, indirgen şeker miktarı, nişasta hidroliz hızı ve ürün matriksinde meydana gelen yapısal değişimler analiz edilmiştir. Ayrıca pişirme koşullarının ürünün sindirilebilirliği üzerindeki etkisi incelenmiş ve siyez ununa özgü matriks özelliklerinin enzimatik parçalanmayı nasıl etkilediği değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, siyez unuyla üretilen bisküvilerin protein fraksiyonlarında başlangıçta belirli bir sindirim direnci bulunduğunu, ancak pepsin ve pankreatin uygulamalarıyla proteinlerin daha küçük peptitlere ayrıldığı ve sindirilebilirliğin anlamlı derecede arttığını göstermiştir. Karbonhidrat fraksiyonuna ilişkin sonuçlar ise siyez ununun özgün nişasta yapısının kontrollü hidrolize olanak tanıdığını ve glisemik yanıtın daha yavaş ilerleyebileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak çalışmada, siyez unu bazlı bebek bisküvilerinin hem besleyici nitelikleri hem de dengeli enerji salınımı açısından avantaj sunduğu, bu nedenle bebek beslenmesi için fonksiyonel bir seçenek oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ürün formülasyonunda siyez ununun kullanım oranının artırılmasının sindirilebilirlik parametrelerini nasıl etkilediğini anlamaya yönelik ek değerlendirmeler, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu sonuçlar, siyez ununun bebek gıdalarında kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu ve farklı işleme koşullarının besinsel biyoyararlılığı geliştirmek amacıyla optimize edilebileceğini göstermektedir. Bu kapsamda daha geniş örneklemli araştırmaların yapılması önerilmektedir. İleri analizler bunu destekleyecektir.

Anahtar Kelimeler: Siyez Unu, Protein, Karbonhidrat, Sindirim, Bebe Bisküvisi.

GİRİŞ

Siyez Buğdayının Önemi ve Güncel Gıda Trendleri

Buğday, geçmişten günümüze temel besin öğelerinden biri olarak insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Karbonhidrat, protein, enerji ve besin lifi bakımından zengin yapısı ile dünya nüfusunun büyük kısmı için temel gıda kaynağıdır (Abdel-Aal, 2002; Cooper, 2015; Zengin, 2015). Tarihsel süreçte evcilleştirilmiş ve kavuzlu atalarıyla birlikte buğday, insanlık için en yaygın tahıl ürünlerinden biri olmuştur.

Siyez buğdayı (‘*Triticum monococcum* L.’), kromozom sayısı 2n=14 olan ve yaklaşık 10.000 yıldır genetik yapısını koruyan en eski buğday türlerinden biridir (Kilian vd., 2008; Özberk, İ vd., 2016). Antik çağlardan günümüze ulaşan siyez, biyolojik çeşitliliğin ve kültürel mirasın değerli bir unsuru olarak kabul edilmektedir. Modern buğday türleriyle kıyaslandığında daha yüksek protein, yağ, vitamin ve mineral içeriğiyle dikkat çekmektedir. Ayrıca fenolik bileşikler, tokoferoller ve karotenoidler açısından da zengin olup besin değerini artırmaktadır (Abdel-Aal ve Hucl, 2002).
Fonksiyonel gıdalara olan ilgi son yıllarda giderek artmıştır. Bu ilginin bir sonucu olarak, biyoyararlılığı yüksek tahıllar arasında siyez buğdayı da öne çıkmaktadır. Düşük glisemik indeks (GI) oranı, zengin vitamin ve mineral yapısı ile siyez, obezite, diyabet, alerji ve kronik hastalıkların önlenmesinde önemli katkılar sağlayabilecek bir gıda olarak değerlendirilmektedir (Şanal, 2012; Hidalgo ve Brandolini, 2014; Pirgozliev vd., 2015; Dimov ve Stamatovska, 2018; Nakov vd., 2018).
Sağlıklı ve güvenilir gıda talebinin artmasıyla birlikte, özellikle bebek ve küçük çocukların beslenmesinde doğal ve katkısız ürünlerin önemi giderek vurgulanmaktadır. Modern gıda endüstrisinde kullanılan katkı maddeleri, bebek sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle katkısız, fonksiyonel özelliklere sahip tahıllarla üretilen alternatif besinlerin geliştirilmesi önemlidir.
Siyez unu, bu noktada değerli bir alternatif olarak görülmektedir. Yüksek besin değerine sahip olması, düşük GI oranı ve sindirim sistemine olumlu etkileri sayesinde, çocuk beslenmesinde kullanılabilecek uygun bir bileşen niteliği taşımaktadır.
Bu çalışmada beş farklı marka siyez unu ve normal buğday unu kullanılarak, katkı maddesi içermeyen farklı konsantrasyonlarda (0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, 100:0) bebe bisküvileri üretilmiştir. Ürünlerde “in vitro” ortamda protein ve nişasta sindirilebilirliği ile glisemik indeks değerleri incelenmiştir. Ayrıca HPLC analizleri ile esansiyel amino asit profilleri belirlenmiş, protein sindirilebilirliği ve glisemik indeks değerleri değerlendirilmiştir (Çevikkalp vd., 2016; Goni, Garsia ve Calixto, 1997). Elde edilen bulgular, siyez ununun bebek beslenmesinde fonksiyonel bir bileşen olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Siyez oranının artmasıyla birlikte glisemik indeks değerlerinin düşmesi, özellikle çocuklar açısından önemli bir sağlık avantajı sunmaktadır (Vujic vd., 2014). Bu yönüyle araştırma, fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Zulfa, Iliaka ve Ninik, 2014; Abdel-Aal ve Hucl, 2014; Hidalgo ve Brandolini, 2014; Nakov vd., 2018).

SİYEZ BUĞDAYI: BESLENME VE SAĞLIK PERSPEKTİFİ

Tarihçe ve Coğrafi Yayılım

Siyez buğdayı (*Triticum monococcum* L.), adını her başakçıkta tek bir tanenin bulunmasından alan, 2n=14 kromozom sayısına sahip en ilkel buğday türüdür. Bereketli Hilal olarak adlandırılan bölgede, yaklaşık 10.000 yıl önce Mezopotamya ve Türkiye'nin dağlık alanlarında yetiştirilmeye başlanmıştır (Hidalgo ve Brandolini, 2014; Özberk, İ. vd., 2017). Arkeobotanik bulgular siyez buğdayının tarihini 10.000-12.000 yıl öncesine dayandırmaktadır (Zengin, 2015).

Siyez buğdayı, Anadolu'nun en eski tarımsal miraslarından biri olup, Çatalhöyük gibi arkeolojik alanlarda kalıntılarına rastlanmıştır. Hitit medeniyetine ait kabartmalarda da siyez ve gernik buğdaylarının ikonografik temsilleri bulunmaktadır. Dilbilimciler, Mezopotamya metinlerinde siyezi ifade eden "ZIZ" teriminin geçtiğini belirtmektedir (Bayram, 2013).

Günümüzde Türkiye'de sınırlı bölgelerde (Kastamonu, Karabük, Sinop, Bolu, Bilecik, Kars) tarımı yapılmakta olup, özellikle Kastamonu'nun İhsangazi, Seydiler, Devrekani ve Daday ilçelerinde yoğun olarak yetiştirilmektedir (Kün, 1996; Heun vd., 1997; Anonim, 2016). Ayrıca Mardin, Siirt, Hakkari, Şırnak ve Tunceli gibi bazı illerde de az miktarda ekimi yapılmaktadır (Aktaş vd., 2018). Dünya genelinde ise İtalya, Fransa, İspanya, Balkan ülkeleri, Fas ve Hindistan gibi ülkelerde ekim alanlarına sahiptir (Emeksizoğlu, 2016).

Besin Değeri ve Fonksiyonel Bileşenler

Siyez buğdayı, modern buğdaylara kıyasla daha yüksek protein (%15,8-24,2), yağ (%2,8-4,2) ve kül içeriğine sahiptir. Ekmeklik buğdayda bu değerler daha düşüktür (Abdel-Aal vd., 2004). Yağ asidi kompozisyonu linoleik, oleik ve palmitik asit başta olmak üzere doymamış yağ asitlerinin oranı yüksektir (Hidalgo, Brandolini ve Pompei, 2009).

Antioksidan kapasitesi de dikkat çekicidir. Siyez buğdayı, modern buğdaylarla karşılaştırıldığında iki kat karotenoid ve 3-4 kat lutein içermektedir (Zaharieva ve Monneveux, 2014). Toplam tokol miktarı ortalama 77,96 µg/g olup, β-tokotrienol, α-tokotrienol ve α-tokoferol açısından zengindir (Loje vd., 2003; Hidalgo vd., 2006; Hidalgo ve Brandolini, 2008; Zengin, 2015). Ayrıca yüksek fitosterol içeriği (1054 mg/kg) sayesinde diğer buğday türlerinden %25 daha fazladır (Nurmi vd., 2008).

Vitamin ve mineral yönünden de üstünlük göstermektedir. Riboflavin ve pridoksin miktarı modern buğdaylara göre 4-5 kat daha yüksektir (Akar ve Eser, 2012). Mineral içeriği incelendiğinde Fe, Zn, Mn, Cu, Mg ve P düzeylerinin ekmeklik buğdaydan daha fazla olduğu saptanmıştır (Zaharieva ve Monneveux, 2014; Erba vd., 2011).

Siyez buğdayı ile günümüz buğdayları karşılaştırıldığında uygun protein, yağ, vitamin, mineral yapısıyla diğer buğdaylara üstünlük sağladığı, fonksiyonel bileşenler olarak fenolik bileşikler, tokoferoller ve karotenoidler açısından oldukça zengin ve buna bağlı olarak besin değerinin de daha iyi düzeyde

olduğu görülmektedir. (Abdel-Aal ve Hucl, 2002). Yapılan bir çalışmada siyez buğdayının protein miktarının %15,8 ile 24,2 arasında, ekmeklik buğdayda ise %11,6 ile 15,1 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre siyez buğdayı (g/100g KM'de) yağ oranı %2,8-4,2 iken, ekmeklik buğday yağ oranı %1,8-2; siyez buğdayında kül miktarı %2,5-2,8 arasında iken, ekmeklik buğdayda kül miktarı %1,1-1,5 olarak bulunmuştur (Abdel-Aal vd., 2004). Akar, Cengiz ve Tekin (2019) 36 adet siyez buğdayı, 49 adet antik emmer buğdayı (*Triticum turgidum dicoccum*), 3 adet durum buğdayda (*Triticum durum*) protein içeriği ve amino asit kompozisyonları incelenmiştir. Siyez buğdayı, emmer buğdayı ve durum buğdayının sırasıyla protein içeriği ortalama %21,29±1,59; %17,35±2,49; %16±1,93 olduğu bildirilmiştir.

Siyez buğdayının nişasta şeker içeriği konusunda yapılan çalışmalarda, nişasta oranı siyez buğdayında 61,2 g/100g ekmeklik buğdayda 62,4-70,0 g/100g civarıdır. Siyez buğdayının toplam şekerin 26,7 g/kg; ekmeklik buğdayın şeker oranının ise 33,3 g/kg olarak bildirilmektedir. Soğuk ve donmuş olarak 7 gün süre ile depolanan siyez buğdayı nişasta jel stabilitesinin, oldukça yüksek olduğu ve bunun da bazı gıda uygulamaları açısından olumlu sonuçlar verebileceği bildirilmiştir (Hidalgo ve Brandolini, 2014). Mohammadkhani, Stoddard ve Marshall, 1999 yılında 247 adet siyez buğday türünde yapmış oldukları çalışmada amiloz içeriğinin %15-%28 arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Siyez buğdayı ve ekmeklik buğdayın karşılaştırıldığı in vivo bir çalışmada, 120 dakikalık glisemik analizinde, GI ve insülinemik olarak 15 ve 105. dakikalarda, siyez buğdayı ekmeklik buğdaya göre GI'si daha düşük çıkmıştır. Yapılan bu çalışmada intestinal mikrobiyotayı da faydalı yönde artırdığı gözlemlenmiştir (Barone vd., 2019). Pasini vd. 2015 yılında yaptıkları bir çalışmada, siyez buğdayı ve durum buğdayının in vitro olarak farklı işleme koşulları altında (NMR sonuçlarına göre), siyez buğdayının nişasta hidroliz oranının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık gluten oranı az olduğu için hamur bağlayıcılığı daha az bulunmuştur.

Siyez buğdayının antioksidan içeriği açısından da oldukça zengin olduğu bildirilmektedir. Farklı bilim adamlarının yaptıkları araştırmalara göre, toplam tokol miktarı ortalama 77,96 µg/g olduğu sırasıyla; β-tokotrienol 48,22 µg/g, α-tokotrienol 12,77 µg/g, α-tokoferol 12,18 µg/g ve β-tokoferol ise 4,79 µg/g bulunduğu tespit edilmiştir. (Loje vd., 2003; Hidalgo vd., 2006; Hidalgo ve Brandolini, 2008; Zengin, 2015). Siyez buğdayı, modern buğdaylarla karşılaştırıldığında, 2 kat karotenoid, 3-4 kat lutein içermektedir. (Zaharieva ve Monneveux, 2014). Abd-el Aal ve Hucl'ın (2014) yaptığı çalışmada, karotenoid oranı siyez buğdayında 0,13 µg/g, ekmeklik buğdayda 0,05 µg/g; siyez buğdayının sarı lutein oranı 7,4 µg/g ekmeklik buğdayın ise 1,8 µg/g olduğu belirlenmiştir (WWF-Türkiye, 2016).

Hidalgo vd., (2016) tarafından yapılan bir çalışmada 4 çeşit siyez buğdayının karotenoid miktarı, durum ve ekmeklik buğdaylarla karşılaştırıldığında siyezlerde ortalama ve maksimum lutein miktarlarının sırasıyla 8,41-13,4 µg/g

(KM'de) olduğu gözlemlenmiştir. Siyez buğdaynın %47'sini sitesterolün oluşturduğu, fitosterol miktarının ise 1054 mg/kg değerle diğer buday çeşitlerinden %25 kat daha fazla olduğu bildirilmektedir (Nurmi vd., 2008). Yapılan bir araştırmaya göre siyez buğdayında fitik asiti oranının 2666,82 mg/kg olduğu, diğer buğdaylara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Diğer buğdaylardaki fitik asit oranı ortalama 2205,75 mg/kg'dır (Zengin, 2015).
Siyez buğdayının vitamin olarak 4-5 kat daha fazla riboflavin ve pridoksin içerdiği ve β-karoten miktarının da yüksek olduğu yapılan çalışmalarla bildirilmiştir. Niasin, prioksidin, A vitamininin sentezlenmesini sağlayan provitamin β-karoten düzeyinin daha yüksek olduğu görülmüştür (Akar ve Eser, 2017). Analiz edilen 5 siyez buğdayının folik asit (folat) konsantrasyonu 429-678 µg/kg, 150 ekmeklik buğdayda ise ortalama 323-774 µg/kg aralığında bulunmuştur (Hidalgo ve Brandolini, 2014). Yapılan çalışmalar siyez buğdayının mineral madde bakımından oldukça zengin olduğu gösterilmektedir. Siyez buğdayı P oranı 415 mg/100g (Abdel-Aal, Hucl ve Sosulski., 1995); Fe 47,04 mg/kg; Zn 54,81 mg/kg; Mn 49,29 mg/kg; Cu 6,40 mg/kg; K, Ca, S, ve Se mineralleri ekmeklik buğdaydan fazla olarak bulunmuştur (Zaharieva ve Monneveux, 2014). Erba vd. (2011) yaptıkları bir araştırmaya göre siyez buğdayı çeşitlerinin, ekmek buğdayından daha yüksek Zn: 7,18 ±0,76 mg/100 g, Fe: 5,23 ± 0,47 mg/100 g, Mn: 4,6 ±0,23 mg/100 g, Cu: 0,90 ±0,08 mg/100 g, Mg: 151,2 ±9,00 mg/100 g ve P: 541,1 ±35,37 mg/100 g içerdiğini tespit etmişlerdir.

Biyoyararlılık

Biyoyararlılık, vücuda alınan besinin biyoaktif maddesinden, olabildiğince faydalanılması olarak tanımlanır. Biyolojik süreçlerde katı gıda matrisinden açığa çıkan besinlerin biyolojik etkilerinin, bağırsak engelini geçerek metabolizma tarafından faydalanım, emilim sürecidir. FDA biyoyararlılık tanımını, ilaç içerisinde bulunan aktif matrisin ya da tedavi edici kısmın emilim hızı ve etkinliğini, yararlılık derecesi olarak ifade eder (Shi ve Maguer, 2010). Biyoyararlılık kapsamı içerisinde olan biyoerişilebilirlik kavramı, sindirim sisteminde kalan maddenin, gıdada bulunan madde miktarına oranı olarak tanımlanır (Sağbasan, 2015). "Biyoerişilebilirlik" terimi, insan sağlığını iyileştirmek amacıyla geliştirilen gıda ve gıda formülünün beslenme verimliliğini tespit etmek için oluşturulmuş bir kavramdır (Fernández, Carvajal, ve Pérez, 2009).
Biyoyararlılığı bileşiğin besin değeri, içerisinde bulunduğu gıdanın kompozisyonu, alınan doz, alım şekli, beslenme sıklığı ve biçimi, cinsiyet farklılıkları, genetik özellikler, kolondaki mikrobiyota ve tüketilen gıdanın mevcut diğer bileşenlerle olan ilişkisini etkiler. Biyoaktif maddelerin sindirim sistemi içerisindeki sıvı içerisinde çözünür özelliğinin olması gibi bazı faktörlerin etkilediği de tespit edilmiştir (Sandstrom, 2001). Bir gıda veya besin miktar olarak ne kadar bulunduğundan çok, alınan besin ögesinin biyoyararlılık derecesi önemlidir. (Şengül, 2013). Gıdanın besin değeri ve

bileşenlerinin yanı sıra biyoyararlılığı etkileyen başka etmenler de söz konusudur. Gıda üretimi esnasında uygulanan birtakım yöntemler ve işlemler, besinin bileşimini, biyoyararlılığını ve antioksidan yönünden içeriğini etkiler (Hidalgo, Yılmaz ve Brandolini, 2016). Biyoyararlılığın daha fazla olması için gıda maddesine bazı işlemler uygulanması gerekir. Yapılan bir çalışmada gıdaya uygulanan ısıl işlem ve asitle muamelenin biyoyararlılık oranını arttırdığı bildirilmektedir. Biyoyararlılık, alınan besin öğelerinin emilim hızını ve etkinliğini ifade eder (Shi ve Maguer, 2010). Siyez buğdayının biyoyararlılığı, uygulanan yöntemlerinden etkilenmektedir. Islatma işlemi ile oluşan fermentasyon, fitaz enzimini aktive ederek fitik asit seviyesini azaltmakta ve biyoyararlılığı artırmaktadır. Buna karşın mikrodalga uygulaması biyoyararlılığı olumsuz etkilemektedir (Atasoy ve Ertop, 2006; Hidalgo, Yılmaz ve Brandolini, 2016). Siyez buğdayının ıslatma ile oluşan fermentasyonu, fitaz enzimini aktive eder ve hem fiziksel hem de kimyasal olarak olumlu etkiler. Islatmanın fitik asit seviyesini değiştirerek siyez buğdayının biyoyararlılığını artırdığı, ışıl işlem ve mikrodalga uygulamasının ise biyoyararlılığı olumsuz etkilediği bildirilmektedir.

Sağlıkla İlişkisi

İkinci Dünya Savaşı sonrası dünya nüfusunun artması ile beraber açlığın, fakirliğin, yiyecek kıtlığının oluşmasıyla yeni gıdalara yönelimde artış oldu. Dr. Norman Borlaug'a Nobel ödülünü kazandıran "Yeşil Devrim" kavramı ile bu dönemde tanışıldı. Yeşil devrimle yüksek verim hedeflenerek, ilkel tarım yöntemleriyle buğday üretimi yerini, modern teknolojik metotlar kullanılarak küresel bazda, verimin iki katına çıkarılan tarım şekli aldı. Buradaki hedef hibrit tohumlarla buğday verimini artırmaktı ve hedefe ulaşıldı. Ancak zaman içinde toplum sağlığı ciddi şekilde etkilenmişti. İstatistikler obezite, buğday alerjisi, çölyak, diyabet, kardiovasküler rahatsızlıklar gibi sağlıksız besin ve beslenmeyle ilgili hastalıkların bu dönemden sonra arttığını göstermektedir (Barrett, 2013).

Obezite gelişmekte olan ülkelerde en önemli sağlık sorunu olarak yer almaktadır. Obezite, enerji tüketiminin enerji alımından daha az olması, vücuttaki yağ dokusunun normalin üzerinde olmasıdır. Bu durum psikolojik, sosyolojik ve ciddi sağlık sorunları oluşturabilen tıbbi problemlerin en önemlilerindendir. Çocukluk dönemindeki obezitenin tanımlanması ve kaçınılması, yetişkin dönemdeki obeziteyle ilgili sağlık problemlerinin önlenmesi noktasında oldukça önemlidir. Obezitenin sadece kalıtsal nedenlerle açıklanamadığı, çevresel etmenlerin de etkili olduğu ortadadır. Yaşam tarzı ve beslenme şekli son 30 yıldaki obezite artışında etkili olmuştur (Janssen, Katzmarzyk ve Ross, 2004). Obezitenin, WHO (2009) tarafından en riskli 10 hastalıktan biri olduğu ve aynı örgüt tarafından yürütülen son araştırmalarda diyabet, kardiyovasküler, kanser, endokrin sistemi gibi tüm vücudu etkileyen hastalıklarla yakın ilişkisi olduğu da belirtilmiştir. TÜİK 2016 yılı Türkiye sağlık araştırması verilerine göre, vücut kitle indeksi (BMI) boy ve kilo değerleri kullanılarak hesaplandığında 2014 yılı için 15 yaş ve üstü

obez bireylerin oranı %19,9 iken, 2015 yılında ise %20 olmuştur (TÜİK, 2017).

Araştırmacılara ve uzmanlara göre alerji her geçen gün artarak toplum sağlığını önemli düzeyde etkilemektedir (Van Bilsen vd., 2017). Buğday alerjisi, IgE antikorlarının buğday proteinlerine maruz kalındığında, bağışıklık sisteminin bulunduğu bölgeye bağlı olarak vücudun ters bir immünolojik reaksiyon göstermesidir ve deride oluşan lezyonlara, gastrointestinal sistemde veya solunum sisteminde oluşan komplikasyonlara neden olmaktadır. Buğday alerjisi daha çok çocukluk döneminde olmakla beraber yaşamın ilerleyen dönemlerinde de görülmektedir (Güneş, Kutlu ve Öztürk, 2012). Boukid vd. (2017) yaptıkları araştırmaya göre makarnalık buğdayda (*Triticum durum*) immujenik ve toksik peptitlerin olması, alerjik reaksiyonlara sebep olur. Yapılan bir araştırmada siyez buğdayındaki yüksek lutein içeriği, alerjinin neden olduğu cilt hastalıklarında iyileştirici özelliğine sahip olduğu görülmüştür (Abdel-Aal ve Hucl, 2014).

Çölyak, buğdayda bulunan proteine (gluten ve gliadin) karşı hassasiyet nedeniyle bağırsakta meydana gelen ve emilim bozukluğuna sebep olan immün sistem hastalığıdır. Buğday proteini insan nüfusunun yaklaşık %99'u tarafından kolayca sindirilebilir. Hastalığın nedenini oluşturan temel etken gluten proteininin α-gliadin adlı alt grup fraksiyonu olup, tahıl ürünü içeren gıdaların tüketilmesi sonucunda başta vitamin ve mineraller olmak üzere vücudun gereksinim duyduğu çeşitli besin maddelerinin emilimi azalmaktadır. Çölyak hastalarında gluten ve gliadin, hücreler üzerinde sitotoksik etki gösterir. Gliadine maruz kalındığında, ince bağırsağın üst yüzeyinin düzleşme olur, transglutaminaz proteini değişir ve bağışıklık sistemi bağırsak dokusu ile çapraz reaksiyona girerek inflamatuar bir reaksiyona ve sitotoksik etkiye neden olur. Çölyak hastalığının son yıllarda batı ülkelerinde görülme sıklığı artmaktadır. Özellikle, çölyak hastaları diyetlerinde gluten içeren bütün gıdalardan kaçınmalıdır ve birkaç eski tahıl önemli bir alternatif sunabilir (Cooper, 2015). Buğdayın yanı sıra arpa, çavdar, yulaf, tiritikale gibi hububat çeşitleri de çölyak için zararlıdır. Karabuğday gibi gluten oranı daha düşük olan buğdaylar çölyak hastaları için altarnatif oluşturabilir (Yıldız, 2012; Olgun vd., 2015). Siyez ürünlerinin çölyak hastalığına sebep olan toksisiteye çeşide bağlı olarak az neden olduğu veya neden olmadığı yönünde çalışmalar da mevcuttur (De Vincenzi vd., 1996; Pizzuti vd., 2006). Siyez buğdayı ve ekmeklik buğday çeşitlerinden elde edilen gliadinler, gastrointestinal enzimler (pepsin ve kimotripsin) kullanılarak in vitro sindirim gerçekleştirilmiş ve sindirilen örneklerin bağışıklık uyarıcı özellikleri, çölyaklı hastalardan alınan T hücre hatları ve jejunal biyopsiler üzerinde araştırma yapılmıştır. Siyez buğdayı gliadini T hücresi yanıt profili, kısmi sindirimden sonra ekmeklik buğday gliadin ile elde edilene benzerliğinin aksine, geniş gastrointestinal hidroliz sonucu siyezli buğday gliadini bağışıklık uyarıcı özelliklerini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Siyezli peptidlerin birçoğu sindirimde parçalandığı, ekmeklik

buğdaydaki gliadinin ise birçoğunun sindirimden parçalanmadan kaldığı görülmüştür. Siyez buğdayı gliadin toksisitesinin daha düşük olduğu belirlenmiş ve ekmeklik buğday modelinden farklı olduğu sonucuna varılmıştır. (Giafrani vd., 2015). Siyez buğdayının 26 çeşidiyle yapılan bir çalışmada, çölyak hastalarında siyez buğdayındaki gliadin proteininin, daha az toksik etki gösterdiği belirtilmiştir. Siyezli ürünlerde glutenle ilgili çalışmalar devam ettiği ve bir sonuca varılmadığından dolayı bu yönde beslenme, diyette önerilmemektedir. (Cooper, 2015).

Pizzuti vd., (2006), çölyak hastalığı ve tedavisi üzerine yaptıkları çalışmada, 12 adet çölyak hastasında siyez buğdayının, gluten tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan toksititenin daha az olduğu ve yapılacak yeni araştırmalarla gelecekte, siyez türü karabuğdayların çölyak beslenmesinde daha da önem kazanabileceği düşünülmektedir (Vaccino vd., 2009; Gianfrani vd., 2015).

Glisemik indeksin sağlık üzerine etkileri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde glisemik indeksin obezite, kanser, kardiyovasküler, diyabet, bağırsak temelli çeşitli kronik hastalıklarla ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Roberts, 2000; Ludwig, 2002; Barret, 2013). Bütün sağlık otoriteleri, özellikle WHO 2004 raporlarına göre toplumdaki beslenme değişimleri, hareketsiz yaşam tarzıyla birlikte, birçok kronik metabolik sağlık problemlerini oluşturduğu konusunda hemfikirdirler. Tip 2 diyabet bunların arasında en endişe verici olanıdır. Bunun dünya çapında yaklaşık 171 milyon olduğu ve bu rakamın 2030 yılına kadar 366 milyona ulaşacağı ve 7 ölümden birine bu hastalığın sebep olacağı tahmin edilmektedir (Wild vd., 2004). Bazı gıdalar, temel olarak sindirim enzim aktivitesini ve bağırsak geçiş hızını etkileyerek yapısındaki biyoaktif bileşiklerden dolayı antidiyabetik özellikler gösterebilmiştir. Bu nedenle, düşük sindirilebilir karbonhidratların, glisemik indeks tip 2 diyabetin azaltılmasında etkili olabileceği düşünülmektedir (Salmeron vd., 1997). Yüksek karbonhidratlı besinler, birçok işlemden geçmiş gıdalar, glikoz ve früktoz gibi şekerin yüksek seviyelerde olması, beynin küçülmesine sebep olup, beyin fonksiyon bozukluğunun ana nedeni olarak gösterilmektedir. Yüksek glisemik indeks, beyni ve doğal antioksidanları etkileyen reaksiyonlarla, bilişsel kapasiteyi azalttığı alzheimer, demans, depresyon, epilepsi gibi hastalıklara neden olduğu ve diğer inme gibi hastalıkların da endişe verici düzeyde olduğu görülmektedir (Shewry, 2009; Kasarda 2013). Ayrıca glisemik indeksi düşük olan siyez buğdayı inmenin ve birçok beyin hastalığının önlenmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Siyez buğdayındaki fitik asitin yüksek değerlerde olması vücutta oluşan serbest radikalleri yok ederek DNA ve hücre komponentlerinde oluşabilecek hasarlara engel olur (Karakaş, 2016). Bitkisel steroller, fitosterol yapısal olarak kolesterole benzer ve fitosteroller tanede en fazla germ ve kepek tabakasında bulunmaktadır (Nurmi vd., 2008). Siyez buğdayının antioksidan özelliği bağışıklık sistemini güçlendirir, kanser riskini azaltır. Yüksek fitosterol içeriği sayesinde kanda kolesterol düzeyinin azalmasına yardımcı olduğu ve kalp sağlığını korumada, yaygın kanserlerden kolon, barsak, mide,

rahim ve göğüs kanserini önlemede etkili olduğu bildirilmiştir (Zaharieva ve Monneveux, 2014).

Siyez buğdayındaki minerallerin önemli oranlarda olması vücut işleyişine katkıda bulunur. Hemoglobin (kırmızı kan hücreleri için) ve miyoglobinin (kaslar için) üretilmesinde Fe en önemli minerallerdendir. İkisi de oksijen taşımasında ve depolamaya Fe yardımcı olur. Mn vücutta karbonhidratların, amino asitlerin ve kolesterolün metabolizması için birçok önemli enzimi aktive eder. Aynı zamanda sağlıklı kıkırdak ve kemik oluşumu için de gereklidir (Mihaylova ve Popova, 2018). Folik asit kan hücrelerinin oluşması ve aneminin önlenmesinde rol oynar ve siyez buğdayında fazla miktarda bulunur (Zengin, 2015).

Sonuç olarak; Buğday dünyada en çok tüketilen ve tahıllar arasında da en çok alerjiye sebep olan besindir. Alerji, ciddi bir halk sağlığı sorunudur. Siyez buğdayı, obezite, çölyak, buğday alerjisi ve diyabet gibi sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmiş ve olumlu etkileri rapor edilmiştir. Modern buğdaylarla karşılaştırıldığında glisemik indeks değerinin daha düşük olduğu ve sindirimin yavaş gerçekleştiği bildirilmiştir (Roberts, 2000; Ludwig, 2002; Barret, 2013). Bu durum tip 2 diyabet riskinin azaltılmasında önem taşımaktadır.

Obezite, modern yaşam tarzı ve beslenme alışkanlıkları ile birlikte artış göstermektedir. WHO verilerine göre diyabet, kardiyovasküler hastalıklar ve obezite en önemli sağlık sorunları arasında yer almaktadır (TÜİK, 2017). Düşük GI değerine sahip siyez buğdayı, bu hastalıkların önlenmesinde etkili olabilir (Wild vd., 2004). Ayrıca yüksek fitik asit ve fitosterol içeriği sayesinde kolesterol düzeylerini düşürdüğü, bağışıklık sistemini güçlendirdiği ve kanser riskini azalttığı bildirilmektedir (Zaharieva ve Monneveux, 2014).

Çölyak açısından değerlendirildiğinde, siyez buğdayı gliadin proteininin daha az toksik etki gösterdiği bulunmuştur. Yapılan çalışmalar, siyez gliadinlerinin sindirim sırasında parçalanarak bağışıklık uyarıcı etkilerini azalttığını göstermektedir. Bu nedenle siyez, modern buğdaylara kıyasla çölyak açısından daha düşük toksisiteye sahip olabilir (Giafrani vd., 2015**;** Pizzuti vd., 2006; Vaccino vd., 2009).

BEBE BISKÜVİLERI VE ÇOCUK BESLENMESİNDEKİ YERİ

Bisküvi ve Endüstrisinin Genel Özellikleri

Bisküvi, atıştırmalık olarak hem Türkiye'de hem de dünyada yaygın şekilde tüketilen, her yaş grubuna hitap eden bir üründür. Çocuklar ve yetişkinler tarafından beğeniyle tüketilen bisküviler, tahıla dayalı en fazla katma değer girdisi olan ürünler arasında yer almaktadır (Önder, 2016). Endüstriyel açıdan sürekli gelişen ve ekonomik değeri yüksek bir ürün grubunu oluşturmaktadır. Kelime kökeni olarak Latince "bicocotus"tan türeyen bisküvi, "iki kere pişirilmiş" anlamına gelmektedir (Uzunlu ve Herken, 2016). Günümüzde farklı formülasyonlarla ve geniş ürün çeşitliliğiyle pazarda önemli bir yer edinmiştir. Bu tanıma ek olarak Türk Standartları Enstitüsü 2383 no'lu tanımlamasında ise, ilgili tüzükte izin verilen diğer maddelerin bir veya birkaçı eklendikten sonra uygun bir şekilde işlenip, şekil verilerek elde edilen unlu mamul şeklindedir (Anonim, 2013b). Bisküvi ve türevlerinin üretimi ilk olarak M.Ö. 2600 yıllarına Mısırlılar'a kadar dayanmaktadır. Romalılarla birlikte M.S. II. ve III. yüzyıllarda çeşitlilik artmış ve üretim prosesleri gelişmiştir. Karakteristik yapıda bisküvi elde etmek için, hamurun yüksek ısıda pişirilerek, suyunun buharlaştırılması ve oldukça kuru bir kıvamda tutulması gerekmektedir. Son dönemde pişirme esnasında sıcaklığın etkisiyle oluşabilecek HMF ve akrilamit gibi kanserajenik etkiler, biyoyararlılığında azalma olup olmadığına dair araştırmalar da yapılmaktadır (Hidalgo ve Brandolini, 2011; Uzunlu ve Herken, 2016). Hidalgo ve Brandoli'nin (2011) yaptığı başka bir çalışmada siyez, durum ve ekmeklik buğday unlarıyla hazırlanan bisküvilerde ısıl işlem etkisi incelenmiş ve sonuç olarak ısıdan etkilenme oranının en az siyez unuyla yapılan bisküvide olduğu tespit edilmiştir.

Bisküvi, un, şeker/tuz, yağ, su ve bir takım kimyasal kabartıcıların, bazı aroma ve tekstür sağlayıcı maddelerin de eklenip yoğurularak çeşitli tekstürel şekiller verilerek, tekniğe uygun olarak pişirilmesiyle elde edilir. Doku olarak sert ve kırılgan kıvamlı bir hamurdur (Ayo vd., 2007). Bisküvi, besin değeri farklı tahıl lifleri, meyve ve sebze lifleriyle de zenginleştirilebilmektedir (Beğen, 2012). Çok çeşitli hammaddeler kullanılabilmekte, bazen sade olarak da tüketicinin beğenisine sunulmaktadır. Endüstride bisküvi hammaddeleri her geçen gün, değişen dünyayla birlikte isteğe ve de hassasiyetlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bisküvi çeşitleri sıralanacak olursa, tatlı, tuzlu, kakaolu, çeşitli baharatlı, bebe bisküvileri, kraker türünde olanlar, tahıl ağırlıklı olanlar, peksimet şeklinde, kremalı, kuru yemişli, meyve parçacıklı ya da aromalı, vegan, son dönemde lifli şeklindedir. Alongi, Melchior ve Anese (2019) şeker yerine elma posası ile ikame edilmiş bisküvilerin, in vitro sindirilebilirlik araştırmasına göre GI oranında önemli ölçüde düşüş gözlenmiştir. Bu konuda, biyoaktif bileşikler ve ikame edicilerin fonksiyonu yönünden daha fazla araştırmalara ihtiyaç vardır. Keçiboynuzu ve soya ile ikame edilmiş karabuğdayla yapılan başka bir bisküvi çalışmasında ise lif

oranı, antioksidan ve fenolik bileşik yüksekliği, nişasta salınım hızı yavaşlığının GI oranını düşürmede etkili olduğu görülmüştür (Vujik vd., 2014). Araştırmacılar glutensiz ve daha az alerjiye sebep olacak yeni ürünlerin üzerinde de çalışmaktadır (Yıldız, 2012).

Bisküvi besin değerleri protein oranı ortalama %8-11, yağ oranı %5,4-16,1; karbonhidrat oranı %57,85-74,20; kül miktarı %0,45-1,10; nem oranı %4,3-5'den az olması, lif oranı %0,93-2,5, enerji oranı ise 431,00-497,77 kkal/100g; aroma miktarı %0,01-5, %7-8 gluten (kuru öz), tuz miktarı da %0,18-2,75 aralıklarında olması istenilir (Sertkan, 2006; Alpan, 2012). Bisküvide, ekmek ve kek gibi diğer fırınlanmış ürünlerdeki gibi, mikrobiyal bozulma çok azdır. Bu da ürünün, düşük nem içeriğinden kaynaklanmaktadır. Düşük nem içeriğinden dolayı son ürünün gevrekliği artmakta ve tüketici tarafından tercih edilmektedir (Kabuo vd., 2018).

Son dönemde bütün dünyada sağlıklı ürünler üretme eğilimi bisküvi endüstrisinde de görülmektedir. Sektörde standart çeşitlerin yanı sıra belirli tüketici gruplarına hitap eden ürünler de üretilmektedir. Günümüzde her üründe olduğu gibi, sağlığa yönelik fonksiyonel bisküvi üretimi daha çok tercih edilmektedir. Şeker hastaları için özel diyet bisküviler, çocuklar için bisküviler, çölyak hastaları için glütensiz, alerji hastaları için katkısız bisküviler, diyabetliler için diyet bisküviler, karabuğday, yulaf, çavdar, arpa ve siyez unu ilaveli bisküvilerle ürün geliştirme çalışmaları TÜBİTAK tarafından da desteklenmektedir. Siyez unu ile yapılan bisküvilerin, diğer bisküvilere göre lif, antioksidan ve fenolik bileşikler oranları daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Ergin, 2011; Alpan, 2012; Hidalgo, Yılmaz ve Brandolini, 2016; Karaduman vd., 2018). Dimov ve Stamatovska'nın (2018) siyez unu ile bazı bisküvi üretimine yönelik yaptıkları araştırmalarında %100 siyez unuyla yapılan bisküvilerde pişirme kayıplarının, hacim, renk, tat değerlerinin ve pişirmeye yönelik endüstri kayıplarının daha az olduğu saptanmıştır.

Bebe Bisküvilerinin Formülasyonu ve Besin Öğeleri

Bebe bisküvileri, özellikle bebek ve küçük çocukların beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bu ürünler, çocukların gelişiminde gerekli olan protein, karbonhidrat, vitamin ve mineral ihtiyacını karşılamada yardımcı olmaktadır. Ancak piyasada bulunan birçok bebe bisküvisi katkı maddeleri ve raf ömrünü uzatıcı bileşenler içermektedir. Bu durum, bebek sağlığı açısından risk oluşturabilmektedir.

Bebe bisküvilerinde kullanılan temel bileşenler; un, şeker, yağ, süt tozu ve çeşitli katkı maddeleridir. Bununla birlikte, katkı maddelerinin çocuk sağlığı üzerindeki olası olumsuz etkileri nedeniyle, katkısız ve fonksiyonel niteliklere sahip ürünlerin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Bu bağlamda siyez unu, yüksek besin değerine sahip doğal bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Bebe bisküvisi, Türk Gıda Kodeksi (madde 4) tanımına göre "İşlem Görmüş Tahıl Bazlı Bebek ve Küçük Çocuk Ek Besinleri olarak; 4-6 aylıktan sonra bebeklerin beslenmesinde anne sütü ve bebek formüllerinin tamamlayıcısı

olarak veya çocukları ileri yaşlardaki günlük diyetlerine alıştırmak için kullanılan ek besinler" şeklinde tanımlanır. Ürün özellikleri olarak tebliğdeki ifadesi ise "Doğrudan veya su, süt ve diğer uygun sıvıların eklenmesi ile ezildikten sonra kullanılan bisküvi, peksimet gibi yiyecekler" şeklindedir.
Şehirleşmenin arttığı, hızlı yaşamın kaçınılmaz olduğu, günümüz şartlarında anne sütünden sonra ek gıdaya geçişte çocuklar için oldukça öneme sahip bebe bisküvisi bu ihtiyaçtan dolayı üretilmektedir. Bebeklerin ve küçük çocukların büyüme ve gelişimleri için, yeterli besin içeriğine sahip gıdaların tüketilmesi sağlıkları açısından önemlidir (Sholihah, Agustina ve Nugroha, 2018). Besleyici yönü yüksek olan buğdaylara her geçen gün ilgi artmakta ve buna bağlı olarak, siyez buğdayı ile bebek ve küçük çocuklar için fonksiyonel bisküvi alanı genişlemektedir (Dimov ve Stamatovska, 2018). Düşük GI ürünlere yönelik eğilim de hızla artmakta, üreticiler, sağlıklı ve besleyici ürünleri araştırıp, geliştirmektedirler (Anonim, 2019-b).
Siyez buğdayının besleyici değerinin, protein ve antioksidan içeriğinin yüksek olması, siyezden elde edilen unun bayatlama özelliklerinin daha az olması nedeni ile siyez ununun bebe bisküvisi, bebek mamalarının ve özel ürünlerin üretimi için uygun olduğu bildirilmiştir (Brandolini, Hidalgo ve Moscaritolo, 2008). Bebe bisküvisinde kullanılan başlıca hammaddeler un, şeker, yağ (palm, pamuk, ayçiçek, kanola), nişasta, pirinç unu, yağsız pastörize süt, mısır unu, yumurta, bazı mineraller (Ca, K, Mg, Fe, Zn, Cu, I), tuz, vitaminler (A, E, C, D3, B1, B2, B6, B12, folik acid, biotin), bazı aroma vericiler, sodyum hidrojen karbonat gibi kabartıcılar, peynir altı suyu, süt tozu, emülgatör, oligofruktoz ve bazı tahıl, meyve, kuruyemiş gibi maddelerdir (Anonim, 2019). Rafine buğday unu, yüksek miktarlarda rafine ve invert şeker, aroma vericiler, katkı maddelerinin yüksek oranda kullanılması, bebek ve çocuklar için sağlık problemleri oluşturmaktadır. Ancak üretimde kullanılan tüm maddeler ve limitleri EFSA, Avrupa Birliği ve Türk Gıda Kodeksi tarafından belirlenmiştir (Sakoğlu, 2015). Bebe bisküvisinin bileşen değerleri Tablo 5.de verilmiştir.

Tablo 5. Bebe Bisküvisi Bileşen Değerleri (100 g'ı içindir) (TürKomp, 2017).

Bileşen	**Biri m**	**Ortalama**	**Minimum**	**Maksimum**
Enerji	kcal	459	459	459
Enerji	kJ	1920	1920	1920
Su	G	3,23	3,23	3,23
Kül	g	1,79	1,79	1,79
Protein	g	4,10	4,10	4,10
Azot	g	0,72	0,72	0,72
Yağ, toplam	g	17,19	17,19	17,19
Karbonhidrat	g	70,21	70,21	70,21
Lif, toplam diyet	g	3,48	3,48	3,48
Nişasta	g	34,14	34,14	34,14
Tuz	mg	496	496	496
Demir	mg	7,02	7,02	7,02
Fosfor	mg	257	257	257
Kalsiyum	mg	358	358	358
Magnezyum	mg	101	101	101
Potasyum	mg	111	111	111
Sodyum	mg	198	198	198
Çinko	mg	4,99	4,99	4,99
Selenyum	µg	4,4	4,4	4,4
C vitamini	mg	52,3	52,3	52,3
Tiamin B1	mg	0,588	0,588	0,588

Riboflavin B2	mg	0,608	0,608	0,608
Niasin B3	mg	9,859	9,859	9,859
Pridoksin B6 (toplam)	mg	0,786	0,786	0,786
Folik asit B9 (sentetik)	µg	46	46	46
Kobalamin B12	µg	0,52	0,52	0,52
Retinol	µg	416	416	416
D vitamini, IU	IU	282	282	282
D-3 vitamini (kolekalsiferol)	µg	7,1	7,1	7,1
E vitamini, IU	IU	7,84	7,84	7,84
α-tokoferol	mg	5,26	5,26	5,26
Yağ asitleri, toplam doymuş	g	6,020	6,020	6,020
Yağ asitleri, toplam tekli doymamış	g	3,795	3,795	3,795
Yağ asitleri, toplam çoklu doymamış	g	1,597	1,597	1,597
Triptofan	mg	68	68	68
Glutamik asit	mg	539	539	539

Bebek ve Çocuk Beslenmesinde Önemi

Bebeklik ve erken çocukluk dönemi, sağlıklı büyüme ve gelişme açısından kritik bir dönemdir. Bu süreçte dengeli ve yeterli beslenme, ilerleyen yaşlarda ortaya çıkabilecek sağlık sorunlarının önlenmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Katkısız, doğal ve fonksiyonel özelliklere sahip gıdaların tercih edilmesi, özellikle hassas bünyeli bebeklerde önem taşımaktadır.

Siyez unu ile üretilen bebe bisküvileri, yüksek protein ve mineral içerikleri, düşük glisemik indeks değerleri sayesinde çocuk beslenmesine katkı sunmaktadır. Sindirimin daha yavaş gerçekleşmesi, kan şekeri kontrolünü desteklemekte ve obezite ile diyabet riskini azaltmaktadır. Bu nedenle siyez unlu bisküviler, bebek beslenmesinde güvenli ve sağlıklı bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

EFSA NDA Panel 3408 sayılı bilimsel görüşünde bebekler, küçük çocuklar ve devam formülleri için araşidonik asit, eikosapentaenoik asit, Cr, P, taurin, nükleotidler, sindirilemeyen oligosakkaritler, probiyotikler ve sinbiyotiklerin ilave edilmesine gerek olmadığı bildirilmiştir (EFSA NDA, 2013). Çocuk Sağlığı Vakfı ve Erken Beslenme Akademisiyle, Avrupa Çocuk Gastroenteroloji, Hepatoloji ve Beslenme Derneği (2012) ortaklaşa düzenledikleri bilimsel bir çalıştayda, bebek maması kalitesi ve güvenliği ile ilgili kavramlar, standartlar ve uygulamalar tartışılarak konsensüs sağlanmıştır. Bebek ve erken çocukluk dönemi, küçük çocuk beslenmesinin kalite ve güvenlik yönleri, çocuk sağlığı için kilit öneme sahip olduğu, bileşimi, kalitesi, hammadde ve üretim süreçleri dahil olmak üzere, ürünlerinin güvenliği ve uygunluğunun birincil sorumluluğunu taşıma gerekliliği, gıda ürünleri yüksek standartlar sağlamasının önemine göre bazı şartlar şöyle sıralanabilir:

- İstenilen makro ve mikro bileşenlerin yeterli miktarda olması,
- Alerjen maddeler varsa etikette belirtilmesi,
- Enerji oranlarının hesaplanıp içeriğinde yazılması,
- Bebeğin günlük yeterli besininin alımında katkıda bulunması,
- İçeriğinin doğru olarak yazılması,
- Vitamin ve minerallerin belirtilenin üzerinde kullanılmaması,
- GDO kullanılmaması, doğal ürünlerin kullanılması
- Kalite standartlarına uyma zorunluluğu,
- Kalıntı ve bulaşlara dikkat edilmesi, toksik madde içermemesi,
- Furan, akrilamid, HMF oranlarının kabul edilebilir oranda olması,
- Ambalajın tüzükte belirtildiği şekilde olup, migrasyon olmaması,

- Gıda Katkı Maddelerinin WHO/FDA tarafından belirlenen ölçünün dışına çıkılmaması.
- Hijyen kurallarına dikkat edilmesi,
- Mikrobiyal kontaminasyona dikkat edilmesi,
- Taşıma, depolama sırasında oluşabilecek sorunlara karşı önlem alınması (Anonim, 2019-bbm; Cengiz ve Gündüz, 2013; Koletzko, Shamir ve Ashwell, 2012; Calabretti vd., 2017; TGK, 2001)

Katkısız ve Fonksiyonel Bisküvi Üretim Yaklaşımları

Gıda endüstrisinde fonksiyonel ürün geliştirme çalışmaları son yıllarda artış göstermiştir. Siyez buğdayı, biyoyararlılığı yüksek besin öğeleri ve fonksiyonel bileşenleri sayesinde, katkısız ve sağlıklı ürünlerin üretiminde değerli bir bileşen olarak kullanılmaktadır.

Siyez unundan üretilen bebe bisküvileri, içerdiği dirençli nişasta ile sindirimi yavaşlatmakta ve düşük GI değerleriyle dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde yalnızca bebekler için değil, aynı zamanda sağlıklı yaşamı benimseyen bireyler için de uygun bir besin kaynağı haline gelmektedir.

GIDA MADDELERİNİN SİNDİRİMİ

Metabolizmanın sağlıklı işleyişi için gıdaların vücuda alınıp emilmesi çok önemlidir. Gıdaların alımıyla birlikte sindirimde emilim ve eliminasyon başlar. Emilim süreci gastro intestinal sistemde (GİS), bütün kompleks mekanizmaları harekete geçirir. İlk olarak gıdadaki yapısal değişiklikler ve besin maddelerinin emilimi ağız yoluyla başlanılır, sonra mide ve ince bağırsakta devam eder (Menard vd., 2014). Vücuda gıda alımıyla birlikte bazı endokrinal enzimleri uyarıldıktan sonra, proteinlerin gastrointestinal kanaldaki amino asitlere, karbonhidratların glikozlara, yağların yağ asitlerine hidrolizi gerçekleşir ve besin öğeleri epitel hücreleri tarafından ince bağırsak lümeninden içeri girer, santral sistemi harekete geçirir. Pek çok bağışıklık sistemini etkileyecek faktör de etkili olur, besin öğesi transferi başlar ve diğer doku organlara taşınır, sindirim gerçekleşmiş olur (Jordi vd., 2013; Akyüz ve Demir, 2009). Sindirim sisteminde vücut, biyolojik molekülleri olan sindirim enzimlerini (pepsin, tripsin, kimotripsin, peptidaz, α-amilaz, lipaz ve pankreatin), safra tuzları ve müsini kullanır (Minekus vd., 2014).

İn Vitro Sindirim

İn vitro sindirim modelleri, simüle edilmiş gastrointestinal sistemin şartlarına benzetilerek, gıda maddelerinde oluşan yapısal değişikliklerle vücut sistemlerinde meydana gelen değişikliklerini, sindirilebilirliğini ve salınımını incelemek için yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Besinlerin biyoerişilebilirlikleri genellikle gastrointestinal sistemin bileşenleri örnek alınarak hazırlanan in vitro sistemlerin kullanımı ile incelenir. Birçok çalışmayla gösterilmiştir ki, in vivo ve in vitro sindirim modelleri arasında iyi bir korelasyon vardır ve bu yöntemler birçok bilimsel çalışmada kullanılmaktadır (Dupont vd., 2010; Barbé vd., 2013; Ménard vd., 2014). İn vitro sindirim modellerinin sonuçları, hayvan ve insan sindirim kanallarında meydana gelen oldukça karmaşık fizikokimyasal ve fizyolojik olayları doğru şekilde simüle etmedeki zorluklardan dolayı, in vivo modellere karşılık tercih edilmektedir. İn vivo çalışmalar yapılırken zaman, maliyet ve etik problemler açısından zorlanılması in vitro yöntemlerin tercih edilmesini neden olur. İn vitro çalışmalar araştırıcıya basitlik, kolay uygulanabilirlik ve düşük maliyet, tekrarlanabilirlik, kontrollü koşulların seçimi ve hipotez oluşturma kolaylığı in vitro modelleri avantajlı hale getirir (Minekus vd., 2014). İncelenen tüm in vitro sindirim modellerinde, farklı türlerde ve konsantrasyonlarda, uygun enzimler olan amilaz, pepsin, pankreatin kullanılarak sindirim sıcaklığı (vücut sıcaklığı olan) 37°C'de gerçekleşmektedir. pH derecesi asidik ya da nötr ortama göre belirlenerek, sabit bir değerde tutulur. Sindirim süreleri, belirli zaman aralıklarına göre yapılır. Aşamaların her birinde simüle edilmiş ağız, mide, ince bağırsak şeklinde enzimler ve substrat önceden belirlenmiş süre boyunca inkübe edilir. İnsan sindirim sisteminden simüle edilmiş in vitro gastrointestinal sindirim modeli, protein sindirilebilirliğini, karbonhidrat sindirilebilirliğini, GI tayin etmek için en çok kullanılan bir yöntemdir (Englyst vd.,1992; Fernánde, Carvajal, ve Pérez, 2009; Hur vd., 2011; Lee vd., 2016; Minekus vd., 2014; Sopade ve Gidley, 2009).

PROTEİN VE KARBONHİDRAT SINDİRİMİ: TEMEL KAVRAMLAR

Sindirim sistemi, alınan gıdaların parçalanarak vücut için kullanılabilir besin öğelerine dönüştürülmesini sağlar. Bu süreç, mekanik ve kimyasal aşamalardan oluşur. Sindirilen besinler kana geçerek hücrelerin enerji ihtiyacını karşılar ve metabolik süreçlerde rol alır. Protein sindirimi, mide ve

ince bağırsakta gerçekleşmektedir. Midede pepsin enzimi proteinleri daha küçük polipeptitlere parçalar. İnce bağırsakta pankreastan salgılanan tripsin, kimotripsin ve karboksipeptidaz gibi enzimler bu polipeptitleri amino asitlere dönüştürür. Bu amino asitler ince bağırsaktan emilerek kana geçer. Sindirilebilirliğin belirlenmesinde esansiyel amino asitlerin düzeyi ve özellikle triptofan miktarı önemli bir göstergedir (Çevikkalp vd., 2016).

Karbonhidrat sindirimi ağızda başlar. Tükrükteki amilaz enzimi nişastayı parçalar. Midede karbonhidrat sindirimi sınırlıdır. İnce bağırsakta pankreatik amilaz, nişastayı maltoz, maltotrioz ve dekstrinlere dönüştürür. Bu ürünler bağırsak mukozasında bulunan maltaz, laktaz ve sükraz gibi enzimlerle monosakkaritlere ayrılır. Glikoz, fruktoz ve galaktoz ince bağırsaktan emilerek kana geçer. Nişastanın sindirimi hıza göre RDS (hızlı sindirilebilir), SDS (yavaş sindirilebilir) ve RS (dirençli) olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Goni vd., 1997). Yağ sindirimi ise ağızda başlamakla birlikte esas olarak ince bağırsakta gerçekleşir. Pankreas lipazı, safra tuzlarının emülsifiye edici etkisiyle trigliseritleri monoasilgliserol ve serbest yağ asitlerine parçalar. Bu ürünler misel formunda emilerek bağırsak hücrelerine geçer. Bu genel sindirim süreci, gıdalardaki besin öğelerinin biyoyararlılığını doğrudan etkiler. Siyez unu ile yapılan çalışmalarda, özellikle protein ve karbonhidrat sindirim hızlarının düşük olması ve dirençli nişasta oranlarının yüksekliği, fonksiyonel gıda potansiyelini artırmaktadır.

Protein

Gıda alımıyla sindirim sonrası bağırsak emiliminde kullanılacak protein miktarını tahmin etmede önemli bir faktördür ve diyetteki protein kullanımının etkinliğini belirtir (Almeida vd., 2015). Midenin ana hücreleri tarafından salgılanan pepsin enzimi protein sindirimini başlatır. Pepsin, pH'ı düşük asidik mide ortamında en aktif durumdadır ve protein kaynaklı gıdaların ana bileşeni olan kollageni sindirir (Akyüz ve Demir, 2009). Protein sindiriminin mideden sonraki aşaması, ince bağırsak proksimalinde pankreatik proteolitik enzimlerce (pankreatin, tripsin, kimotripsin, proelastaz ve karboksipolipeptidaz) gerçekleştirilir. İnce bağırsak aşamasında ise, bu enzimler yüksek asitleri ortaya çıkarır ve amino asitlerin hepsi intestinal hücrelerce emilirler. Kişi başı günlük amino asit emilim ihtiyacı 200 gramdır (Şengül, 2013). Bir gıdanın protein sindirilebilirliğinin biyoyaralılığı belirlenirken, tek başına amino asit bileşimi (amino asit kompozisyonu), yeterli değildir. Toplam protein sindirilebilirliği ve hangi aminoasitlerin sindirildiği, sindirilme oranları biyoyararlanım emilimi etkileyen etmenlerdir. Amino asitler kovalent olarak modifiye edilmiş yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) ile ayrılabilir. Gıdanın biyoyararlanımında protein içeriği, kişilerin incebağırsağının fizyolojik mekanizma emilimleri, amino asit kompozisyonu gibi parametreler de etkilidir (Clark, 2004). Bitkisel kaynaklı proteinlerin, hayvan proteinine karşı sindirilebilirlik oranları daha azdır (Becker ve Yu, 2013). Protein sindirilebirliği olumsuz etkileyen etmenler;

- Bitkilerdeki sert hücre çeperi
- Az etki gösteren bazı proteaz inhibitörleri
- İnhibe eden tanenlerin sindirim enzimleri
- Protein kompozisyonun ve çözünürlüğünün düşük olması
- Protein çözünürlüğü, enzimatik aktivite, ve protein sindirilebilirliğini engelleyen fitat (Harpaz vd., 2010)
- Sindirilebilirliği azaltan proteinlerideki disülfit bağı (Duodu vd., 2003).

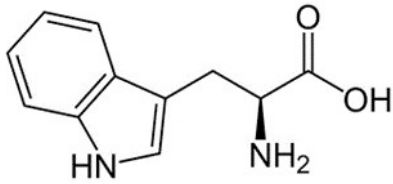
AminoAsitler

Proteinlerin temel yapı taşlarını amino asitler oluşturur ve gıdaların kalite ve besleyici yönünün belirlenmesindeki en önemli belirleyici kriterlerdendir (Ayaz vd., 2007). Metil grubu hidrojenlerinden birinin yerine, amin (NH_2) grubunun monokarboksilli organik asit grubundaki karbon (C) zincirine bağlanmasıyla oluşan organik bileşiklerdir. Proteinlerin yapısında yaklaşık 20 amino asit olduğu tespit edilmiştir, fakat daha fazla olduğu da belirtilmeltekdir. Amino asitlerin dışında da protein olan maddeler vardır (Demirci, 2014). Amino asitler Alanin, Arginin, Asparagin, Aspartik asit, Sistein, Glutamin, Glutamik asit, Glisin, Histidin, İzolösin, Lösin, Lizin, Metionin, Fenilalanin, Prolin, Serin, Treonin, Triptofan, Tirozin, Valine şeklinde sıralanır (Jimenez-Martin vd., 2012). Her bir amino asit vücut proteinlerinin bir bileşeni olmasının yanı sıra önemli fonksiyonlara da sahiptirtir. Ana bileşenleri olan 20 çeşit amino asit insan beslenmesindeki rolüne göre gruplara ayrılır. Bazı amino asitleri vücut sentezleyemez ve günlük olarak gıda ile dışardan alınması gerekir. Esansiyel (Ekzojen, Elzem) amino asitlerin dışarıdan alınması zorunludur ve esansiyel amino asitlerin biyolojik değeri, yüksek kalitede proteinler olduğunu gösterir. Birçok hayvansal protein bu gruptadır. Esansiyel olmayanları ise vücut sentezleyebilmektedir. Protein sindirilebilirliği ve biyoyararlanımı, günlük diyette esansiyel amino asitlerin ve esansiyel olmayan amino asitlerin N^+ miktarları ve oranları, protein kalitesini belirlemede temel öğedir (Gilani, 2012).

Triptofan

Esansiyel amino asit olan triptofan, vücutta farklı moleküllerin üretim sürecinde de yer alır. Canlı organizmanın gelişimi ve metabolizmanın normal işlevi için gerekli olan bir polar ve aromatik amino asitlerdendir. Proteinin besin değerini belirleyen en önemli kalite kriteri, esansiyel amino asitlerdir. Triptofanın en önemli özelliklerinden biri tüm amino asitler içinde en büyük yan zinicre (indol) sahip ve girmiş olduğu proteine o bölgede büyük bir hacim kazandırmasıdır. Triptofan gıdanın besleyiciliğinde, protein biyosentezi yaparken proteinin kalite değerlendirilmesinde ve canlının büyümesinde etkin rol alan amino asittir. Triptofan besin bileşimi yönünden veri tabanı içinde önemli bir yere sahiptir. (Majumdar, 1982). Triptofanın yüksek değerlerde

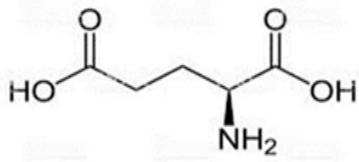
olması aminoasitlerin daha çok ortaya çıkması, pH oranını düşürür ve bu düşüş sindirilebilirlik oranının artışını bize bildirir. Triptofanın yüksek olması sindirilebilirlik açısından önemlidir ve sindirilebilirlik oranını gösterir (Çevikkalp vd., 2016).



Şekil 4. Triptofan $C_{11}H_{12}N_2O_2$

Glutamik asit

Glutamik asit esansiyel olmayan asidik amino asitlerden olup, en bol hücre içi amino asittir ve yan zinciri amidlerden oluşur. 2 ila 20 mM arasında konsantrasyonlarda olmaktadır (Newsholme vd., 2003). Protein sentezinde ve bozulmasında, azot metabolizmasında etkili olan, fizyolojik öneme sahiptir. Beyindeki en önemli transmitterlerden, öğrenme gibi temel nörolojik süreçlerde rol alan ve belleği oluşturan, alifatik amino asittir. Amonyağın temizlenmesi, hücre büyümesi, dokuların onarımı ve aralarında nitrojenin taşınması gibi işlevleri vardır. ATP üretimi için gastrointestinal sistem ve immun hücrelerde substrat olarak görev alan, serbest radikallere karşı hücreleri oksidatif hasardan koruyan antioksidandır (Urschel ve Lawrence, 2013).



Şekil 5. Glutamik asit $C_5H_9NO_4$

Nişasta

İnsan beslenmesindeki en önemli temel bitkisel karbonhidrat bileşenlerinden olan nişasta, vücutta temel enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Nişasta kimyasal yapısı incelendiğinde, amiloz, amilopektinden (D-glikozun homopolimerlerimden) oluşan bitkisel besinlerde bulunanan polisakkarittir. Amilopektinin zincir üzerinde dallı ve amilozun da lineer bir yapısı olduğu bilinmektedir. Amilopektinin her dalı 20-30 glikoz ünitesinden oluşmaktadır (Kotancılar, 2009). Amilozun ana bileşenleri ise glikozdur. Amiloz

granülünde çok düşük miktarlarda protein, fosfor, lipit ve mineral bulundurmasından dolayı besleyici, enerji verici değerinin yanında, birçok gıdanın bileşiminde yer alması nedeniyle, gıdalara önemli fonksiyonel özellikler de kazandırmaktadır. Isıl işlem sonucunda bağlar açılarak jelatinizasyon oluşur. Bu yapı yüksek viskozitelidir, stabil değildir zamanla jel halini alır (Candal, Kılıç ve Erbaş, 2016). Araştırmalar nişastanın alımıyla, nişasta jelatinleştirildiği için hızlı bir şekilde sindirilir ve emilip, hızlı bir şekilde glikozun kana karıştığını göstermektedir (Odenigbo vd., 2012). Gıdada tamamen sindirilemeyen maddelerin varlığının yanısıra, nişastanın bazı maddeleri de tamamen sindirilemez. Sindirilebilirlik ilk kez 1987'de Englyst ve vd. tarafından tarif edilmiş ve sindirilebilirliği hızı ve büyüklüğü gibi alt bölümlere ayırmışlardır. Çabuk sindirilebilenler (glikoz salınımı hızlı), yavaş sindirilebilenler (glikoz salınımı yavaş), sindirilemiyenler (dirençli nişastalar) şeklindedir (Stephen vd., 2012).

Enzime Dirençli Nişasta (EDN)

Enzime direnç gösteren, ince bağarsakta enzimatik hidrolize uğramayıp, kalın barsakda fermente olabilen nişasta fraksiyonu olarak tanımlanan ve dolayısıyla sindirime direnç gösteren nişasta türüdür (Candal, Kılıç ve Erbaş, 2016). EDN, sağlıklı insanların ince bağırsaklarında sindirilmeyen ve bu nedenle "sindirilemeyen karbonhidratlar" etiketi altında değerlendirilir. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), 2011 yılı itibariyle dirençli nişasta için fonksiyonel sağlık beyanlarını onaylamış, tokluk kan şekeri ve insülin düzenlenmesine fırıncılık ürünlerinde belli oranlarda kullanımının katkı sunabileceğini bildirmiştir. Türk Gıda Tebliğinde 1413 koduyla "Fosfatlandırılmış dinişasta fosfat" olarak ifadelendirilmiş olup ve yönetmelikte % 5'e kadar gıdalara ilave edilmesine izin vermiştir (TGK, 2017). EDN'nin ekmek, bisküvi, kraker, muffin, atıştırmalıklar gibi bazı hububat ürünlerinde kullanımına yönelik çalışmalar mevcuttur (Yue ve Waring 1998; Şeker vd., 2006). EDN bulunma formu gıdanın kendi doğal yapısından veya proses şartlarından kaynaklanabilir. EDN dört farklı şekilde bulunur;

1) Sindirim enzimleri tarafından fiziksel olarak ulaşılamayan yani lif materyali içinde paketlenmiş formda bulunan nişasta granülleri, örneğin tohum vb.

2) Ham patates ve yeşil muzda bulunan ham nişasta granülleri

3) Retrograde olmuş nişasta (pişirilmiş ve soğutulmuş patatesteki nişasta)

4) Kimyasal modifikasyonla üretilmiş nişasta

EDN, "fonksiyonel lif" gibi tanımlanmakta ve analizleri besinsel lif gibi yapılmaktadır. EDN'nin besinsel lif ile karşılaştırıldığında en önemli üstünlüğü insan metabolizmasında hızlıca fermente edilebilmesidir. Gıdaların

glisemik indeksini azaltan EDN'nin etkisi, esas olarak sindirim sistemi üzerinde kalın bağırsakta besinsel liflere göre daha kolay fermente edilebilmesi, prebiyotik olma potansiyelinin yanında bütirat ve kolonda bol miktarda kısa zincirli yağ asitleri üretmesi. Faydalı metabolitlerin üretimi nedeniyle bağırsak sağlığı, özellikle kolon kanserinin önlenmesi açısından da önem kazanmaktadır (Şeker vd., 2006; Stephen vd., 2012).

Karbonhidrat Sindirimi

Karbonhidrat sindirimi ağızda başlar. Nişasta ve glikojen tükürükteki α-amilaz etkisiyle ağızda enzimatik olarak hidroliz olup sindirilmeye başlar. Bazı sindirim modellerinde, çiğnemeyi taklit eden amilaz varlığı, oral sindirim fazını da içerir (Kamiloğlu, 2016). Mide ve ince bağarsakda devam eden emilim de özellikle burada gerçekleşip sonlanır (Şengül, 2013) Oligosakaritler ve polisakaritler, sindirimle birlikte monosakaritlere parçalanır ve emilim gerçekleşir. Karbonhidrat sindiriminde, emilimin esas geçekleştiği yer ince bağırsaktır. Karbonhidrat emilimi ve absorpsiyonu, bağırsağın tüm uzunluğu boyunca meydana gelir. (Horton ve ark., 1995). İlk gastrik faz sırasında, numuneler mide fazında pepsin gibi gastrik enzimlerin varlığında pH 1,5-3 ve 37°C'de inkübe edilir. İnce bağırsağın üst kısmı duodenum daha sonra pH 7 olarak ve pankreas enzimleri ve safra tuzlarının sindirime katılmasıyla 37°C toplamda 2 saat inkübasyon sürecinden sonra, karbonhidrat sindirimi gerçekleşmiş olur. Karbonhidrat sindiriminde görev alan pepsin mide için, pankreatin, tripsin, kimotripsin, proteaz ve karboksipolipeptidaz başlıca pankreas kaynaklı proteolitik bağarsak sindirimi enzimlerdir (Venn ve Green, 2007).

Glisemik İndeks

Glisemik indeks (GI) kavramı, gıdanın tüketiminin ardından 2 saat içinde besinlerin gösterdiği glikoz yanıtlarının, standart olarak belirlenmiş bir gıdayla (genelde glikoz veya beyaz ekmekle) alanların karşılaştırılması, oranının yüzde değeridir (Frost ve Dronhorst, 2000). Her bir gıdadaki karbonhidratın sadece belirli bir şekere (glikoza) ne kadar hızlı dönüştüğünü gösteren ölçüdür. GI kavramı Jenkins vd. 1980'lerin başında, karbonhidratların sindiriminden sonra kandaki en hızlı glikoz seviyelerinin belirleme sistemi olarak ifadelendirmişlerdir. FAO/WHO (2009), tarafından gıdaların kan şekerini yükselten ölçü birimi olarak glisemik indeks kavramını oluşturulmuştur ve referans sindirilebilir karbonhidrat miktarları için 50 g olarak belirlenmiştir (Mızrak, 2016). Hesaplamada kullanılan formül altta verilmiştir.

$$\mathbf{GI} = \frac{\textit{Test edilen gıdanın 50 g oluşan glikoz yanıt için eğri altında kalan alan}}{\textit{Referans gıdanın 50 g oluşan glikoz yanıt için eğri altında kalan alan}} \text{x}100$$

Karbonhidratlı diyetler, glisemik yükselmelere, insülin salgılayan sistemin bozulmasına, kandaki glikoz kontrolünün ayarlanamamasına, kilo artışına ve obezite oranlarında yükselmelere neden olur (Şenol, 2018).

Bir gıdanın GI oranı:	Bir gıdanın GY oranı:
< 55 düşük	≤ 10 düşük
55-70 orta	11-19 orta
≥ 70 yüksek	≥ 20 yüksek

Gıdanın glisemik yük değeri (GY), tüketilen karbonhidret değerinin GI değeri ile çarpılması sonucu bulunur. Nişasta sindirim oranı ile GI arasında açık bir ilişki sözkonusudur (Garsetti vd., 2005). Nişastanın kendi yapısındaki farklılık, gıdadaki lif oranı, nişasta protein ilişkisi, gıdadaki besinsel önem taşımayan maddeler, gıdanın biyoyararlılık yönü, gıdaya uygulanan işlemler, gıdanın vücuda yavaş ve hızlı alımı glisemik indeksi etkileyen etmenlerdir (Englyst vd., 1992; Monro, Mishra ve Venn, 2010; Gibson, Schönfeldt, ve Pretorius, 2011).

MATERYAL VE METOT

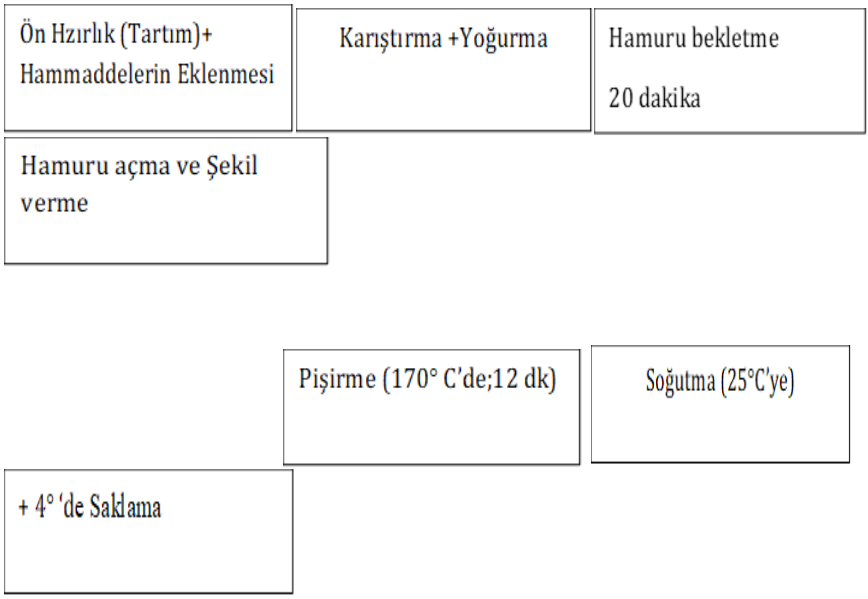
Çalışmada siyez unu ve buğday ununun farklı oranlarda herbir firma için (0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, 100:0) karışımları kullanılarak katkı maddesi içermeyen bebe bisküvileri üretilmiştir. Laboratuvar koşullarında hazırlanan bu ürünlerde protein sindirilebilirliği, nişasta sindirilebilirliği ve glisemik indeks değerleri belirlenmiştir.

Bebe Bisküvisi üretimi farklı firmadan siyez unu ve kontrol grubu olarak buğday unu, buğday nişastası, prinç nişastası, esmer şeker, likit süt, süt tozu, sirke, yağ, Peyniraltı Suyu Tozu (P.A.S.T.), B1 vitamini, kalsiyum karbonat, enzime dirençli nişasta (EDN) şeklinde formüle edilmiştir. (Tüm formülasyonlarda kullanılan EDN buğday nişastasından olup, tüzükte müsaade edilen % 5'lik ölçüyü aşmayacak şekilde kullanılmıştır). Belirli oranlarda ilave edilerek 26 çeşit (25 çeşit siyez un ve 1 çeşit normal un formülasyonlu) bebe bisküvi hamuru Şekil 1'de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Her biri ayrı yoğurma kaplarında, oda sıcaklığında 10 dk yoğurularak, hamurlar 20 dk. bekletildi. Elde edilen sert, kırılgan hamurlardan 3'er mm kalınlığında, 2 cm uzunluğunda bisküvi şekilleri elde edilmiştir (Ergin, 2011). Bebe bisküvileri 170°C'lik fırında 12 dk pişirilmiş ve oda

sıcaklığında 30 dk bekletilerek soğutulmuştur ve pişen bebe bisküvileri analiz aşamasına kadar +4° C'de hava ile teması kesilerek muhafaza edilmiştir. Laboratuvar ortamında üretilen siyezli bebe bisküvileri analizlerde kullanılmak üzere öğütücüde homojen ve küçük partiküller elde edilecek şekilde 30 sn öğütüldü.

Tablo 1: Farklı oranlardaki un yüzdelerinin kısaltma kodları

Paçal No	Siyez Un (%)	Normal Unu(%)	Kısaltma[1]
1	0	100	F
2	20	80	A1
3	40	60	A2
4	60	40	A3
5	80	20	A4
6	100	0	A5



Şekil 1. Siyezli bebe bisküvisi üretim akış şeması (Anonim, 2001; Sertakan, 2006)



Resim 1. Araştırmada kullanılan normal un ve çeşitleri



Resim 2. Siyez unu ile yapılan bisküvinin hamur ve bisküvi görüntüsü

Protein sindirilebilirliği için örnekler in vitro sindirim yöntemine tabi tutulmuş ve sindirim öncesi-sonrası amino asit profilleri HPLC cihazı kullanılarak incelenmiştir. Özellikle triptofan miktarındaki değişim protein kalitesinin göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

UFLC-HPLC Yöntemi Ile Amino Asit Profillerinin Tanımlanması (6N HCl)

Esansiyel amino asit profilleri belirlenirken Dimova (2003) ve Gheshlaghi vd., (2008) oluşturdukları yöntem kullanılmıştır. Güçlü bağlarla bağlı olan amino asitlerin kuvvetli asit olan 6 N HCl asit ile parçalanması prensibine dayanmaktadır. UFLC (Ultra Fast Liquid Cromatography) yönteminde kuvvetli asit olan 6 N HCl hidrolizi ile kovalent bağlar kopar ve amino asitler serbest hale gelir. Amino asit kompozisyon (UFLC-UV dedektör yöntemi ile) analizinde, ultraviyole detektörlü yüksek performanslı sıvı kromatografisi kullanılmaktadır. Kuvvetli asit hidrolizinden sonra türevlendirme aşaması da 'Edman Prensibi' esasında dayanmaktadır. Bu prensibe göre, numuneye eklenen asetonitril:metanol:trietilamin azotla uçurularak, amino asitler fenilizotiyosiyanatla reaksiyona girerek feniltiyokarbamil (PITC) türevlerini oluşturmaları sağlanır ve numuneler UFLC-UV dedektörde okutulur.

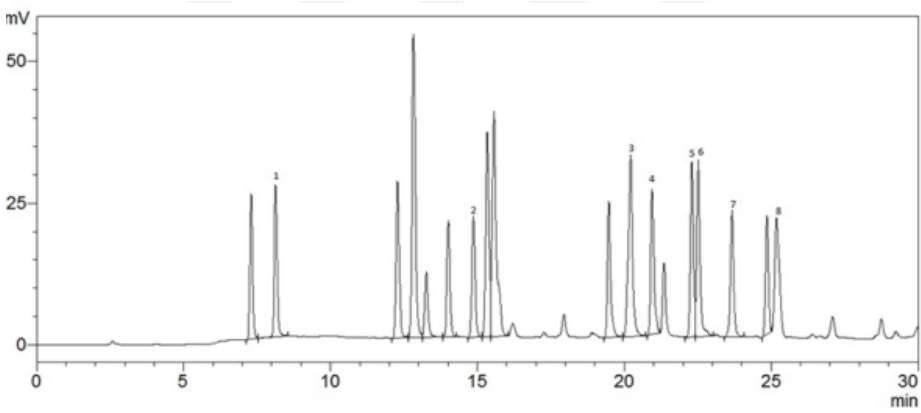
Amino Asit Kompozisyonu Ön Aşaması

50 mL'lik ağzı kapalı cam amber şişelere, öğütülmüş 0,5 g Siyezli Bebe bisküvi numunesi konuldu ve üzerine 20 mL 6 N HCl eklenerek ağzı sıkıca kapatıldı.
110°C 24 saat Etüvde bekletilerek hidrolize edildi.
Numuneler oda sıcaklığına getirilip adi filtre kağıtlarından süzüldü.

Süzüntüden 0,2 mL alınıp HPLC öncesi bütün türevlendirme aşamaları gerçekleştirilirilerek numuneler HPLC'ye konuldu.

Türevlendirme

0,2 mL numune test (cam) tüplere konuldu. Üzerine 0,1 mL acetonitril (ACN) eklendi ve 50°C'lik evaoratördev azot gazı ile uçuruldu. 0,5 mL ACN tekrar konularak uçurma tekrarlandı. Tüp içindeki kalıntıya 0,5 mL ACN:Metionin:Trietilamin karışımından ve 0,1 mL PITC türevlendirme çözeltisi ilave edildi 40°C etüvde 30 dk türevlendirildi. N gazı altında 40°C'de uçurulduktan sonra üzerine 0,2 mL CAN ilave edildi ve 40°C'de tekrar uçuruldu. 0,2 mL ultra saf su ile yıkandı ve 40°C'de tekrar uçuruldu. Üzerine 5 mL 0,02 M amonyum-asetat çözeltisi eklendi, manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. 22 µm CA filtre UFLC'den viallere süzülerek HPLC cihazına uygun koşullarda konuldu ve kromotogram görüntüleri alındı (Dimova, 2003 Gheshlaghi vd., 2008). Esansiyel amino asit (treonin, alanin, prolin, trezin, valin, izö-losin, lösin, fenilalanin, lizin ve glutamik asit) profili.



Şekil.2. Esansiyel Amino asit kompozisyonu Glutamik asit (1), treonin (2), valin (3), metiyonin (4), izolösin (5), lösin(6), fenilalanin(7) ve lizin (8) kromatogram görntüsü

Triptofan Analizi (5N NaOH)

Tritofan analizinde asidik parçalanma analizleri yerine daha iyi sonuç veren bazik hidroliz (5 N NaOH) yöntemi kullanılmıştır (Neilsen ve Hurrell, 1985). Numunedeki triptofanın tamamının % oran olarak tespit edilebilmesi ve kayıpları minimize edebilmek için bazik hidroliz daha fazla etkili olmaktadır. Üründeki nişasta 5N NaOH ile parçalanır ve proteinler daha fazla açığa çıkar. Protein konsantrasyonlarının molar hesaplamalarında NaOH protein için kullanılan en etkili alkalidir. Doğal floresan ve florometrik yöntemle, yaygın olarak türevlendirme olmadan triptofan içeriğinin belirlendiği metottur (Delgrada vd.,2006).

Bazik Hidroliz Analiz Aşaması (5 N NaOH)

0,5 mL örnek 20 mL 5N NaOH ile ağzı 50 mL'lik kapalı amber cam şişeye alındı, 110°C'de 24 saat hidrolize edildi.

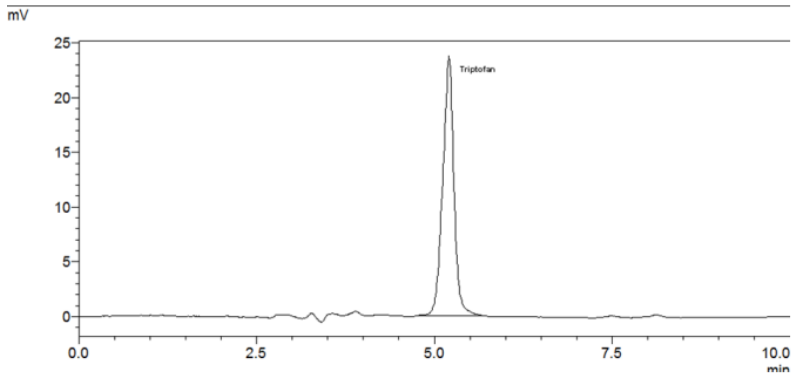
Örnekler oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakıldı, hacimleri 50 mL ultra saf su ile tamamlandı.

Filtre kağıdından süzüldü, süzüntüden 1mL test tüpüne alındı ve üzerine 15 mL PO_4 tamponu eklendi, 0,1 N HCl çözeltisi ile pH 6,3'e ayarlandı.

Hacmi deionize su ile 100 mL tamamlandı, 0,45 µm'lik filtreden geçirilerek süzüldü ve viallere alındı. HPLC'de oluşan kromatogram pikleri alınarak değerler bulundu.

Triptofan flörasan karakterindedir. Diğer amino asitlerde işlem aşaması daha çok olduğu için standart sapma oranı daha yüksek çıkar. Elde edilen aşağıdaki kromotogram görüntüsündeki piklerin alan hesabından sindirilebilirlik

oranları hesaplandı. Bu çalışmada protein kalite kriteri olan triptofan değerleri alkali hidroliz yöntemiyle HPLC cihazında kromotogramları dikkate alınarak hesaplamalar yapıldı ve değerleri ortaya konuldu. Kromotogramdaki çıkan pik alanı veya kosantrasyon, standardın örnekle ve seğreltme oranın karşılaştırılmasıyla triptofan hesaplanmıştır (Çevikkalp vd., 2016).



Şekil 3. HPLC Triptofan Kromatogram görüntüsü

İn Vitro Triptofan Analizi

Analiz in vitro sindirim metodu prensibine göre yapılmıştır (Clark, 2004). Alkali hidroliz sonucu, proteinden sıvıya geçen dipeptidler ve ondan da açığa çıkan amino asitler sindirilmiş olanlardır. Sindirilmiş olanlar serbest dolaşan amino asitler ve HPLC'de bunlar tespit edilir. Gıdadan sıvıya geçen biyoyararlılık miktarı, sindirilebilirlik olarak hesaplanır. HPLC'de UV dedektör, ters-faz kolon (ACE 5 C18, 250 x 4,6 mm), Kolon sıcaklığı 40°C, dalga boyu 254 nm, enjeksiyon hacmi 10 µL ve akış hızı 1 mL/dk koşullardadır. Analizde HCl, PO4 tampon, pepsin, pankreatin, %20 TCA çözeltisi kullanıldı.

Mide Solüsyonu: 0,6 g (Siyezli bebe bisküvi numune için) 0,2 N HCl pH 1,5 40 mL çözelti manyetik karıştırıcıda karışırken üzerine 0,02 g pepsin (domuz mide mukozundan, 250 IU/mL) eklenerek ve 4-5 dk karıştırıldı.

İnce Bağırsak Solüsyonu: 0,026 g pankreatin (domuz pankreasından, 250 x/USP) + 4 mL ultra saf suyla homojen bir solüsyon olana kadar vortekslenerek karıştırıldı.

İn Vitro Protein Sindirilebilirlik Analiz Aşamaları

0,6 g örnekten tartıdı ve 2,5 mL ultra saf su ile vortekslenerek çözüldü. Hazırlanan mide solüsyonu (0,2 N 40 mL'lik HCl pH 1,5 getirilerek manyetik karıştırıcıda iken, üzerine 0,020 g) numunelerin her birine konuldu ve tamamen çözündürüldü, 37°C çalkalamalı su banyosunda 30 dk inkübe edildi

Numunelere KPO4 tamponu ilave edilerek pH 7'ye getirildi. İnce bağarsak solüsyonu (0,260 mg 4 mL su karıştırıcıdayken üzerine ilave edilerek homojen bir karışım elde edildi) numunelere eklendi.

37°C 150 dk çalkalmalı su banyosunda inkübasyona tabi tutuldu.

Herbir numunelere 0,5 mL TCA ilave edilerek pH 3'e getirilerek en az 1 sa beklendi, enzimlerin reaksiyonu sonlandırıldı.

10 dk 6000 rpm santrafüj yapıldı, supernatan kısmı tüplere alınarak hacimleri ölçüldü daha sonra HPLC öncesi türevlendirme yapıldı.

Türevlendirme:
0,2 mL numune filtrelerden geçirilerek cam tüplere alındı, üzerine 0,1 mL acetonitril konuldu, manyetik karıştırıcıda karıştırılarak N gazı evaparatöründe 50°C 30 dk uçuruldu. Kalıntı 0,2 mL saf suyla yıkanarak N gazı altında tekrar uçuruldu. Tüp içindeki kalıntıya 0,5 mL asetonitril konarak manyetik karıştırıcıdan sonra N gazı ile uçurma işlemi yapıldı. Tekrar kalıntı üzerine 0,5 mL asetonitril:metanol:trietilamin karışımı ve 0,1 mL türevlendirme çözeltisi (PITC) ilave edilerek manyetik karıştırıcıdan sonra 40°C 30 dk N gazı ile uçurma işlemi yapılarak türevlendirildi. 0,2 mL tekrar asetonitril ile ilave edildi, N gazı altında uçuruldu. 0,2 mL ultra saf su ile yıkandı N ile 40°C de uçuruldu. Kalan kalıntının üzerine 5 mL 0,02 M amonyum asetat ($C_2H_2NO_2$) tampon çözelti eklendi. Manyetik karıştırıcıdan sonra N gazı altında uçuruldu. 0,2 µm'lik filtreden süzülerek UFLC sistem viallere konuldu ve ölçüm yapıldı (Dimova, 2003; Gheshlaghi vd., 2008). Kromotogramdaki çıkan pik alanın hesabına göre triptofan ve protein sindirilebilirliği hesaplanmıştır (Çevikalp vd., 2016).

Karbonhidrat Sindirilebilirliği
Karbonhidrat sindirilebilirliği, nişastanın farklı fraksiyonlara ayrılmasıyla belirlenmiştir. Bunun için de Spektrofotometre UV-VİS cihazı kullanılmıştır. RDS (hızlı sindirilebilir), SDS (yavaş sindirilebilir) ve RS (dirençli nişasta) değerleri hesaplanmıştır. Glisemik indeks, Goni, Garcia ve Calixto (1997) tarafından geliştirilen yöntemle hesaplanmıştır.
Çalışmada kullanılan beş farklı marka siyez unu ve kontrol grubu olarak kullanılan buğday unu, piyasadan temin edilmiştir. Numuneler standardize edilmiş laboratuvar koşullarında üretilmiştir. Ölçümler, her grup için tekrarlanarak istatistiksel analizler yapılmış ve sonuçlar ortalama ± standart sapma şeklinde raporlanmıştır. Nişasta tayini AOAC Method 996.11 yöntemine göre yapılmıştır. Glisemik indeks analizi Englyst ve ark. (1992) bazı modifikasyonları ile, in vitro yöntem kullanılarak yapılmıştır. Karbonhidrat sindirim ve GI süreleri 20, 30, 60, 90 ve 120. dakikalarda numuneler alınarak belirlenmiştir (Yaman, Sargın ve Mızrak, 2019).

Nişasta Tayini

Goni vd. (1996) oluşturdukları metottan esinlenilerek analiz yapılmıştır. Hazırlanan örneklerdeki nişasta tayininde AOAC Metot (996.11 metodu) kullanıldı. Metoda göre öğütülmüş numuneden 0,1 g alındı, 50 mL plastik falkon tüplerine konulup, 0,2 mL C_2O_5OH (% 80 v/v) eklendi ve dispersiyonu sağlamak için vortekslendi. Hazırlanan karışıma 2M KOH çözeltisinden 2 mL ilave edildi ve buz/su banyosunda (magnetic stirrer bar 5×15 mm) ile 20 dk bekletildi. Her bir tüp içine 8 mL 1 M Na-asetat (pH 3,8) çözeltisi eklenip, tekrar magnetik stirrerde bekletilerek karıştırıldı. Üzerine 0,1 mL thermostable α-amilaz ve 0,1 mL amiloglikozidaz (AMG) enzimleri ilave edilerek 50°C'de çalkalamalı sıcak su banyosunda 30 dk bekletildi ve enzimatik inkübasyon gerçekleştirildi. Hacim deiyonize su ile 50 mL'ye tamamlanarak 10 dk 4000 rpm'de santrifüj edilerek ve supernatan kısmından bir miktar alındı, 45 µpm CA filtre ile süzüldü. 10 mL'lik cam tüplere süzüntüden 0,1 mL konulup 3,0 mL GOPOD reaktifi eklendi. 50°C 20 dk çalkalamalı su banyosunda inkübe edildikten sonra 510 nm absorbanslı spektrofotometrede (UV-1280 Shimadzu) ölçüldü ve D-glikoz standart çözeltisinin (1 g/mL) absorbansı kör numuneyle karşılaşılaştırılarak okundu. Hesaplamada glikozun absorbans değeri 1mg/g cinsindendir. Kör çıkarılıp, glikoz oranlandı ve değerlerin ortalamaları alındı. Ortamdaki toplam glikoz miktarı, ortama salınan glikozdur. Elde edilen sonuçlarla sindirim sırasında salınan glikoz, hidrolize edilmiş nişasta olarak kabul edildi, kaydedilen absorbans 0,9 dönüşüm faktörüyle çarpılarak toplam nişasta miktarı bulunmuş oldu (Yaman, Sargın ve Mızrak, 2019). Sonuçlar, sindirilmiş nişastanın yüzdesi olarak rapor edildi. RS'de bu metotla hesaplandı (Chung, Shin, ve Lim, 2008; Nakov vd., 2019).

Nişasta Fraksiyonlarını Hesaplama Yöntemleri

TS : Toplam nişasta, TS = TG × 0,9

RDS : Hızlı sindirilebilir nişasta, RDS = G20 × 0,9

SDS : Yavaş sindirilebilir nişasta, SDS = (G120 - G20) × 0,9

RS : Enzime Dirençli Nişasta, RS = TS - (RDS + SDS)

RAG : Şeker ve nişastanın 20 dakikalık inkübasyonunda glikoz salınımı

SAG : 120 dakika inkübasyonda şeker ve nişastanın glikoz salınımı

İn Vitro GI Analizi

İn vitro nişasta sindirilebilirliği Englyst ve arkadaşları (1992) tarafından standartlaştırılan metoda göre yapıldı. Yöntemin prensibi in vitro olarak mide

ve ince bağarsakta simüle edilmesine dayanır ve ortama yayılan glikoz miktarı tespit edilir (Yaman, Sargın ve Mızrak, 2019).

İn Vitro GI Analiz Aşamaları

16 öğütülmüş kuru numuneden 1'er g 50 mL falkon tüplerine kondu, 5 mL deionize saf su ile vortekslendi. Hazırlanan mide solüsyonundan 10'ar mL halinde her bir falkon tüpüne konuldu. (0,05 N 200mL HCl + 1g pepsin + 1g guar-gam karışımı pH 1,5±0,2 37°C 30 dk çalkalamalı su banyosunda inkübe edildi.

(0,5 M) Na-asetatla pH 5±0,3'e getirildi. Her bir tüpe ince bağarsak solüsyonu (pankreatin ezimi) ilave edildi (2,72 g + 30 mL deionize saf su ile tamalandı) 2 dk 10000 rpm'de santrifüjlendi.

Her bir tüpe 0,34 mL amiloglikozidaz (AMG) eklendi, 1'er mL invertaz enzimi konuldu, her biri erlenmayere alınarak hacimleri 100'e tamamlandı. Çalkalamalı su banyosunda 37°C' de inkübe edildi. İlk 20 dk'da 0,5 mL cam tüplere alınarak 100°C'de 5 dk denatüre edildi. Aynı işlem 30, 60, 90 ve 120. dakikalarda da tekrarlandı.

15 mL falkon tüplerine alınarak hacim 5 mL'e tamamlandı, 2 dk 5000 rpm santrifüj edildi. Cam tüplere 0,1 mL alındı. 3 mL bir kör (blank) ve standart D-glukoz (β glukozinat kit) den 0,1 mL alındı, üzerine 3 mL GOPOD (Glikoz Oksidaz Peroksidaz Enzim Reagent çözeltisi) ilave edildi. Bütün tüpler 20 dk 50°C inkübe edilerek soğutuldu. 510 nm Spektrofotometrede ölçüm yapılarak okundu ve sonuçlar hesaplandı.

GI genel olarak tahmini glisemik indeks (pGI) yenildikten 2 saat sonra besinlerin gösterdikleri glikoz yanıtlarının, standart beyaz ekmeğin alımından sonraki gösterdiği glikoz yanıtına göre yüzde değeri olarak hesaplanır (Çiftçi vd., 2008). pGI değerleri, in vitro sindirim kinetiği Goni, Garsia-Alonso ve Saura-Calixto (1997) tarafından, doğrusal olmayan bir modelleme yapılmıştır ve oluşturulan denklem aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$GI = 39{,}71 + 0{,}549.\ HI$$

Hidroliz indeksinin (HI) her bir test numunelerininin 0-180 dk arasındaki parçalanma davranışları, örnek HI değerinden, test numunesinin hidroliz eğrisi altındaki alanın AUC referans alınan beyaz ekmek için elde edilen alana oranlanması ile elde edilip, değerler de matematik modellemesiyle formülüze edilmiştir.

$$AUC = C\infty\ (tf\text{-}t0)\text{-}(C\infty/k)[1\text{-}\exp[-k(tf\text{-}t0)]]$$

SİYEZ UNU İLE ÜRETİLEN BEBE BİSKÜVİLERİNDE SİNDİRLEBİLİRLİK BULGULARI

Protein Sindirilebilirliği

Çalışmada siyez unu farklı oranlarda (0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20, 100:0) ve buğday unu (kontrol) ile formüle edilerek katkısız bebe bisküvileri üretilmiş ve in vitro protein sindirilebilirliği değerlendirilmiştir.

HPLC analizleri ile sindirim öncesi ve sonrası değerler incelenmiştir. Amino asit profili incelendiğinde, bazı esansiyel amino asitlerin oranlarının çok yüksek olmayıp ve özellikle triptofan düzeylerinin sindirilebilirlik üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Triptofan miktarının artışı, proteinin kalite göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Siyez unu oranı yüksek formülasyonlarda triptofan miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, siyez ununun protein kalitesine katkı sağladığını göstermektedir.

Analizler sonucunda, genel itibarı ile protein sindirilebilirliği en yüksek değerinin %100 siyez unu içeren formülasyonda göstermiştir. B5 kodlu numunede sindirilebilirlik %82 olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, siyez ununun protein biyoyararlılığı açısından üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

Amino Asit Kompozisyon Bulguları

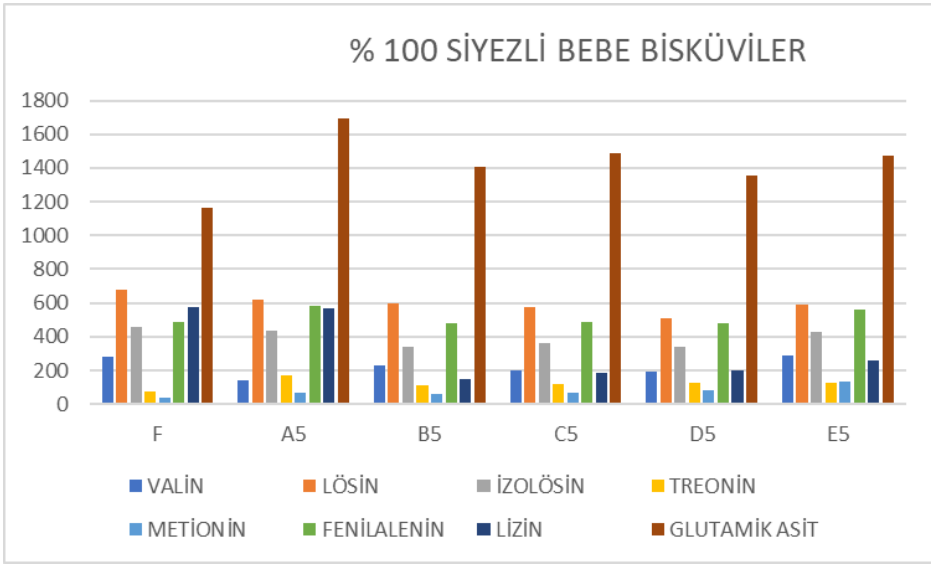
Proteinler, bir veya daha fazla uzun amino asit kalıntısı zincirinden oluşan büyük biyomolekül ve makromoleküllerdir. Protein sentezinde amino asitlerin (AA) önemi büyüktür. Normal un ve 5 farklı siyez unu ile yapılan bisküvilerin AA profilleri valin, lösin, izolösin, treonin, metionin, fenilalanin, lizin ve Glutamik asit üzerinden belirlenerek sonuçlar Tablo.1'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde valin F (normal un) kodlu numunede 279±3 mg/100g iken en yüksek E5: 292±3mg/100g ve A5: 138±3 mg/100g ile en düşük olandır. Lösin F: 680±5 mg/100g, en yüksek A5: 620±4 mg/100g, en düşük D5: 510±4 mg/100g'dır. İzolösin F:458± 4 mg/100g, en yüksek 435±3 mg/100g ile A5, en düşük değer D5: 340±3 mg/100g değeridir. Treonin F: 75±1mg/100g, en yüksek A5: 168±2 mg/100g, en düşük B5:110±1 mg/100g'dır. Metionin F:39±1 mg/100g, E5:135±2 mg/100g, en düşük B5:61±1 mg/100g. Fenilalanin F:487±5, en yüksek değer A5:580±5 mg/100g, en düşük B5:478±4 mg/100g. Lizin F:579±5 en yüksek A5:579±5 mg/100g, en düşük B5:146±2 mg/100g. Esansiyel olmayan glutamik asitte ise F:1162±11 mg/100g, en yüksek A:1693±11mg/100g, D5:1352±8 mg/100g değeriyle en düşük olandır. Bu sonuçlara göre A5 firmasının valin ve metioninin haricinde hepsinde en yüksek olduğu, B5 firmasının ise, treonin, metionin, fenilalanin, lizin ve glutamik asit yönünden en düşük olduğu tespit edilmiştir. Normal una göre firmaların, %100 siyez unu ile yapılan bebe bisküvileri karşılaştırıldığında lösin, izolösin ve lizin değerleri daha yüksek bulunmuştur. TGK, (2001) göre Bebek ve Küçük Çocuk ek besinlerinde AA referans değer olarak valin 6,7 g/100g; İzolösin 5,4 g/100g; lösin 9,4 g/100g; lizin 8,1 g/100g, metionin 2,8 g/100g; fenilalanin 5,2 g/100g; treonin 4,7 g/100g verilmiştir. Bu

çalışmadaki sonuçlara göre siyezli bebe bisküvisi AA değerleri düşük çıkmıştır.

Türkomp Ulusal Gıda Kompozisyon Veri Tabanı'nda (2017)'e göre ise bebe bisküvisinin; treonin 97 mg/100gr; izolösin 242 mg/100gr; lösin 459 mg/100gr; lizin 184 mg/100gr; metiyonin 125 mg/100gr; fenilalanin 318 mg/100gr; valin 280 mg/100gr; glutamik asit 539 mg/100g'dır. Bu sonuçlara göre siyezli bebe bisküvisi lösin, izolösin, treonin, fenilalanin, lizin, glutamik asit yönünden yüksek, valin, metionin yönünden ise düşük olduğu tespit edilmiştir. Abd-el Aal vd., 1996 yılında siyez ve diğer çeşitli buğday ürünleri ile yaptıkları çalışmada, siyezli unlu üründe glutamik asit yönünden zengin 3,7; lizin 1,9 ve treoninin 2,6 valin 3,3; fenilalanin 5,4; lösin 5,9 (g/100kg) yönünden düşük olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma ile tez çalışmasındaki siyezli bebe bisküvisi karşılaştırıldığında, kendi arasındaki grupta en yüksek değerler olan valin E5:2,9±3, treonin A5:1,6±2 (mg/100g) daha düşük çıkmıştır. Acquistucci, D'egidio ve Vallega (1995) yaptıkları bir aştırmada 15 adet siyez buğdayı ve 2 adet modern buğdayın amino asit profilini incelemiştir. Tüm numunelerin valin, lösin, izolösin, treonin, alanin değerleri düşük ve birbirinden farklı tespit edilmiştir. Yapılan birçok çalışma siyez ununun ve ürünlerinin bazı AA değerlerinin düşük olma nedeninin ürün hazırlanırken ve analizin ön aşamalarında, amino asitlerin diğer malzemeler ile etkileşime girdiğini ve ısı etkisi ile değiştiğini göstermektedir.

Tablo 2. Siyezli Bebe Bisküvi Formülasyonlarının %100 AA Kompozisyon Değerleri (mg/100g)

VALİN	LÖSİN	İZOLÖSİN	TREONİN	METİONİN	FENİLALENİN	LİZİN	GLUTAMİK
F	279±3	680±5	458±4	75±1	39±1	487±4	579±5	1162±11
A5	138±2	620±4	435±3	168±2	67±2	580±5	570±5	1693±11
B5	229±2	600±4	342±3	110±1	61±1	478±4	146±2	1408±10
C5	203±3	578±3	359±3	121±2	65±1	489±5	187±2	1485±10
D5	195±2	510±4	340±3	125±2	83±2	480±4	197±3	1352±8
E5	292±3	589±4	428±4	129±2	135±2	558±5	262±3	1470±9



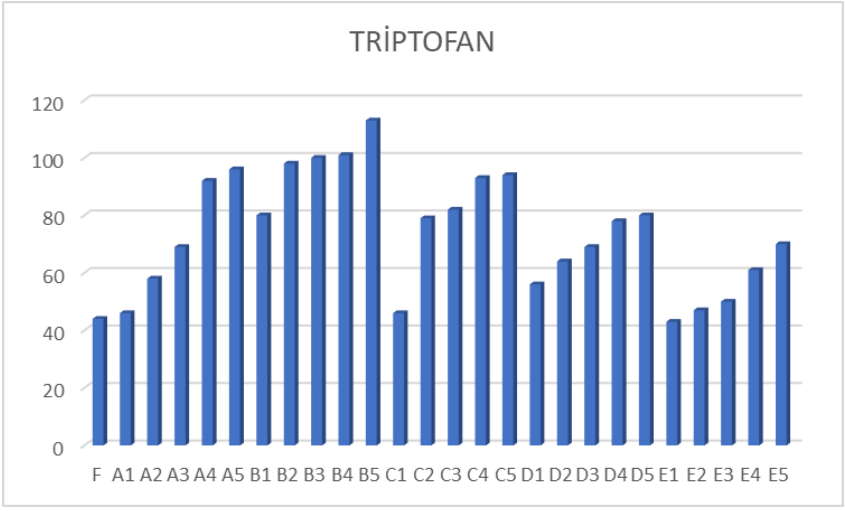
Şekil 4. % 100 Siyezli Bebe Bisküvi EAA Kompozisyon Değerleri (mg/100g)

Sindirim Öncesi Triptofan Bulguları

Proteini oluşturan Amino asitlerden triptofan, protein sindirilebilirlik göstergelerinden biridir (Diem, Bergmann and Herdrich, 2000). Bu nedenle triptofan analizi tüm numunelerde sindirim öncesi ve sonrası şeklinde değerlendirilmiştir. Numunelere ait sindirim öncesi triptofan değerleri Tablo.3'de verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde, tüm numunelerde triptofan değerinin normal undan yüksek olduğu ve siyez un miktarı arttıkça triptofan miktarının da arttığı görülmektedir. Türkomp Veri Tabanı (2017)'nda normal un ile üretilmiş bebe bisküvisinin triptofan değeri 68 mg/100g olarak standartlaştırılmıştır. Çalışmış olduğumuz 26 numuneden 16 adedinin triptofan değerinin Türkomp standart değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Normal unlu bebe bisküvisi (F) triptofan değeri 44±5 mg/100g olup, standart değerden düşük tespit edilmiştir. Yüksekten düşüğe doğru numunelerimize ait triptofan değerleri B5:113±10 mg/100g, A5: 96±9 mg/100g, C5:94±7 mg/100g, D5:80±7 mg/100g, E5:70±6 mg/100g'dır. En yüksek triptofan değerine sahip olan B, en düşük olan ise E firmasıdır. Yine de E Firmasının tritofan değeri, normal unlu olan (F) dan yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlara göre siyez unlu ürünlerindeki triptofan değerlerinin daha fazla olması, siyezli ürünlerin protein değerlerinin yüksek olduğunu bize göstermektedir.

Tablo 3.Sindirim öncesi triptofan değerleri

Örnek	Triptofan	Örnek	Triptofan
F	44±5	D1	56±6
A1	46±7	D2	64±6
A2	58±6	D3	69±7
A3	69±6	D4	78±9
A4	92±8	D5	80±7
A5	96±9	E1	43±2
B1	80±9	E2	47±3
B2	98±9	E3	50±4
B3	100±9	E4	64±4
B4	101±11	E5	70±6
B5	113±10		
C1	46±5		
C2	79±8		
C3	82±6		
C4	93±7		
C5	94±7		



Şekil 5. Sindirim Öncesi Triptofan Değerleri m/100g

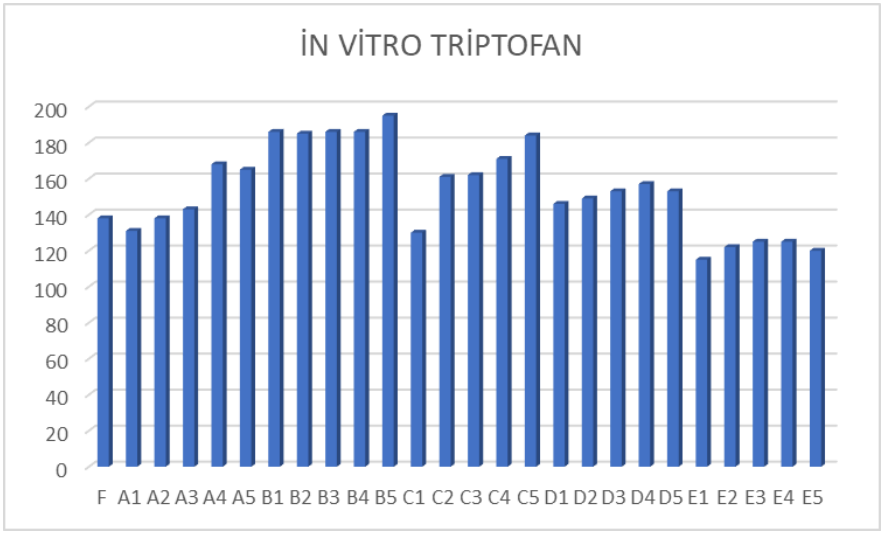
Sindirim Sonrası İn-Vitro Triptofan Değerleri (mg/100g)

İn vitro ortamda numunelere ait sindirim sonrası triptofan sonuçları Tablo 4.'de verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde, tüm numunelerin triptofan değerlerinin sindirim sonrası artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca formülasyonlarda siyez un miktarı arttıkça sindirim sonrası triptofan miktarında da artış olduğu görülmektedir. Buna göre F değeri 138±7 mg/100g değeri iken, en yüksek in vitro triptofan 195±4 mg/100g değeriyle B5 firmasıdır. Artışın en az olduğu ise 132±3 mg/100g değeriyle E5 kodlu ürünümüz olmuştur. Sndirim öncesi analiz verilerileri ile karşılaştırıldığında kayıp olmadığı görülmüştür.

Abd-el Aal ve Hucl 2002 yılında, siyez buğdayı, durum buğdayı, HRS buğdayı, kılçıklı ve kılçıksız buğday ürünleriyle yaptıkları in vitro bir çalışmada, sırasıyla in vitro triptofan oran ortalamaları 86,8 mg/100g; 86,7 mg/100g; 86,9 mg/100g; 86,6 mg/100g; 86,9 mg/100g olarak tespit etmişlerdir. Siyezli bebe bisküvi sonuçlarına ait triptofan değerleri daha yüksek çıkmıştır**.** T. *dicoccum* buğdayı, T. *durum* buğdayı ve T. *polonicum* çeşitleriyle üretilen makarnaların in vitro çalışma yapan bir grup araştırmacı, 60, 59, 66 (mg/100g) triptofan değerleri sonuçlarını bulmuşlardır (Simonata, Curioni ve Pasini, 2015). Ürünümüz in vitro triptofan değeri olarak diğer yapılan araştırmalarla kıyaslandığında daha yüksek tespit edilmiştir. Bu da bize siyez un oranı arttıkça triptofan oranının arttığını göstermektedir.

Tablo 4. Sindirim sonrası Triptofan Değerleri

Örnek	Triptofan
F	138±7
A1	131±8
A2	138±7
A3	148±4
A4	168±5
A5	165±3
B1	169±5
B2	185±4
B3	186±5
B4	186±3
B5	195±4
C1	130±3
C2	161±3
C3	162±5
C4	171±4
C5	184±7
D1	146±5
D2	149±3
D3	156±3
D4	157±6
D5	158±5
E1	123±4
E2	122±5
E3	125±2
E4	131±2
E5	132±3



Şekil 6. Sindirim sonrası triptofan değerleri

% Protein Sindirilebilirliği Bulguları

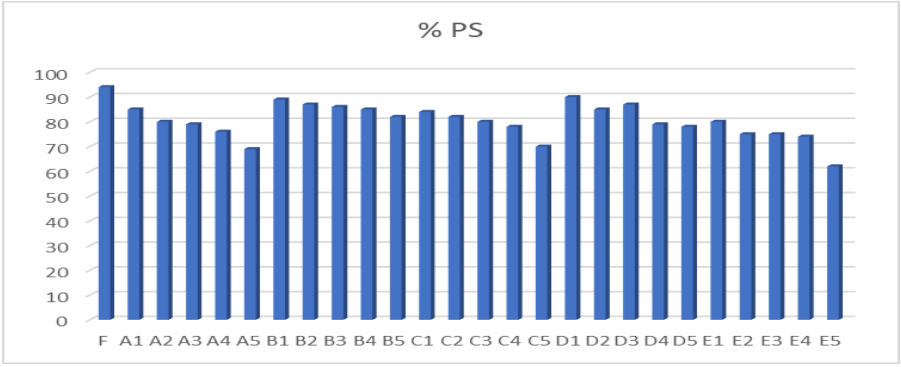
Bir proteinin biyoerişebilirliği öncelikle sindirilebilirliğine bağlıdır. Bir proteinin sindirim sisteminde ne kadarının parçalanıp emilebildiğini gösteren bir ölçüttür. Genellikle, vücuda alınan proteinin ne kadarının vücut tarafından kullanılabildiğini değerlendirmek için hesaplanır. Protein biyosentezinde görev alan triptofan, protein sindirilebilirliğinin en önemli göstergesidir. % Protein sindirilebilirliği, in vitro triptofan değerinin, alkali hidroliz triptofan değerine oranlanmasıyla elde edilir. Vücudun emilimi, fireler de dikkate alınarak işlem yapılır.

Numunelere ait % protein sindirilebilirlik değerleri Tablo 5.'de verilmiştir. Buna göre siyez unlu bebe bisküvilerinin protein sindirilebilirliği siyez oranı arttıkça azalma göstermiştir. F kodlu numunede %86 iken, A kodlu numunede PS değeri %85'ten %69'a, B kodlu numunede %89'dan %82'e, C kodlu numunede %84'ten %70'e, D kodlu numunede %90' dan %65'e ve E kodlu numunede %80'den %62'e düşmüştür. Buda siyez ununun GI değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır, çünkü GI değeri düştükçe protein sindirimi de düşmektedir. Düşme nedeninin diyet lif oranı ve kepekli yapıda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Lifli yapı proteinleri tutar ve bağlarından parçalanması daha zor olduğu için proteinler açığa çıkamaz, dolayısıyla sindirilme oranı da düşmüş olur. Antinutrients kompleksleri oluşum esnasında protein ile etkileşime girdiğinden, çapraz bağlanma derecesini arttırarak proteinin çözünürlüğünü azaltır ve protein komplekslerini proteolitik çekimlere daha az duyarlı hale getirir ve böylece protein sindirilebilirliğini olumsuz yönde etkiler (Alonso vd., 2000). Gıdaların işlenmesi esnasında buğday proteinleri dahil olmak üzere protein sindirilebilirliği önemli ölçüde

değişmektedir (Brennan, 2012). Çalışmamızda da unun kepek ve lif oranının yüksek olması PS değerinin düşmesine neden olmuştur. Buğdayın protein sindirilebilirliği %85 ile %95 arasındadır (FAO, 2013; Juillet vd., 2008). Bos vd., (2005) yapmış oldukları bir çalışmada buğday içeren kahvaltılık atıştırmalarının protein sindirilebilirliğini %86 ile %95 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Yine kahvaltılık gevreklerle yapılan bir çalışmada nişasta içeriği yüksek yulaf ezmesi ve meyveli kahvaltılık gevreğin protein sindirilebilirlikleri araştırılmıştır. Tahıl içeren kahvaltılık gevreklerin PS değerlerinin %63 ile %88 arasında olduğu tespit edilmiştir. (Sargın, 2019). Çalışmamıza ait sonuçlar literatür bilgileri ile örtüşmektedir.

Tablo 5. % PS (Protein Sindirilebilirlik Oranları)

Örnek	**% PS**	**Örnek**	**%PS**
F	86	D1	90
A1	85	D2	85
A2	80	D3	83
A3	79	D4	79
A4	76	D5	78
A5	69	E1	80
B1	89	E2	75
B2	87	E3	75
B3	86	E4	73
B4	85	E5	62
B5	82		
C1	84		
C2	82		
C3	80		
C4	78		
C5	70		



Şekil 7. % Protein Sindirilebilirlik Oranları

Karbonhidrat Sindirilebilirliği ve Nişasta Fraksiyonları

Çalışma Karbonhidrat sindirilebilirliği açısından elde edilen sonuçlara bakıldığında, siyez oranı arttıkça karbonhidrat sindiriminin yavaş olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle hızlı sindirilebilir nişasta (RDS) oranı ise düşük çıkmıştır, dirençli nişasta (RS) miktarı yüksektir. Bu sonuç, siyez ununun sindirim sürecini dengelediğini ve enerji salınımını daha uzun süreye yaydığını göstermektedir.

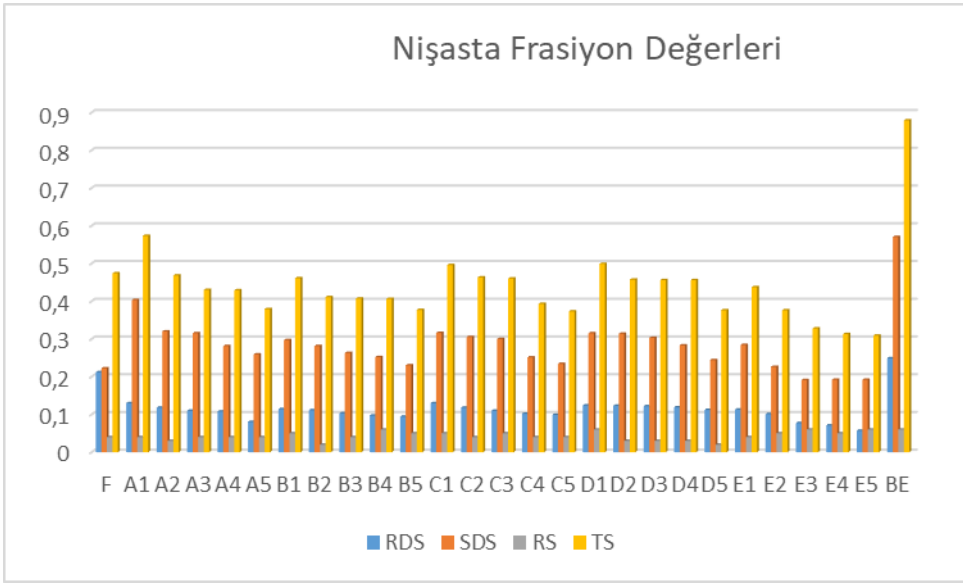
Nişasta Fraksiyon Bulguları

Siyez Bebe bisküvilerine ait nişasta bulguları Tablo 6.'de verilmiştir. Elde edilen tüm değerler Goni vd. (1996) metodundan yararlanılarak hesaplanmıştır. Tablo 6. incelendiğinde toplam nişasta BE (beyaz ekmek) 0,879±1,2; en yüksek toplam nişasta (TS) içeriği formülasyonda %20 siyez unu kullanılan A firmasına ait A1 kodlu numunede 0,573±0,8 olarak, en düşük TS değeri ise formülasyonda %100 siyez unu kullanılan E firmasına ait E5 kodlu numunede 0,307±0,3 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi siyez un oranı arttıkça, TS değeri düşmektedir. Gıdadaki nişastanın varlığı sindirilebilirliği artırır, çünkü α-amilaz pişirme sırasında oluşan gluten-nişasta kompleksini hidrolize eder (Smith vd., 2015). Hızlı sindirilebilirlik (RDS) değerinde BE:0,249±0,05 olarak, en yüksek RDS değeri F'den farklı olarak A1 ve C1 kodlu numunelerde 0,130±0,03; en düşük RDS değeri ise E5 kodlu numunede 0,057±0,01 olarak tespit edilmiştir. Yavaş sindirilebilirlik (SDS) değeri en yüksek A1 kodlu numunede 0,403±0,06; en düşük ise E5 kodlu numunede 0,190±0,03 değeridir. RS değerlerinde ise en yüksek B1, D4, E3 ve E5 kodlu numunelerde 0,06±0,02 olarak hesaplanmıştır. Tablo 6.'daki sonuçlara göre numunelerde siyez un oranı attıkça, RDS, SDS, TS değerleri azalmaktadır. Değerlerimize referans olarak alınan BE (Beyaz ekmek) ile kıyaslandığında siyez un oranı arttıkça nişasta sindirilme oranı da artmıştır, siyez unlu ürünlerdeki orantısal artış, nişasta sindiriminde artış olarak görülmektedir. Nakov vd., (2018) siyez ile üretilen kurabiyelerde in vitro nişasta sindirimi ile ilgili yapmış oldukları çalışmada %100 siyez ile üretilen

kurabiyelerin nişasta sindiriminin 120 dakikaya kadar, %100 ekmeklik buğday ile benzer olduğu, ancak 180. dakikada daha düşük olduğunu bildirmektedir. Yapılan başka bir çalışmada siyez buğdayında nişasta oranı (g/100g'da) 61,2-61,8; ekmeklik buğday da ise 62,4-70,0 g/100g olarak tespit edilmiştir. (Hidalgo ve Brandolini, 2014).

Tablo 6. Nişasta Fraksiyonları RDS, SDS, RS, TS Değerleri

Örnek	RDS	SDS	RS	TS
F	0,212±0,05	0,222±0,04	0,04±0,001	0,474±0,7
A1	0,130±0,03	0,403±0,06	0,04±0,001	0,573±0,8
A2	0,118±0,02	0,320±0,05	0,03±0,001	0,468±0,6
A3	0,110±0,02	0,315±0,06	0,04±0,001	0,430±0,6
A4	0,108±0,02	0,281±0,03	0,04±0,001	0,429±0,5
A5	0,080±0,01	0,259±0,04	0,04±0,001	0,379±0,4
B1	0,114±0,02	0,297±0,04	0,05±0,001	0,461±0,7
B2	0,111±0,02	0,281±0,04	0,02±0,001	0,411±0,6
B3	0,103±0,02	0,263±0,04	0,04±0,001	0,407±0,7
B4	0,097±0,02	0,252±0,03	0,06±0,002	0,406±0,6
B5	0,094±0,02	0,230±0,03	0,05±0,002	0,377±0,3
C1	0,130±0,03	0,316±0,05	0,05±0,001	0,496±0,7
C2	0,118±0,02	0,305±0,05	0,04±0,001	0,463±0,5
C3	0,110±0,03	0,300±0,05	0,05±0,002	0,460±0,8
C4	0,102±0,02	0,251±0,03	0,04±0,001	0,393±0,2
C5	0,099±0,02	0,234±0,03	0,04±0,001	0,373±0,3
D1	0,124±0,03	0,315±0,05	0,06±0,002	0,499±0,6
D2	0,123±0,02	0,314±0,04	0,03±0,001	0,457±0,5
D3	0,122±0,02	0,303±0,04	0,03±0,001	0,456±0,5
D4	0,119±0,02	0,283±0,03	0,03±0,001	0,456±0,5
D5	0,112±0,02	0,244±0,03	0,02±0,000	0,376±0,4
E1	0,113±0,02	0,284±0,03	0,04±0,001	0,437±0,5
E2	0,101±0,00	0,226±0,03	0,05±0,002	0,376±0,4
E3	0,077±0,01	0,192±0,03	0,06±0,002	0,319±0,3
E4	0,071±0,01	0,191±0,03	0,05±0,002	0,312±0,3
E5	0,057±0,01	0,190±0,03	0,06±0,002	0,307±0,3
BE	0,249±0,05	0,570±0,07	0,06±0,003	0,879±1,2



Şekil 7. Nişasta Fraksiyonları RDS,SDS,RS,TS Değerleri

Glisemik İndeks Sindirilebilirlik Bulguları

Gıda maddesinin karbonhidrat sindirimi ve emilim hızını etkileyen birçok faktör GI değerini etkilemektedir. Besinin yapısı, sindirilme oranı, geçiş zamanı, hazırlanma şekli, olgunluğu, protein ile yağ içeriği, lifin miktarı ve türü, yapısındaki nişastanın şekli (amiloz veya amilopektin oranının baskın olması), monosakkarit bileşenleri, α-amilaz inhibitörleri gibi bileşikleri sindirilebilirlik şartlarıdır (Wong vd., 2010). Siyezin lifli içeriğinin fazla olması, β-glukan gibi bileşenlerden kaynaklanan glukozun hızlı sindirimine engel olmaktadır. Bilindiği gibi, yüksek lif içeren bileşenler glukozun hızlı sindirimini engelleyerek yavaşlatmaktadır (Memiş ve Şanlıer, 2009).

Nişasta in vitro sindirimi 0, 20, 30, 60, 90 ve 120. dakikalar ila 180. dakika arasında, sindirim süresinin artmasıyla nişastanın bozulumu ve parçalanması artmıştır. Çalışmamızda nişasta sindirimi ile siyez un yüzdesi arasında net bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Tablo 7. ya göre numunelerin, hidroliz indeksi (HI), ürünlerden oluşan hidroliz eğrisinin altındaki alanın, refrans (Beyaz ekmek) numuneyle karşılaştırılmasıyla; glisemik indeks (GI) değeri ise hidroliz indeksten yararlanarak hesaplanmıştır (Goni vd. 1997). BE tahmini glisemik indeks (pGI) değeri, formülde beyaz ekmek hidroliz indeksi HI değeri 100 olarak kabul edilmiş olup, 94,4 olarak hesaplanmıştır. Numunelere ait sonuçlar beyaz ekmekle karşılaştırılmıştır. F (normal bebe bisküvisi) kodlu numuneye ait hidroliz indeks (HI) değeri BE'den yüksek tespit edilmiştir. Bunun sebebinin formülasyonlardaki şeker, nişasta gibi maddelerin de artı olarak kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 7. incelendiğinde HI ve pGI en yüksek C1 kodlu numunede sırası ile 110,3±0,5,

110,5±0,5 olarak, en düşük değer ise E5 kodlu numunede 65,5±5,7; 75,7±3,2 olarak tespit edilmiştir. Numunelerimize ait GI değerleri ise en yüksek C1 kodlu numunede 70,9±0,4; en düşük E5 kodlu numunede 53,0±2,2 olarak tespit edilmiştir. Bu da ters orantılı olarak siyez un oranı arttıkça GI oranının düştüğünü göstermektedir. Yine Siyez un oranları üründe arttıkça 20, 30, 60, 90 ve 120. dakikalarda in vitro gerçekleşen sindirimde GI ve pGI değerleri orantısal olarak düşmektedir. Çatak (2019) yulaflı, şekerli ve şekersiz bisküvilerde yaptığı in vitro glisemik indeks araştırmasına göre bisküvilerin HI değerlerinin 81,5 ile 109,6 arasında, GI değerlerinin ise 59,1 ile 69,9 arasında olduğunu tespit etmiştir. Çalışmamıza ait sonuçlar yukarıdaki literatür ile karşılaştırıldığında numunelerimize ait HI ve GI değerleri daha düşüktür. Bu da ilk 20. dakikada sindirimin hızlı bir şekilde, 120. dk ise sindirim yavaş bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. GI değerinin yükselmesini pişirme koşulları etkilemektedir. Pişme esnasında hücre duvarının yapısı ve granül yapısı jelatinizasyonu bozarak glisemik indeks değerini arttırmaktadır (Nayak vd., 2014). Selüloz çözünmez yüksek lif içeriği sayesinde düşük glisemik indekse sahiptir (Foster-Powell vd., 2002). Yüksek selüloz, çözünmez lif içeriği glisemik indeksin düşük olmasına neden olur (FosterPowell, Holt, ve Brand-Miller, 2002). Diyet liflerindeki değişimler ürünlerdeki sindirilebilirliği de etkilemektedir. Brennan (2009) işlenmiş gıdalarda yavaş sindirilebilen nişasta SDS miktarını arttırma ile glisemik indeks oranını azaltmanın mümkün olabileceğini bildirmektedir. Çalışmamızda da en düşük glisemik indekse sahip numunenin en yüksek RS değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, RS içeriğinin glisemik indeksi etkilediği düşünülmektedir. Nakov vd., 2019 yılında nişasta sindirimi ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlardaki arpa ve buğday unu karışımlarından (100:0, 70:30, 50:50, 30:70, 0: 100), çeşitli tatlandırıcılar (sükroz, glikoz çözeltisi ve bir sakkaroz ve glikoz çözeltisi) kullanarak bisküvi üretilmiştir. Numunelerin Laboratuvar ortamında nişasta sindirim değerlerinin 0, 60, 120 ve 180 dakikalık hidroliz süresi boyunca arttığını tespit etmişlerdir. Nakov vd. (2018) bir başka in vitro çalışmalarında %100 siyez unlu kurabiyelerin nişasta sindiriminin 120 dakikaya kadar %100 buğday ekmeğine benzer olduğunu, ancak 180. dakikada daha düşük olduğunu bildirmektedir.

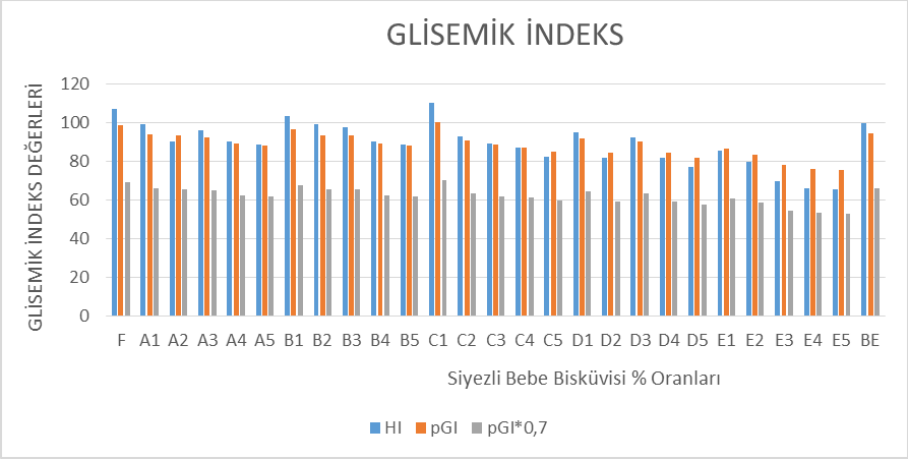
Tablo 7. HI, pGI, pGI*0,7 Değerleri

Örnek	HI	pGI	pGI*0,7
F	107,2±4,4	98,6±2,4	69,0±1,7
A1	99,2±1,2	94,1±0,6	65,9±0,5
A2	90,2±1,3	93,6±0,8	65,5±0,9
A3	96,2±4,5	92,5±2,5	64,8±1,7
A4	90,2±3,1	89,2±1,8	62,4±1,4
A5	88,8±3,5	88,4±1,9	61,9±1,3
B1	103,7±2,9	96,6±1,6	67,6±1,1
B2	99,2±2,7	93,6±1,7	65,5±1,2
B3	97,7±2,5	93,3±1,4	65,3±1,0
B4	90,2±3,2	89,2±1,7	62,4±1,3
B5	88,9±4,8	88,5±2,6	62,0±1,8
C1	110,5±0,5	100,5±05	70,3±0,4
C2	93,0±2,1	90,7±1,3	63,5±1,6
C3	89,3±3,6	88,7±2,0	62,1±1,4
C4	87,0±3,5	87,4±2,1	61,2±1,3
C5	82,4±5,1	85,0±2,8	59,5±2,0
D1	94,9±6,9	91,8±3,8	64,3±2,7

D2	82,0±3,7	84,7±2,5	59,3±1,9
D3	92,3±5,7	90,4±3,2	63,3±2,2
D4	82,0±4,2	84,7±2,8	59,3±2,0
D5	77,2±2,8	82,1±1,5	57,5±1,1
E1	85,6±6,9	86,7±3,8	60,7±2,7
E2	80,0±5,1	83,63±15	58,5±2,3
E3	69,8±4,9	78,0±2,4	54,6±1,7
E4	66,2±4,5	76,0±2,3	53,2±1,3
E5	65,5±5,7	75,7±3,2	53,0±2,2
BE	100,0±0,0	94,6±0,0	66,2±0,0

Çalışmada toplam 26 farklı formülasyon değerlendirilmiştir. Bu numuneler içinde en düşük glisemik indeks (GI) değerleri %100 siyez unu içeren E5, E4 ve E3 kodlu ürünler olarak saptanmıştır.

E5: 53,0 ± 2,2; E4: 53,2 ± 1,3; E3: 54,6 ± 1,7 değerleri, literatürde düşük GI'li bisküviler için bildirilen 59,1–69,9 aralığından daha aşağıda bulunmuştur. Bu bulgu, siyez ununun glisemik tepkiyi belirgin şekilde azalttığını göstermektedir (Barone vd., 2019).



Şekil 9. HI, GI, pGI*0,7 değerleri

Gı ve % Protein Sindirilebilirlik Aralarındaki İlişki

Analizler sonucunda, siyez unu oranı arttıkça glisemik indeks değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir, fakat % protein sindirilebilirliğinde düşüş daha az olmuştur. Bu durum, siyez ununun yüksek lif, dirençli nişasta, fitik asit ve polifenol içeriği ile ilişkili bulunmuştur.

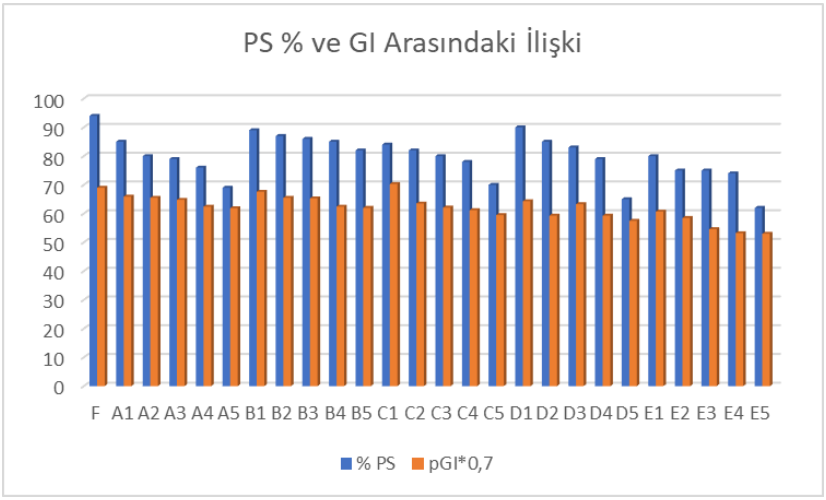
GI ve protein sindirilebirliği arasındaki ilişkiyi gösteren değerler Tablo 8.de verilmiştir. En düşük GI değeri 53,0±2,2 ve en düşük PS değeri %62 değeri ile E5 kodlu numunedir. Tablodaki tüm değerler incelendiğinde siyez un oranı arttıkça GI ve % PS değerinin doğru orantılı olarak çok sert ve fazla düşüşler olmasa da belli miktarda düştüğü görülmektedir. Yapılan bazı araştırmalarda tahıl ve baklagil gibi bitkisel protein kaynaklı yapıların, hayvansal protein kaynaklarına göre daha az sindirilebilirliğe sahip olduğu bildirilmektedir (Becker ve Yu, 2013). GI değeri siyez un oranı yükseldikçe % PS değerleri de düşme eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni de bitkilerin diyet lif oranın yüksek olması ve liflerin proteinleri tutması, ayrıca kullandığımız bazı siyez un firmalarının kepek oranının fazla olması proteinlerin serbest kalmasını engellemektedir. Azalmanın bir diğer nedeni ise, doğal proteinlere eklenen şeker ve aralarındaki etkileşimdir. Ayrıca bu azalma, proteinin bir kısmının termal çapraz bağlanması ve sindirim için kullanılamaz hale getirilmesinin bir sonucu olabilir (Rooney vd., 1986). Sumathai ve Pattabiraman (1976)'nın

tanımladıkları fitik asit ve polifenollerin varlığının, proteinin yapısını etkileyebilecek çözünmeyen kompleksler oluşturan proteinlerle ilişkilendirildiği bilinmektedir. Çalışmamıza ait sonuçlar, litaratür bilgileri ile uyum gösterse de protein sindirilebilirliği çok düşük çıkmamıştır.

Sonuç olarak, siyez unu katkılı bebe bisküvilerinde hem protein hem de karbonhidrat sindirilebilirliği açısından önemli farklılıklar elde edilmiştir. Bu bulgular, siyez ununun fonksiyonel özelliklerini ortaya koymakta ve özellikle düşük GI değerleriyle sağlıklı beslenmeye katkı sunduğunu göstermektedir.

Tablo 8. GI ve PS arasınadaki ilişki

Örnek	% PS	pGI*0,7
F	86	69
A1	85	65,9
A2	80	65,5
A3	79	64,8
A4	76	62,4
A5	69	61,9
B1	89	67,6
B2	87	65,5
B3	86	65,3
B4	85	62,4
B5	82	62
C1	84	70,3
C2	82	63,5
C3	80	62,1
C4	78	61,2
C5	70	59,5
D1	90	64,3
D2	85	63,3
D3	83	63,3
D4	79	59,3
D5	65	57,5
E1	80	60,7
E2	76	58,5
E3	75	54,6
E4	74	53,2
E5	62	53



Şekil 10. GI ve PS arasındaki ilişki

TARTIŞMA

Bu çalışmada siyez unu ile üretilen bebe bisküvilerinin protein ve karbonhidrat sindirilebilirliği ile glisemik indeks değerleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, siyez ununun besinsel üstünlüklerini ve fonksiyonel gıda üretiminde kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

Protein Sindirilebilirliği Açısından Değerlendirme

Analizler sonucunda, siyez unu oranı arttıkça protein sindirilebilirliği değerlerinde artış gözlenmiştir. %100 siyez unu ile formüle edilen numunelerde protein sindirilebilirliğinin en yüksek düzeye ulaşması, bu buğday türünün protein biyoyararlılığı bakımından önemli olduğunu göstermektedir. Bu durum literatürde siyez buğdayının yüksek protein içeriği ile ilişkilendirilen bulgularla uyumludur (Abdel-Aal vd., 2004).

Ayrıca triptofan düzeylerinin korunması, proteinin kalitesine işaret etmektedir. Triptofanın özellikle sindirim sonrası varlığını sürdürmesi, siyez ununun protein kalitesini artırıcı etkisini desteklemektedir.

Karbonhidrat Sindirimi ve Glisemik İndeks Üzerine Etkiler

Karbonhidrat sindirilebilirliği sonuçlarına göre siyez unu oranı arttıkça sindirimin yavaşladığı ve dirençli nişasta oranının yükseldiği belirlenmiştir.

Bu bulgu, siyez ununun enerji salınımını dengeleyici etkisini ortaya koymaktadır.
Glisemik indeks bulguları ise siyez unu ile üretilen bisküvilerin düşük GI değerine sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle E5, E4 ve E3 kodlu ürünlerde saptanan GI değerleri (53,0 ± 2,2; 53,2 ± 1,3; 54,6 ± 1,7), literatürde düşük GI'li bisküviler için bildirilen aralığın altında kalmıştır. Bu durum, siyez ununun kan şekeri kontrolü açısından avantaj sağladığını göstermektedir.

Fonksiyonel Gıda Potansiyeli
Siyez ununun yüksek lif, polifenol, fitik asit ve dirençli nişasta içeriği hem protein sindirilebilirliği hem de glisemik indeks üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bileşenler, sindirimin yavaşlamasına ve kan şekeri düzeylerinin dengelenmesine katkı sağlamaktadır.
Bu bulgular, siyez ununun yalnızca bebek beslenmesi için değil, aynı zamanda diyabet, obezite ve kardiyovasküler hastalıkların önlenmesine yönelik fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında da kullanılabileceğini göstermektedir. Literatürde siyez buğdayının düşük GI değeri, yüksek antioksidan kapasitesi ve zengin mineral içeriği ile sağlığa katkıları vurgulanmaktadır (Roberts, 2000; Ludwig, 2002; Barret, 2013; Zaharieva ve Monneveux, 2014).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada siyez unu ve buğday ununun farklı oranlarda kullanılmasıyla üretilen bebe bisküvilerinde protein ve karbonhidrat sindirilebilirliği ile glisemik indeks verileri değerlendirilmiştir. Bulgular, siyez ununun besleyici özellikleri ve fonksiyonel katkıları açısından önemli sonuçlar ortaya koymuştur.

Sonuçlar

- Madde 1 Siyez unu oranı arttıkça protein sindirilebilirliği değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. %100 siyez unu ile üretilen bisküvilerde sindirilebilirlik en yüksek düzeye ulaşmıştır.
- Madde 2 Amino asit profili incelendiğinde, esansiyel amino asit oranlarının yüksek olduğu ve özellikle triptofan düzeylerinin protein kalitesi açısından önemli bir gösterge olduğu saptanmıştır.
- Madde 3 Karbonhidrat sindirilebilirliği açısından siyez unu katkısı, sindirimin yavaşlamasına ve dirençli nişasta miktarının artmasına

neden olmuştur. Bu durum, kan şekeri kontrolü açısından avantaj sağlamaktadır.

- Madde 4 Glisemik indeks değerleri incelendiğinde, siyez unu oranı yüksek olan formülasyonların düşük GI değerlerine sahip olduğu görülmüştür. %100 siyez unu ile üretilen bisküvilerde glisemik indeks değerleri, literatürde bildirilen düşük GI'li bisküvilerin alt sınırında bulunmuştur.

Öneriler

Siyez unu, besleyici özellikleri, yüksek protein kalitesi, düşük glisemik indeks değeri ve fonksiyonel bileşenleri ile bebek ve çocuk beslenmesinde güvenle kullanılabilecek bir hammadde niteliği taşımaktadır. Bu özellikleriyle yalnızca bebekler için değil, aynı zamanda diyabet ve obezite riski taşıyan bireyler için de fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesine katkı sunabilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda:

Madde 1 Farklı işleme yöntemlerinin siyez ununun biyoyararlılığı üzerindeki etkilerinin araştırılması

Madde 2 Uzun dönemli klinik çalışmalarla siyez ununun sağlık üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

Madde 3 Siyez unu katkılı farklı ürün gruplarının geliştirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak siyez unundan üretilen bebe bisküvileri, fonksiyonel gıda niteliği taşıyan sağlıklı ve katkısız ürünlere yönelik artan talebe önemli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Abdel-Aal, E. S. M., ve Hucl, P. (2002). Amino acid composition and in vitro protein digestibility of selected ancient wheats and their end products. *Journal of Food Composition and Analysis, 15*(6), 737–747.

Abdel-Aal, E. S. M., Hucl, P., ve Sosulski, F. W. (1995). Compositional and nutritional characteristics of spring einkorn and spelt wheats. *Cereal Chemistry, 72*(6), 621–624.

Abdel-Aal, E. S. M., Young, J. C., Rabalski, I., Hucl, P., & Fregeau-Reid, J. (2002). Identification and quantification of seed carotenoids in selected wheat species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52*(11), 3393–3398.

Abdel-Aal, E. S., & Hucl, P. (2014). Einkorn: a functional wheat for developing high-lutein whole grain baked products. *Cereal Foods World*, 59(1): 5-10.

Abdel-Aal, E. S. M., Hucl, P., & Sosulski, F. W. (1995). Compositional and nutritional characteristics of spring einkorn and spelt wheats. *Cereal Chemistry* , 72 (6): 621-624
Acquistucci, R., D'Egidio, M. G., & Vallega, V. (1995). Amino acid composition of selected strains of diploid wheat (*Triticum monococcum* L.). *Cereal Chemistry, 72*(2), 213–216.
Akar, T., Cengiz, M. F., & Tekin, M. (2019). A comparative study of protein and free amino acid contents in some important ancient wheat lines. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods,* 11(2): 191-200.
Akar, T., & Eser, V. (2017). Ülkemizde kavuzlu buğday tarımının dünü, bugünü ve yarını. *TÜRKTOB Dergisi.* http://www.turktob.org.tr/dergi/makaleler/html/index.html
Aktaş, H., Özberk, F., Oral, E., Baloch, F. S., Doğan, S., Kahraman, M., & Çığ, F. (2018). Türkiye'nin Güney Anadolu Bölgesinin buğday genetik kaynakları bakımından potansiyeli ve sürdürülebilir olarak korunması. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 7*(2), 47–54.
Akyüz, F. ve Demir, K. (2009). Gastrointestinal Fizyopatoloji. *Klinik Gelişim*, 22 (3), 77-80.
Almeida, C. C., Monteiro, M. L. G., da Costa-Lima, B. R. C., Alvares, T. S., & Conte-Junior,C. A. (2015). In vitro digestibility of commercial whey protein supplements. *LWT- Food Science and Technology*, 61(1):7-11.
Alongi, M., Melchior, S., & Anese, M. (2019). Reducing the glycemic index of short dough biscuits by using apple pomace as a functional ingredient. *LWT-Food Science and Technology*, 100, 300-305.
Alonso, R., Aguirre, A., & Marzo, F. (methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food chemistry*, 68(2): 159-165.2000). Effects of extrusion and traditional processing
Alphan, M. (2012). Bisküvi Sektör Notu. Orta Anadolu İhracatçılar Birlikleri Genel Sekreterliği, AR-GE Şubesi, S: 4-8.İstanbul.
Anonim, (2013b). Türkiye Cumhuriyeti Ekonomi Bakanlığı Bisküvi Sektör Raporları. İhracat Genel Müdürlüğü Tarım Ürünleri Daire Başkanlığı. http://www.ibp.gov.tr/pg/sektorpdf/tarim/biskuvi.pdf (Erişim tarihi: 07.04.2018)
Anonim, (2019a). Bisküvi Yapım Akış Şeması. www.eticicibebe.com.
Anonim, (2019-b). Dünya Bisküvi Pazarı ve Türkiye. Fırıncılık, Bisküvi ve Makarna Sektör İhtisas Dergisi Sayı:31. www.magazine.bbm.com/dunya-pazarı-ve-turkiye-2.
Atasoy, A. F., & Ertop, M. H. (2006). Fitik asit ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Türkiye 9. Gıda Kongresi*, Bolu.
Ayaz, F. A., Torun, H., Ayaz, S., Correia, P. J., Alaiz, M., Sanz, C., Gruz, J., & Strnad, M. (2007). Determination of chemical composition of anatolian carob pod (Ceratonia siliqua L.): sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. Journal of Food Quality, 30(6): 1040-1055.
Ayo, J. A., Ayo, V. A., Nkama, I., & Adewori, R. (2007). Physiochemical, In-Vitro Digestibility and Organoleptic Evaluation of Acha Wheat Biscuit Supplemented with Soybean Flour. Nigerian Food Journal, 25(1): 77-89.
Barbé, F., Ménard, O., Le Gouar, Y., Buffière, C., Famelart, M. H., Laroche, B., ... & Rémond,D. (2013). The heat treatment and the gelation are strong determinants of the kinetics of milk proteins digestion and of the peripheral availability of amino acids. Food Chemistry, 136(3-4): 1203-1212.

Barone, F., Laghi, L., Gianotti, A., Ventrella, D., Taneyo Saa, D., Bordoni, A., ... & Turroni, S. (2019). In vivo effects of einkorn wheat bread on intestinal microbiota, metabolome, and on the glycemic and insulinemic response in pigs. *Nutrients, 11*(1), 16.
Barrett, J. S. (2013). How to institute the low-FODMAP diet. *Journal of Gastroenterology and Hepatology, 28*, 25–32.
Barrett-Connor, E. (2013). The Rancho Bernardo Study: 40 years studying why women have less heart disease than men and how diabetes modifies women's usual cardiac protection. Global Heart, 8(2): 1-9.
Bayram, M. (2013). Siyez buğdayı ve ekmeği. *Gıda, 38*(1), 31–38.
Beğen, F. (2012). Yüksek Lif çerikli Bisküvi Üretiminde Lüpen (Lipunus albus L.)Kepeği Kullanımı Üzerine Bir Araştırma (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri, Ensititüsü.
Becker, P. M., & Yu, P. (2013). What makes protein indigestible from tissue-related, cellular, and molecular aspects? *Molecular Nutrition & Food Research, 57*(10), 1695–1707.
Bos, C., Juillet, B., Fouillet, H., Turlan, L., Daré, S., Luengo, C., ... & Gaudichon, C. (2005). Postprandial metabolic utilization of wheat protein in humans. *American Journal of Clinical Nutrition, 81*(1), 87–94.
Boukid, F., Prandi, B., Sforza, S., Sayar, R., Seo, Y. W., Mejri, M., & Yacoubi, I. (2017). Understanding the effects of genotype, growing year, and breeding on Tunisian durum wheat allergenicity. 2. The celiac disease case. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(28): 5837-5846.
Brandolini, A., Hidalgo, A., & Moscaritolo, S. (2008). Chemical composition and pasting properties of einkorn (Triticum monococcum L. subsp. monococcum) whole meal flour. Journal of Cereal Science, 47(3): 599-609.
Brennan, I. M., Feltrin, K. L., Nair, N. S., Hausken, T., Little, T. J., Gentilcore, D., ... & Feinle-Bisset, C. (2009). Effects of menstrual cycle phases on gastric emptying, glycemia, GLP-1, insulin and energy intake. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology, 297*(3), G602–G610.
Candal, C., Kılıç, Ö., & Erbaş, M. (2016). Enzime Dirençli Nişasta Üretim Yöntemleri Ve Gıda Endüstrisinde Kullanım Amaçları. The Journal of Food, 41(6): 419-426.
Calabretti, A., Calabrese, M., Campisi, B., & Bogoni, P. (2017). Quality and Safety in Commercial Baby Foods. Journal of Food And Nutrition Research, 5(8), 587-593
Cengiz, M. F., & Gündüz, C. P. B. (2013). Acrylamide exposure among Turkish toddlers from selected cereal-based baby food samples. Food and Chemical Toxicology, 60, 514-519.
Chung, H. J., Shin, D. H., & Lim, S. T. (2008). In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Research International*, 41(6): 579-585.
Clark, D. R. (2004). *Improving in vitro protein digestibility and determining protein nutritional quality by modelling* (Doctoral dissertation, University of Georgia).
Cooper, R. (2015). Re-discovering ancient wheat varieties as functional food. *Journal of Traditional and Complementary Medicine, 5*(3), 138–143.
Çevikkalp, S. A., Akyüz, A., Uslu, N., & Yıldırım, B. (2016). Determination of tryptophan in cereals by HPLC-FLD. *Food Chemistry, 193*, 26–29.
Çiftçi, H., Akbulut, G., Yıldız, E., & Mercanlıgil, S. (2008). *Kan şekerini etkileyen besinler* (1. Baskı). Sağlık Bakanlığı Yayınları.

Demirci, M. (2014). Gıda Kimyası (7. Baskı). Sayfa 101-106, İstanbul Gıda Teknoloji Derneği Yayın:40
De Vincenzi, M., Luchetti, R., Giovannini, C., Pogna, N. E., Saponaro, C., Galterio, G., & Gasbarrini, G. (1996). In vitro toxicity testing of alcohol-soluble proteins from diploid wheat triticum monococcum in celiac disease. Journal of Biochemical Toxicology, 11(6): 313-318.
Delgado-Andrade, C., Rufian-Henares, J., Jimenez-Perez, S., & Morales, F. J. (2006). Tryptophan determination in milk-based ingredients. *Food Chemistry, 98*, 580–585.
Diem, S., Bergmann, J., & Herderich, M. (2000). Tryptophan-N-glucoside in fruits and fruit juices. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(10), 4913-4917.
Dimov, I., & Stamatovska, V. (2018). Physical characteristics of functional biscuits enriched in einkorn flakes. *Ukrainian Journal of Food Science, 6*(1), 13–19.
Dimova, N. (2003). RP-HPLC analysis of amino acids with UV detection. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 56*(12), 12–75.
Duodu, K. G., Taylor, J. R. N., Belton, P. S., & Hamaker, B. R. (2003). Factors affecting sorghum protein digestibility. Journal of Cereal Science, 38(2): 117-131.
Dupont, D., Mandalari, G., Mollé, D., Jardin, J., Rolet-Répécaud, O., Duboz, G., ... & Mackie,A. R. (2010). Food processing increases casein resistance to simulated infant digestion. Molecular Nutrition & Food Research, 54(11): 1677-1689.
EFSA NDA Panel, (2013). Scientific Opinion 3448. EFSA Journal: http:/www.efsa.europa.eu./sites/default/files/scientific.output/files/main_dokuments/3 408
Englyst, H. N., Quigley, M. E., Hudson, G. J., & Cummings, J. H. (1992). Determination of dietary fibre as non-starch polysaccharides by gas–liquid chromatography. *Analyst*, 117(11), 1707-1714.
Englyst, H. N., Veenstra, J., & Hudson, G. J. (1996). Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: a potential in vitro predictor of the glycaemic response. *British Journal of Nutrition*, 75(3): 327-337.
Emeksizoğlu, B. (2016). *Siyez buğdayının bazlama ve erişte de kullanımı* (Doktora tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
Erba, D., Hidalgo, A., Bresciani, J., & Brandolini, A. (2011). Environmental and genotypic influences on minerals in einkorn flour. *Journal of Cereal Science, 54*(2), 250–254.
Ergin, A. (2011). *Çölyak hastalarına özel bisküvi, erişte ve pide üretimi* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi.
FAO/WHO, (2009). Energy and Protein Requirement, Report of the Joint.
FAO. (2013). FAOSTAT. http://faostat3.fao.org/
Fernández-García, E., Carvajal-Lérida, I., & Pérez-Gálvez, A. (2009). In vitro bioaccessibility assessment as a prediction tool of nutritional efficiency. Nutrition Research, 29(11): 751-760.
Frost, G., & Dornhorst, A. (2000). The relevance of the glycaemic index to our understanding of dietary carbohydrates. Diabetic Medicine, 17(5): 336-345.
Foster-Powell, K., Holt, S. H., ve Brand-Miller, J. C. (2002). International glycemic index table. *American Journal of Clinical Nutrition, 76*(1), 5–56.
Garsetti, M., Vinoy, S., Lang, V., Holt, S., Loyer, S., ve Brand-Miller, J. C. (2005). The glycemic and insulinemic index of plain sweet biscuits: relationships to in vitro starch digestibility. Journal of the American College of Nutrition, 24(6): 441-447.

Gheshlaghi, R. E. Z. A., Scharer, J. M., Moo-Young, M., & Douglas, P. L. (2008). Application of statistical design for the optimization of amino acid separation by reverse-phase HPLC. *Analytical biochemistry*, 383(1), 93-102.
Gianfrani, C., Camarca, A., Mazzarella, G.; Di Stasio, L., Giardullo, N., Ferranti, P., Picariello, G., Rotondi, Aufiero, V., Picascia, S., Troncone, R., Pogna, N., Auricchio, S., Mamone, G. (2015). Extensive in vitro gastrointestinal digestion markedly reduces the immune-toxicity of Triticum monococcum wheat: Implication for celiac disease. Moleculer Nutrition Food Research, 59, 1844−1854.
Giafrani, C., & Auricchio, S. (2015). Toxicity of monococcum wheat gliadin. *Pediatric Research, 77*(3), 343–349.
Gibson, N., Schönfeldt, H. C., & Pretorius, B. (2011). Development of a rapid assessment method for the prediction of the glycemic index. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(4-5), 750-754.
Gilani, G. S. (2012). Background on international activities on protein quality assessment of foods. British Journal of Nutrition, 108(2): S168-S182.
Güneş, A., Kutlu A., Öztürk, S. (2012). Buğday Alımı Sonrası Egzersizle Tetiklenen Anafilaksi; Bir Olgu Nedeniyle Buğday Allerjisinde Tanısal Zorlukların Tartışılması. TAF Preventive Medicine Bulletin, 11(2): 237-240.
Goñi, I., Garcia-Diz, L., Mañas, E., & Saura-Calixto, F. (1996). Analysis of resistant starch. *Food Chemistry, 56*(4), 445–449.
Goni, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis method to estimate GI. *Nutrition Research, 17*(3), 427–437.
Harpaz, Z., Siman, P., Kumar, K. A., & Brik, A. (2010). Protein synthesis assisted by native chemical ligation at leucine. *ChemBioChem*, 11(9): 1232-1235.
Heun, M., Schafer-Pregl, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borghi, B., & Salamini, F. (1997). Site of einkorn wheat domestication. *Science, 278*(5341), 1312–1314.
Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2008). Kinetics of carotenoids degradation during the storage of einkorn (Triticum monococcum L. ssp. monococcum) and bread wheat (Triticum aestivum L. ssp. aestivum) flours. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(23): 11300-11305.
Brandolini, A., Hidalgo, A. ve Moscaritolo, S. (2008). Einkorn (Triticum monococcum L. subsp. monococcum) tam buğday ununun kimyasal bileşimi ve yapıştırma özellikleri. *Tahıl Bilimi Dergisi*, 47 (3), 599-609.
Hidalgo, A., Brandolini, A., & Pompei, C. (2009). Kinetics of tocols degradation during the storage of einkorn (Triticum monococcum L. ssp. monococcum) and breadwheat (Triticum aestivum L. ssp. aestivum) flours. *Food Chemistry*, 116(4): 821-827.
Hidalgo, A. ve Brandolini A. (2011). Heat damage of water biscuits from einkorn, durum and bread wheat flours. Food Chemistry, 128(2): 471-478.
Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2014). Nutritional properties of einkorn wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 94*(4), 601–612.
Hidalgo, A., Yılmaz, V. A., & Brandolini, A. (2016). Effect of biscuit processing on phenolic acids. *Journal of Food Science and Technology, 53*(1), 541–550.
Horton, T.J., Drougas, H., Brachey, A., Reed, G.W., Peters, J.C. and Hill, J.O. (1995).' Fat and carbohydrate overfeeding in humans: Different effects on energy storage', *American Journal of Clinical Nutrition* 62:19-29.
Hur, S. J., Lim, B. O., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2011). In vitro human digestion models for food applications. *Food Chemistry*, 125(1): 1-12.

Janssen, I., Katzmarzyk, P. T., & Ross, R. (2004). Waist circumference and not body mass index explains obesity-related health risk. *The American Journal of Clinical nutrition*, 79(3): 379-384.
Jimenez-Martin, E., Ruiz, J., Perez-Palacios, T., Silva, A., & Antequera, T. (2012). Gas chromatography–mass spectrometry method for the determination of free amino acids as their dimethyl-tert-butylsilyl (TBDMS) derivatives in animal source food. *Journal of Agricultural And Food Chemistry*, 60(10): 2456-2463.
Jordi, J., Herzog, B., Camargo, S. M., Boyle, C. N., Lutz, T. A., & Verrey, F. (2013). Specific amino acids inhibit food intake via the area postrema or vagal afferents. *The Journal of Physiology*, 591(22): 5611-5621.
Kabuo, N. O., Algbaosa, O. S., Omerie, G. C., Peter, Ikechukwu, A. I., Akajiaku, L. O. ve Obasi A. C. (2018). Production and Evalation of Biscuits from Cocoyom (Xanthosama Sagittifolium Cu Okoriko) Wheat Composite Flour. *Research Journal of Food Nutrition*, 2(2): 53-61.
Kamiloglu, S. (2016). Bioavailability and bioactivity of black carrot polyphenols using in vitro digestion models combined with a co-culture model of intestinal and endothelial cell lines (Doctoral dissertation, Ghent University).
Karaduman, Y., Belen, S., Sönmez, A. C., Akın, A., Sayaslan, A., Dayıoğlu, R., Aydın, N., Tunca, Z. A. (2018). Bisküvi Sektörünün Taleplerine Uygun Yumuşak Buğday (T. aestivum) Geliştirme Çalışmaları. Türkiye Yerel Buğdaylar Sempozyumu, Bolu.
Karakaş, P. F. (2016). Effects of Drought and Salinity Stress on Early Seedling Growth and Antioxidant Activity in Hulled Einkorn (Triticum monococcum L. ssp. monococcum) and Bread (Triticum aestivum L.) Wheats. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Ensititü Merkezi Dergisi*, 25(1): 107-116
Kasarda, D. D. (2013). Can an increase in celiac disease be attributed to an increase in the gluten content of wheat as a consequence of wheat breeding? *Journal Of Agricultural and Food Chemistry*, 61(6): 1155-1159.
Kilian, B., Özkan, H., Walther, A., Kohl, J., Dagan, T., Salamini, F., & Martin, W. (2007). Molecular diversity at 18 loci in 321 wild and 92 domesticate lines reveal no reduction of nucleotide diversity during Triticum monococcum (einkorn) domestication: implications for the origin of agriculture. Molecular Biology and Evolution, 24(12): 2657-2668.
Koletzko, B., Shamir, R., & Ashwell, M. (2012). Quality and safety aspects of infant nutrition. Annals of Nutrition and Metabolism, 60(3): 179-184.
Kotancılar, H. G., Gerçekaslan, K. E., Karaoğlu, M. M., & Boz, H. (2009). Besinsel lif kaynağı olarak enzime dirençli nişasta. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 40(1): 103-107.
Kün, E. (1996). *Serin iklim tahılları* (3. Baskı). A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları.
Lee S.J., Lee S. Y., Chung M. S., Hur S. J. (2016). Development of novel in vitro human digestion systems for screening the bioavailability and digestibility of foods. *Journal Functional Foods*. 22: 113–121
Loje H., Moller, B., Laustsen, A. M., Hansen, A. (2003). Chemical composition, functional properties and sensory profiling of einkorn (Triticum monococcum L.). Journal of Cereal Science, 37(2): 231-240.
Loje, H., Sort, M., Wenzel, I., & Shewry, P. R. (2003). Tocochromanols in einkorn wheat. *Cereal Chemistry, 80*(5), 551–555.
Ludwig, D. S. (2002). The glycemic index and metabolic disease. *JAMA, 287*(18), 2414–2423.

Majumdar, A. P. N. (1982). Tryptophan requirement for protein synthesis. A review. Nutrition Reports International. 26(3): 509-522.
Memiş, E., & Şanlıer, N. (2009). Glisemik indeks ve sağlık ilişkisi. *Gazi Üniversitesi ESEF Dergisi, 24*(17), 27.
Menard, O., Cattenoz, T., Guillemin, H., Souchon, I., Deglaire, A., Dupont, D., & Picque, D. (2014). Validation of a new in vitro dynamic system to simulate infant digestion. Food Chemistry, 145, 1039-1045.
Mızrak, G. (2016). Glisemik İndeks, Glisemik Yük, Sağlıklı Beslenme ve Spor. Ziraat Mühendisliği, (363): 4-11.
Mihaylova, D. ve Popova, A. (2018). Non-Traditional Grains for a Balanced Diet. Journal of Hygienic Engineering and Desing, 26(633): 64-71.
Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T. O. R. S. T. E. N., Bourlieu, C., ... & Dufour, C. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food–an international consensus. Food & Function, 5(6): 1113-1124.
Mohammadkhani, A., Stoddard, F. L., & Marshall, D. R. (1999). Amylose content in segregating populations of einkorn, emmer, and rye. Starch-Stärke, 51(2-3): 66-73.
Monro, J. A., Mishra, S., & Venn, B. (2010). Baselines representing blood glucose clearance improve in vitro prediction of the glycaemic impact of customarily consumed food quantities. British Journal of Nutrition, 103(2): 295-305.
Nakov, D., Mihajlov, L., Damjanovski, D., & Mitrev, S. (2018). Nutritional and functional properties of ancient wheat. *Macedonian Journal of Animal Science, 8*(2), 93–98.
Nakov, G., Jukić, M., Vasileva, N., Stamatovska, V., Dimov, I., & Komlenić, D. K. (2019). Effect of sweeteners on starch digestion in biscuits. *Scientific Study & Research: Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry, 20*(1), 53–62.
Nayak, B., Berrios, J. D. J., & Tang, J. (2014). Processing effects on potato GI. *Food Research International, 56*, 35–46.
Newsholme, P., Procopio, J., Lima, M. M. R., Pithon-Curi, T. C., & Curi, R. (2003). Glutamine and glutamate—their central role in cell metabolism and function. Cell Biochemistry and Function, 21(1): 1-9.
Nielsen, H. K., & Hurrell, R. F. (1985). Tryptophan determination after alkaline hydrolysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 36*(9), 893–907.
Nurmi, T., Adlercreutz, H., Mazur, W., & Wahala, K. (2008). Phytosterols in einkorn. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56*(17), 7612–7617.
Odenigbo, A., Rahimi, J., Ngadi, M., Amer, S., & Mustafa, A. (2012). Starch digestibility and predicted glycemic index of fried sweet potato cultivars. Functional Foods in Health and Disease, 2(7): 280-289.
Olgun, M., Karaduman, Y., Tunc, Z. Ş., Akın, A., Yorgancılar, Ö., Başçifçi, Z. B., Ayter, N. G., Takıl, E., (2015). Comparison of some quality characteritics in Kinoa (Chenopodium quinao), Buckwheat (Fagopyrum esculentum), Siyez Wheat (Triticum monoccccum) and Bread Wheat (Triticum avestivum) by principle component analysis. Biological Diversity and Conservation, 8(3): 153-158.
Önder, K. (2016). Türkiye bisküvi, çikolata ve şekerli mamuller sektörü firma yoğunlaşması. *İİBF Dergisi, 31*(2), 179–208.
Özberk, F., Karagöz, A., Özberk, İ., & Atlı, A. (2016). Buğday genetik kaynaklarından yerel kültür çeşitlerine. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 25*(2), 218–233.

Pasini, G., Greco, F., Cremonini, M. A., Brandolini, A., Consonni, R., & Gussoni, M. (2015). Structural and nutritional properties of pasta from Triticum monococcum and Triticum durum species. A combined 1H NMR, MRI, and digestibility study. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63(20): 5072-5082.
Pirgozliev, V., Rose, S. P., Pellny, T., Amerah, A. M., Wickramasinghe, S., Sefer, Ö. M., ... & Shewry, P. R. (2015). Energy utilization of novel wheat lines. *Poultry Science, 94*(2), 232–239.
Pizzuti, D., Buda, A., D'Odorico, A., D'Incà, R., Chiarelli, S., Curioni, A., & Martines, D. (2006). Lack of toxicity of *Triticum monococcum* in celiac disease. *Scandinavian Journal of Gastroenterology, 41*(11), 1305–1311.
Roberts, S. B. (2000). High GI foods and obesity. *Nutrition Reviews, 58*(6), 163–169.
Rooney, L. W., & Pflugfelder, R. L. (1986). Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *Journal of animal science*, 63(5), 1607-1623.
Sağbasan, H. B. (2015). Türkiye'de Yaygın Olarak Tüketilen Kuru Kırmızı Meyvelerin İçerdiği Antioksidan Maddelerin Biyoerişilebilirliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
Sakoğlu, G. Y. (2015). Avrupa Birliğinde Bebek ve Küçük Çocuk Gıdalarına İlişkin Yasal Düzenlemeler ve Ülkemiz Mevzuatına Uyum Durumu. T.C. Gıda ve Hayvancılık Bakanlığı (AB Uzmanlık Tezi). Ankara.
Salmeron, J., Manson, J. E., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., Wing, A. L., & Willett, W. C. (1997). Dietary fiber, glycemic load, and risk of non—insulin-dependent diabetes mellitus in women. Jama, 277(6): 472-477.
Sandstrom, B. (2001). Micronutritional interaction: effects on absorption bioavailiability.British Journal of Nutritional, 85(2): 181-185.
Sertakan, A. (2006). Bisküvi üretim proseslerinde HACCP gıda güvenliği sisteminin kurulması ve uygulamaları üzerine bir çalışma. (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Ünivesitesi. Fen Bilimleri,Gıda Mhendisliği Anabilimdalı.
Şengül, H. (2013). Narda Bulunan Antosiyaninlerin Biyoyararlılığına Gıda Matrisi Ve Bileşenlerinin Etkisi.
Shewry, P. R. (2009). Wheat. Journal of Experimental Botany, 60(6): 1537-1553.
Shi, J. & Maguer, M. L. (2010). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical PropertiesAffected by Food Processing, Critical Reviews in Food Science and Nutritional, 40(1): 1-4.
Sholihah, N. M., Agustina, L., Nugroho, A. (2018). Formulation of baby porridge flour using nagara tuber and kakai (stenoch laena palustris) as iron fotiflying agent with natural flavour of ambon banana. Journal Riset Industry, 10(2): 75-82.
Sopade, P. A., & Gidley, M. J. (2009). A rapid in-vitro digestibility assay based on glucometry for investigating kinetics of starch digestion. Starch, 61(5): 245-255.
Stephen, A., Alles, M., De Graaf, C., Fleith, M., Hadjilucas, E., Isaacs, E., ... & Gil, A. (2012). The role and requirements of digestible dietary carbohydrates in infants and toddlers. *European Journal of Clinical Nutrition*, 66(7): 765-779.
Simonato, B., Curioni, A., & Pasini, G. (2015). Digestibility of pasta made with three wheat types. *Food Chemistry, 174*, 219–225.
Sumathai S, Pattabiraman TN (1976) Natural plant enzyme inhibitors; part II-protease inhibitors of seeds. Ind. J. Biochem. *Biophys*.13:52-56.
Şanal, T. (2016). Bazı yerel buğday çeşitlerinin kalite parametreleri. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü, Ankara.

Şeker, İ. T., Gökbulut, İ., Öztürk, S., Özbaş, Ö. Ö., & Köksel, H. (2006). Enzime dirençli nişastanın bisküvi üretiminde kullanımı. Türkiye 9. Gıda Kongresi, 9, 157-160. Bolu
Şengül, H. (2013). Narda Bulunan Antisiyaninlerin Biyoyararlılığının Gıda Matrisi ve Bileşenlerinin Etkisi, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensititüsü.
Şenol, E. (2018). In Vitro Glisemic Index Determination of Turkish Sourdough Breads and Strategies to Reduce Glisemic Index, (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensititüsü.
TGK, (2001). Özel Beslenme Amaçlı Gıdalar Tebliği. Resmi Gazete Tebliği. 22 Ocak 2001, Sayı: 23556
TGK, (2017). Türk Gıda Kodeksi, Renklendirici ve Tatlandırıcılar Dışındaki Fosfatlandırılmış dinişasta Fosfat. Resmi Gazete Tebliği: 26 Ocak 2017, Sayı: 29969.
TÜİK, (2016). Yıllara göre Türkiye'de siyez buğday ekimi.
TÜİK, (2017). Türkiye Sağlık Araştırması İstatistikleri. Son Güncellenme: 31.05.2017
TürKomp. (2017). Bebe bisküvisi bileşen değerleri. TÜBİTAK.
Urschel, K. L., & Lawrence, L. M. (2013). Amino acids and protein. Equine applied and clinical nutrition: *Health, welfare and performance*, 113-135.
Uzunlu, S. ve Herken, E. (2016). Bisküvilerde HMF ve akrilamid oluşumu. *Selçuk Tarım Bilimleri Dergisi, 3*(1), 138–142.
Vaccino, P., Becker, H. A., Brandolini, A., Salamini, F., & Kilian, B. (2009). Genes encoding toxic peptides in *T. monococcum*. *Molecular Genetics and Genomics, 281*(3), 289–300.
Van B. J. H., Sienkiewicz-Szłapka, E., Lozano-Ojalvo, D., Willemsen, L. E., Antunes, C. M., Molina, E., ... & Ladics, G. S. (2017). Application of the adverse outcome pathway (AOP) concept to structure the available in vivo and in vitro mechanistic data for allergic sensitization to food proteins. *Clinical and Translational Allergy*, 7(1): 13.
Venn, B. J., & Green, T. J. (2007). Glycemic index and glycemic load: measurement issues and their effect on diet–disease relationships. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(1): 122-131.
Vujic, D., & Brkljacic, J. (2014). Glycemic index of biscuits with different flours. *Food and Nutrition Sciences, 5*, 1800–1806.
Vujić, L., Čepo, V., Dubravka, A., Šebečić, B., & Dragojević, I. V. (2014). Effects of pseudocereals, legumes and inulin on biscuits. *Journal of Food & Nutrition Research, 53*(2).
Wild, S., Roglic, G., Green, A., Sicree, R., & King, H. (2004). Global prevalence of diabetes. *Diabetes Care, 27*(5), 1047–1053.
Wong, S. L., & Lye, E. J. (2008). Lead, mercury and cadmium levels in Canadians. *Health Reports, 19*(4), 31.
Yaman, M., Sargın, H. S., & Mızrak, Ö. F. (2019). Free sugar content and predicted GI of breakfast cereals in Turkey. *International Journal of Biological Macromolecules, 135*, 1082–1087.
Yıldız, M. (2012). Karabuğday (Fagoyrum esculentum Moench.) ve Lüpen (Lupinus albus L.) Unlarının Glutensiz Bisküvi Üretiminde Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Ensititüsü.
Yılmaz, H. ve Ezici, A. A. Alparslan, (2016). Buyday Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Endüstri Müdürlüğü, Buğday Bülteni.

Yue, P., & Waring, S. (1998). Resistant starch in food applications. Cereal Foods World (USA). 43(9): 690-695.
Zaharieva, M., & Monneveux, P. (2014). Cultivated einkorn wheat: A founder crop. *Genetic Resources and Crop Evolution, 61*, 677–706.
Zengin, H. (2015). Siyez buğdayı ve gıda ürünleri üzerine etkileri. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 15*(1), 220–227.
Zulfa, N., Iliaka, A., & Ninik, A. (2014). Formulation and evaluation of functional biscuits. *International Journal of Food Science and Nutrition, 3*(2), 15–20.*

Mühendislik Uygulamalarında Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) Metotları ile Güvenilirlik Değerlendirmesi

Simge COŞKUN[1]
Ali Hakan IŞIK[2]

1- Arş. Gör.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak Zeliha Tolunay Uygulamalı Teknoloji ve İşletmecilik Yüksekokulu Bilişim Sistemleri ve Teknolojileri Bölümü. scoskun@mehmetakif.edu.tr ORCID No: https://orcid.org/0009-0002-7806-1340
2- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. ahakan@mehmetakif.edu.tr ORCID No: https://orcid.org/0000-0003-3561-9375

ÖZET

Yapay zekâ teknolojilerinin mühendislik uygulamalarında giderek yaygınlaşması, sistem performansında önemli iyileşmeler sağlamakla birlikte, bu sistemlerin güvenilirliği ve şeffaflığına ilişkin yeni sorun alanlarını da beraberinde getirmiştir. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modellerin karmaşık yapıları, karar süreçlerinin kullanıcılar tarafından anlaşılmasını zorlaştırmakta ve yapay zekâya duyulan güveni sınırlayabilmektedir. Bu bağlamda açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence – XAI) yaklaşımları, mühendislik sistemlerinde yapay zekâ temelli kararların yorumlanabilirliğini artırarak güvenilirlik değerlendirmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu kitap bölümünde, mühendislik uygulamalarında kullanılan yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde açıklanabilir yapay zekâ metotlarının katkıları kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Öncelikle mühendislik alanlarında yapay zekânın kullanımına ilişkin genel bir çerçeve sunulmuş, ardından açıklanabilir yapay zekâ kavramı, açıklanabilirlik türleri ve model-bağımlı ile modelden bağımsız yaklaşımlar detaylandırılmıştır. LIME, SHAP ve Grad-CAM gibi yaygın XAI metotları, açıklama kapsamları ve mühendislik uygulamalarındaki kullanım alanları açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın devamında, güvenilirlik değerlendirmesi doğruluk, kararlılık, önyargı tespiti, şeffaflık ve insan güveni boyutlarıyla ele alınmış; XAI yaklaşımlarının bu kriterlere sağladığı katkılar tartışılmıştır. Otonom sistemler, endüstriyel karar destek sistemleri ve akıllı enerji yönetimi gibi farklı mühendislik alanlarından uygulama örnekleri üzerinden, açıklanabilir yapay zekânın pratikte güvenilirlik ve sistem kabulünü nasıl desteklediği ortaya konulmuştur. Ayrıca etik ve hukuki düzenlemeler ile gelecekteki araştırma yönelimleri değerlendirilerek, güvenilir ve sorumlu yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Sonuç olarak bu bölüm, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarında yalnızca teknik bir açıklama aracı değil, aynı zamanda güvenilir, şeffaf ve sürdürülebilir yapay zekâ sistemlerinin tasarlanması için temel bir bileşen olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Açıklanabilir Yapay Zekâ, Güvenilirlik Değerlendirmesi, Mühendislik Uygulamaları, Yapay Zekâ Güveni, XAI Metotları, Karar Destek Sistemleri.

GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ) tabanlı yöntemler, son yıllarda mühendislik uygulamalarında karmaşık problemlerin çözümünde, karar verme süreçlerinin desteklenmesinde ve sistem performansının artırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle makine öğrenmesi ve derin

öğrenme tabanlı modeller; endüstriyel otomasyon, enerji sistemleri, sağlık mühendisliği ve karar destek sistemleri gibi birçok alanda yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı sonuçlar sunmaktadır (Russell ve Norvig, 2021:34). Ancak bu modellerin önemli bir bölümü, karar süreçlerinin kullanıcılar tarafından doğrudan anlaşılmasını zorlaştıran "kara kutu" yapıları nedeniyle eleştirilmekte ve bu durum mühendislik uygulamalarında güvenilirlik tartışmalarını beraberinde getirmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:3).

Mühendislik sistemlerinde kullanılan yapay zekâ modellerinin yalnızca yüksek performans göstermesi yeterli görülmemekte; aynı zamanda bu sistemlerin şeffaf, denetlenebilir ve güvenilir olması beklenmektedir. Özellikle güvenlik açısından kritik mühendislik uygulamalarında, model çıktılarının hangi girdiler doğrultusunda ve hangi gerekçelerle üretildiğinin açıklanabilir olması büyük önem taşımaktadır (Gunning, 2019:6). Bu bağlamda, açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence – XAI) yaklaşımları, yapay zekâ sistemlerinin karar mekanizmalarını insan tarafından anlaşılabilir hâle getirmeyi amaçlayan önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde açıklanabilir yapay zekâ, yapay zekâ modellerinin iç işleyişini, karar süreçlerini ve çıktılarını kullanıcıya anlamlı biçimde sunan yöntem ve teknikler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Arrieta vd., 2020:83). Yapılan çalışmalar, XAI yaklaşımlarının kullanıcı güvenini artırmanın yanı sıra model hatalarının, yanlılıkların (bias) ve tutarsız davranışların tespit edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Lipton, 2018:2). Özellikle LIME, SHAP, Grad-CAM ve özellik önemine dayalı açıklama yöntemleri, model çıktılarının yorumlanması ve performans değerlendirmesi süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ribeiro vd., 2016:1140; Lundberg ve Lee, 2017:4766).

Güvenilirlik kavramı, mühendislik bağlamında yalnızca doğruluk metriği ile sınırlı değildir. Bir yapay zekâ sisteminin güvenilir olarak değerlendirilebilmesi için farklı veri setleri ve çalışma koşulları altında tutarlı sonuçlar üretmesi, beklenmeyen girdilere karşı dayanıklı olması ve kararlarının gerekçelendirilebilir olması gerekmektedir (Siau ve Wang, 2018:55). Güncel literatürde, açıklanabilirlik ile güvenilirlik arasında güçlü bir ilişki bulunduğu vurgulanmakta; XAI metotlarının model doğrulama, hata analizi ve performans değerlendirme süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir (Guidotti vd., 2018:94). Bununla birlikte, mühendislik uygulamalarında XAI yaklaşımlarının güvenilirlik değerlendirmesine sistematik biçimde nasıl entegre edileceğine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu kitap bölümünün amacı, mühendislik uygulamalarında kullanılan yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde açıklanabilir yapay zekâ metotlarının rolünü kapsamlı bir biçimde ele almaktır. Bu doğrultuda, öncelikle mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılan yapay zekâ yaklaşımlarına genel bir çerçeve sunulmakta, ardından

açıklanabilir yapay zekâ kavramı ve temel metotlar incelenmektedir. Devam eden bölümlerde, XAI yaklaşımlarının güvenilirlik, performans ve karar şeffaflığı üzerindeki etkileri tartışılmakta ve farklı mühendislik uygulamalarından örnekler üzerinden değerlendirmeler yapılmaktadır. Çalışmanın, mühendislikte güvenilir ve şeffaf yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesine yönelik literatüre kavramsal ve uygulamaya dönük katkı sağlaması hedeflenmektedir.

MÜHENDİSLİK UYGULAMALARINDA YAPAY ZEKÂ

Mühendislikte Yapay Zekânın Rolü

Yapay zekâ teknolojileri, mühendislik disiplinlerinde karmaşık problemlerin çözümünde, sistem performansının artırılmasında ve karar verme süreçlerinin desteklenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Geleneksel mühendislik yaklaşımlarının sınırlı kaldığı yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan problemler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yöntemler sayesinde daha etkin biçimde ele alınabilmektedir. Bu durum, mühendislik uygulamalarında veri odaklı ve adaptif çözümlerin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır (Russell ve Norvig, 2021:41).

Endüstriyel ve Üretim Sistemlerinde Yapay Zekâ

Endüstriyel mühendislik ve üretim sistemlerinde yapay zekâ, süreç optimizasyonu, kestirimci bakım ve kalite kontrol gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sensör verileri üzerinden öğrenen yapay zekâ modelleri, makine arızalarının önceden tahmin edilmesine ve üretim süreçlerinin daha verimli hâle getirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu sistemlerin karar mekanizmalarının kullanıcılar tarafından tam olarak anlaşılamaması, özellikle güvenlik ve maliyet açısından kritik üretim ortamlarında önemli bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir (Siau ve Wang, 2018:49).

Enerji Mühendisliğinde Yapay Zekâ Uygulamaları

Enerji mühendisliği alanında yapay zekâ, enerji talep tahmini, üretim ve dağıtım sistemlerinin optimizasyonu ile yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi konularda etkin biçimde kullanılmaktadır. Yapay zekâ tabanlı modeller, enerji tüketim davranışlarını analiz ederek daha sürdürülebilir ve verimli enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu modellerin karar süreçlerinin şeffaf

olmaması, enerji arz güvenliği ve sistem kararlılığı açısından önemli sınırlılıklar doğurabilmektedir (Arrieta vd., 2020:90).

Sağlık Mühendisliği ve Biyomedikal Uygulamalarda Yapay Zekâ

Sağlık mühendisliği ve biyomedikal alanlarda yapay zekâ, teşhis destek sistemleri, tıbbi görüntü işleme ve hasta izleme uygulamaları kapsamında yaygın olarak kullanılmaktadır. Derin öğrenme tabanlı modeller, tıbbi görüntülerden anlamlı örüntüler çıkararak yüksek doğruluk oranlarıyla sınıflandırma ve tahmin yapabilmektedir. Ancak bu sistemlerin ürettiği sonuçların gerekçelerinin yeterince açıklanamaması, klinik karar süreçlerinde yapay zekâya duyulan güveni sınırlayan önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:4).

Karar Destek Sistemlerinde Yapay Zekâ

Mühendislikte yapay zekânın önemli kullanım alanlarından biri de karar destek sistemleridir. Bu sistemler, çok kriterli ve belirsizlik içeren mühendislik problemlerinde karar vericilere analitik destek sağlamayı amaçlamaktadır. Yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri, farklı senaryoları hızlı biçimde değerlendirme yeteneğine sahip olmakla birlikte, karar süreçlerinin açıklanabilir olmaması durumunda kullanıcıların sistem çıktılarının doğruluğuna ve güvenilirliğine yönelik şüpheler oluşabilmektedir (Guidotti vd., 2018:97).

Güvenilirlik ve Şeffaflık Gereksinimi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin yalnızca yüksek performans göstermesinin yeterli olmadığını, aynı zamanda güvenilir ve şeffaf biçimde tasarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle güvenlik açısından kritik sistemlerde, yapay zekâ modellerinin karar süreçlerinin denetlenebilir ve yorumlanabilir olması büyük önem taşımaktadır. Bu gereksinim, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarına entegrasyonunu zorunlu hâle getirmektedir (Gunning, 2019:7).

Değerlendirme

Mühendislik uygulamalarında yapay zekânın etkin kullanımı, yalnızca teknik başarı ve doğruluk oranlarıyla değil; şeffaflık, güvenilirlik ve kullanıcı güveni gibi faktörlerle birlikte ele alınmalıdır. Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, mühendislik sistemlerinde yapay zekâya dayalı kararların daha anlaşılır ve güvenilir hâle getirilmesinde kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ (XAI) KAVRAMI

Açıklanabilirlik İhtiyacının Ortaya Çıkışı

Yapay zekâ modellerinin mühendislik uygulamalarında yaygınlaşması, yüksek doğruluk ve performans avantajları sağlamakla birlikte, bu sistemlerin karar verme süreçlerinin anlaşılabilirliği konusunda önemli tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Özellikle derin öğrenme tabanlı modellerin karmaşık yapıları, model çıktılarının hangi girdiler doğrultusunda ve hangi gerekçelerle üretildiğinin açıklanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliği ve kabul edilebilirliği açısından ciddi bir sorun alanı oluşturmaktadır (Lipton, 2018:36).

Mühendislik uygulamalarında kullanılan yapay zekâ sistemlerinin, yalnızca doğru sonuçlar üretmesi değil; aynı zamanda bu sonuçların nedenlerinin kullanıcıya açık bir biçimde sunulması beklenmektedir. Aksi takdirde, özellikle güvenlik açısından kritik sistemlerde yapay zekâya dayalı kararların benimsenmesi ve uygulanması zorlaşmaktadır. Bu gereksinim, açıklanabilir yapay zekâ kavramının ortaya çıkmasında temel bir motivasyon kaynağı olmuştur (Gunning, 2019:5).

Açıklanabilir Yapay Zekânın Tanımı

Açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence – XAI), yapay zekâ sistemlerinin karar süreçlerini, iç işleyişlerini ve çıktılarının nedenlerini insan tarafından anlaşılabilir hâle getirmeyi amaçlayan yöntem ve teknikler bütünü olarak tanımlanmaktadır. XAI, kullanıcıların model davranışlarını yorumlayabilmesine, modelin hangi faktörlere dayalı olarak karar verdiğini anlayabilmesine ve gerektiğinde bu kararları sorgulayabilmesine olanak tanımaktadır (Arrieta vd., 2020:84).

Literatürde XAI, yalnızca teknik bir açıklama aracı olarak değil; aynı zamanda etik, hukuki ve toplumsal boyutları olan çok disiplinli bir araştırma alanı olarak ele alınmaktadır. Açıklanabilirlik, yapay zekâ sistemlerine duyulan güvenin artırılması, hatalı kararların tespit edilmesi ve sorumluluk mekanizmalarının oluşturulması açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:2).

Açıklanabilirlik Türleri: Küresel ve Yerel Yaklaşımlar

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları genel olarak **küresel (global)** ve **yerel (local)** açıklamalar olmak üzere iki temel kategori altında incelenmektedir. Küresel açıklamalar, bir yapay zekâ modelinin genel davranışını ve tüm veri seti üzerindeki karar mantığını açıklamayı amaçlamaktadır. Bu tür açıklamalar, modelin genel eğilimlerinin ve karar kurallarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır (Guidotti vd., 2018:95).

Yerel açıklamalar ise belirli bir girdi veya tekil bir karar çıktısı üzerinden modelin nasıl bir sonuca ulaştığını açıklamaya odaklanmaktadır.

Özellikle bireysel kararların kritik olduğu mühendislik uygulamalarında, yerel açıklamalar kullanıcıların sistem çıktılarının doğruluğunu değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle yerel açıklamalar, pratik mühendislik problemlerinde daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir (Ribeiro vd., 2016:1137).

Model-Bağımlı ve Modelden Bağımsız Açıklama Yaklaşımları

XAI yöntemleri, açıklama üretme biçimlerine göre **model-bağımlı (model-specific)** ve **modelden bağımsız (model-agnostic)** yaklaşımlar olarak da sınıflandırılmaktadır. Model-bağımlı açıklamalar, belirli bir yapay zekâ modelinin iç yapısına ve parametrelerine doğrudan erişim gerektirirken, modelden bağımsız yaklaşımlar modelin iç yapısından bağımsız olarak çalışabilmektedir (Lundberg ve Lee, 2017:4766).

Modelden bağımsız XAI yöntemleri, farklı yapay zekâ modellerine uygulanabilme esnekliği nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemler, model çıktıları üzerinden açıklama üreterek kullanıcıların karar süreçlerini daha kolay anlamasına yardımcı olmaktadır. Ancak bu esneklik, bazı durumlarda açıklamaların doğruluğu ve tutarlılığı konusunda sınırlılıklar da doğurabilmektedir (Arrieta vd., 2020:92).

XAI'nin Güvenilirlik ve Kullanıcı Güveni ile İlişkisi

Açıklanabilirlik, yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde temel bir bileşen olarak görülmektedir. Bir modelin karar süreçlerinin açıklanabilir olması, potansiyel hataların ve yanlılıkların daha kolay tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, özellikle mühendislik sistemlerinde yapay zekâya duyulan kullanıcı güveninin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Siau ve Wang, 2018:52).

Güncel çalışmalar, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının yalnızca kullanıcı güvenini artırmakla kalmadığını, aynı zamanda model performansının değerlendirilmesine ve sistem doğrulama süreçlerine de katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda XAI, mühendislik uygulamalarında güvenilir ve sorumlu yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi için vazgeçilmez bir araç olarak değerlendirilmektedir (Gunning, 2019:8).

Açıklanabilir yapay zekâ kavramı, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin benimsenmesi ve etkin kullanımı açısından kritik bir öneme sahiptir. XAI yaklaşımları, yapay zekâ modellerinin karar süreçlerini daha şeffaf ve anlaşılır hâle getirerek, güvenilirlik ve performans değerlendirmelerinin daha sağlıklı biçimde yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu yönüyle açıklanabilir yapay zekâ, mühendislikte güvenilir ve sürdürülebilir yapay zekâ çözümlerinin geliştirilmesinde temel bir yapı taşı olarak değerlendirilmektedir.

AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ (XAI) METOTLARI

XAI Metotlarına Genel Bakış

Açıklanabilir yapay zekâ metotları, yapay zekâ modellerinin karar süreçlerini kullanıcılar için daha anlaşılır hâle getirmeyi amaçlayan teknik yaklaşımlar bütünüdür. Bu metotlar, modelin iç yapısına doğrudan erişim gerektirip gerektirmemesine ve açıklamanın kapsamına bağlı olarak farklı kategoriler altında ele alınmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan XAI metotları arasında LIME, SHAP ve Grad-CAM öne çıkmakta olup, bu yöntemler farklı model türleri ve problem alanları için açıklama üretme yeteneğine sahiptir (Guidotti vd., 2018:98).

Bu metotlar, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin yalnızca çıktılarını değil, bu çıktılara hangi girdilerin ve hangi etkileşimlerin yol açtığını ortaya koyarak güvenilirlik ve performans değerlendirme süreçlerine katkı sağlamaktadır (Arrieta vd., 2020:95).

LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations)

LIME yöntemi, karmaşık yapay zekâ modellerinin bireysel kararlarını açıklamaya yönelik geliştirilen modelden bağımsız bir açıklanabilirlik yaklaşımıdır. Bu yöntem, belirli bir girdi örneği etrafında modelin davranışını yerel olarak yaklaşık bir yorumlanabilir model ile temsil etmeyi amaçlamaktadır. Böylece, modelin ilgili karar için hangi özelliklere ne ölçüde önem verdiği ortaya konulabilmektedir (Ribeiro vd., 2016:1138).

Mühendislik uygulamalarında LIME, özellikle karar destek sistemleri ve sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin en önemli avantajı, farklı yapay zekâ modellerine uygulanabilmesi ve kullanıcıya sezgisel açıklamalar sunabilmesidir. Bununla birlikte, LIME tarafından üretilen açıklamaların yerel nitelikte olması, modelin genel davranışını temsil etme konusunda sınırlılıklar doğurabilmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:5).

SHAP (SHapley Additive exPlanations)

SHAP yöntemi, oyun teorisine dayalı bir açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımı olup, model çıktılarının her bir girdi özelliğine olan katkısını nicel olarak hesaplamayı amaçlamaktadır. Shapley değerleri temel alınarak geliştirilen bu yöntem, her bir özelliğin model çıktısına olan marjinal katkısını adil bir biçimde dağıtarak açıklama üretmektedir (Lundberg ve Lee, 2017:4766).

SHAP, hem yerel hem de küresel açıklamalar sunabilme kapasitesi sayesinde mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle güvenilirlik değerlendirmelerinde, modelin hangi girdilere sistematik olarak daha fazla bağımlı olduğunu ortaya koyması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak hesaplama maliyetinin yüksek

olması, büyük ölçekli veri setlerinde yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayan bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Arrieta vd., 2020:97).

Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping)

Grad-CAM yöntemi, özellikle derin öğrenme tabanlı görüntü işleme modelleri için geliştirilen model-bağımlı bir açıklanabilirlik yaklaşımıdır. Bu yöntem, modelin çıktı katmanına ilişkin gradyan bilgilerini kullanarak, giriş verisinin hangi bölümlerinin karar üzerinde daha etkili olduğunu görsel olarak ortaya koymaktadır. Böylece, modelin dikkatini yoğunlaştırdığı alanlar kullanıcıya sezgisel bir biçimde sunulabilmektedir (Selvaraju vd., 2017:619).

Mühendislik ve sağlık alanlarında görüntü tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Grad-CAM, özellikle kararların görsel olarak doğrulanmasını mümkün kılması açısından önemlidir. Bununla birlikte, yalnızca belirli model mimarilerine uygulanabilmesi ve nicel açıklamalar yerine görsel temsiller sunması, yöntemin kullanım alanını sınırlayan unsurlar arasında yer almaktadır (Guidotti vd., 2018:101).

XAI Metotlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

LIME, SHAP ve Grad-CAM yöntemleri; açıklama kapsamı, model bağımlılığı ve çıktı türü açısından birbirinden ayrılmaktadır. LIME ve SHAP, modelden bağımsız yapıları sayesinde farklı mühendislik uygulamalarına uyarlanabilirken, Grad-CAM özellikle derin öğrenme tabanlı görsel modeller için daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır. SHAP yöntemi, sunduğu nicel açıklamalar sayesinde güvenilirlik ve performans analizlerinde öne çıkarken, LIME daha sezgisel ve hızlı açıklamalar üretmesiyle tercih edilmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:6).

Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında kullanılacak XAI metodunun seçimi; problem türü, kullanılan model yapısı ve açıklamadan beklenen ayrıntı düzeyi gibi kriterler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

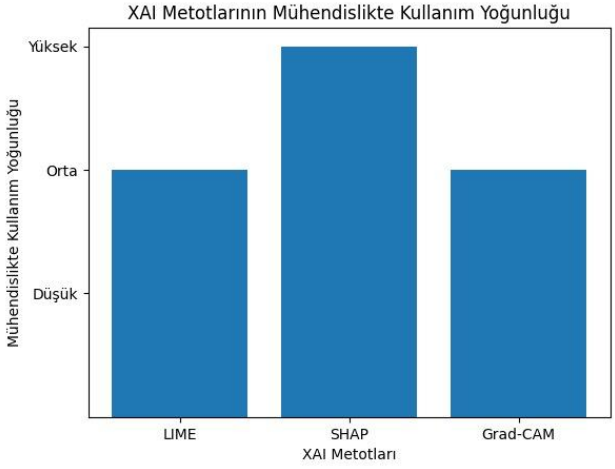
Yaygın olarak kullanılan XAI metotlarının temel özellikleri ve sınırlılıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) Metotlarının Karşılaştırılması

Metot	**Açıklama Türü**	**Model Bağımlılığı**	**Temel Avantaj**	**Temel Sınırlılık**	**Başlıca Kullanım**
LIME	Yerel	Modelden bağımsız	Sezgisel ve hızlı açıklama	Genelleme sınırlıdır	Karar destek sistemleri
SHAP	Yerel/ Küresel	Modelden bağımsız/ uyarlanabilir	Nicel ve tutarlı katkı analizi	Hesaplama maliyeti yüksektir	Güvenilirlik ve performans analizi
Grad-CAM	Görsel	Model-bağımlı	Görsel doğrulama imkânı	Yalnızca CNN tabanlı modeller	Görüntü işleme uygulamaları

Kaynak: Ribeiro vd., 2016:1138; Lundberg ve Lee, 2017:4766; Selvaraju vd., 2017:620.

XAI metotları, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin karar süreçlerini daha şeffaf ve anlaşılabilir hâle getirerek, güvenilirlik ve performans değerlendirmelerine önemli katkılar sağlamaktadır. LIME, SHAP ve Grad-CAM gibi yöntemler, farklı model türleri ve uygulama alanları için tamamlayıcı açıklama imkânları sunmaktadır. Bu yöntemlerin bilinçli ve amaca uygun biçimde kullanılması, mühendislikte güvenilir ve sorumlu yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 1: XAI Metotlarının Mühendislikte Kullanım Yoğunluğu

Şekil 1'de, yaygın olarak kullanılan XAI metotlarının mühendislik uygulamalarındaki kullanım yoğunluğu temsili bir ölçek üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Buna göre SHAP yönteminin, sunduğu nicel açıklamalar ve küresel yorumlanabilirlik imkânı sayesinde güvenilirlik ve performans değerlendirme çalışmalarında daha yaygın biçimde tercih edildiği görülmektedir. LIME ve Grad-CAM yöntemleri ise belirli problem türlerine odaklanmaları nedeniyle orta düzeyde kullanım yoğunluğuna sahiptir (Lundberg ve Lee, 2017:4766; Selvaraju vd., 2017:620; Arrieta vd., 2020:97).

GÜVENİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliği, sistemlerin gerçek dünya koşullarında doğru, tutarlı ve öngörülebilir biçimde çalışabilmesi açısından kritik bir gereksinim olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel yazılım sistemlerinden farklı olarak yapay zekâ modelleri, veriye dayalı öğrenme süreçleri nedeniyle dinamik ve karmaşık karar mekanizmalarına sahiptir. Bu durum, özellikle güvenlik, maliyet ve insan sağlığını doğrudan etkileyen mühendislik uygulamalarında güvenilirlik değerlendirmesinin çok boyutlu bir yaklaşım gerektirmesine neden olmaktadır (Doğan, 2006:15).

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, bu çok boyutlu değerlendirme sürecinde model davranışlarının anlaşılmasını sağlayarak güvenilirlik analizlerine önemli katkılar sunmaktadır. XAI metotları sayesinde yalnızca model çıktıları değil, bu çıktılara yol açan karar süreçleri de değerlendirilebilmekte ve olası riskler daha erken aşamada tespit edilebilmektedir (Gunning, 2019:7).

Doğruluk ve Performansın Ötesinde Güvenilirlik

Geleneksel performans ölçütleri, yapay zekâ sistemlerinin başarısını çoğunlukla doğruluk, hata oranı veya benzeri nicel metrikler üzerinden değerlendirmektedir. Ancak mühendislik uygulamalarında yüksek doğruluk değerlerine sahip bir modelin her koşulda güvenilir sonuçlar üreteceği varsayımı her zaman geçerli olmamaktadır. Özellikle beklenmeyen veya nadir görülen senaryolarda model davranışlarının nasıl değiştiğinin anlaşılması, güvenilirlik açısından büyük önem taşımaktadır (Ocak ve Akdemir, 2009:145).

XAI metotları, performans ölçütlerini tamamlayıcı bir rol üstlenerek, modelin hangi değişkenlere dayanarak karar verdiğini ve bu kararların hangi koşullarda değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu sayede mühendislik sistemlerinde yalnızca sonuçların doğruluğu değil, sonuçların oluşum sürecinin de güvenilirliği değerlendirilebilmektedir (Guidotti vd., 2018:99).

Kararlılık (Robustness) ve Tutarlılık Analizi

Güvenilir yapay zekâ sistemlerinin temel özelliklerinden biri, küçük girdi değişiklikleri karşısında tutarlı ve kararlı çıktılar üretebilmesidir. Özellikle otonom sistemler, endüstriyel kontrol mekanizmaları ve enerji yönetim sistemlerinde, model kararlılığı sistem güvenliği açısından kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Arrieta vd., 2020:90).

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, modelin farklı senaryolarda hangi özellikleri ön plana çıkardığını göstererek kararlılık analizlerine katkı sağlamaktadır. Benzer girdiler için üretilen açıklamaların tutarlı olması, modelin güvenilirliğine dair önemli bir gösterge olarak değerlendirilmektedir. Buna karşılık, açıklamalardaki büyük farklılıklar,

modelin belirli koşullarda kararsız davranabileceğine işaret etmektedir (Doshi-Velez ve Kim, 2017:12).

Önyargı ve Hata Kaynaklarının Tespiti

Yapay zekâ sistemleri, eğitim verilerindeki dengesizlikler veya hatalı örüntüler nedeniyle önyargılı kararlar üretebilmektedir. Mühendislik uygulamalarında bu tür önyargılar, kaynakların yanlış tahsisi, güvenlik riskleri ve sistem performansında beklenmeyen düşüşler gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir (European Commission, 2020:6).

XAI metotları, model kararlarında belirli girdilerin aşırı derecede etkili olup olmadığını ortaya koyarak potansiyel önyargıların ve hata kaynaklarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Özellik önem analizleri ve yerel açıklamalar sayesinde, mühendislik açısından anlamsız veya riskli değişkenlerin model kararlarını yönlendirip yönlendirmediği değerlendirilebilmektedir (Guidotti vd., 2018:100).

İnsan Güveni ve Sistem Kabulü

Güvenilirlik değerlendirmesinin önemli bir boyutu da yapay zekâ sistemlerine duyulan insan güvenidir. Mühendislik uygulamalarında yapay zekâ çoğunlukla uzman kullanıcılar tarafından kullanılan veya insan kararlarını destekleyen bir araç olarak konumlandırılmaktadır. Bu nedenle kullanıcıların sistem çıktılarının nasıl üretildiğini anlayabilmesi, yapay zekâya duyulan güvenin oluşmasında belirleyici bir rol oynamaktadır (Siau ve Wang, 2018:52).

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, kullanıcıların model davranışlarını daha iyi kavramasına yardımcı olarak insan–makine etkileşimini güçlendirmektedir. Açıklanabilirlik sayesinde kullanıcılar, model hatalarını daha kolay fark edebilmekte ve gerektiğinde karar süreçlerine müdahale edebilmektedir. Bu durum, mühendislik sistemlerinde yapay zekânın kabul edilebilirliğini ve sürdürülebilir kullanımını artırmaktadır (Gunning, 2019:8).

Genel Değerlendirme

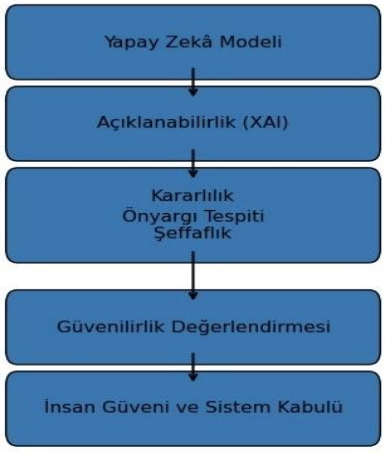
Mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesi, yalnızca performans metrikleriyle sınırlı olmayan bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Açıklanabilir yapay zekâ metotları, model doğruluğu, kararlılık, önyargı tespiti ve kullanıcı güveni gibi güvenilirliğin temel bileşenlerini bir arada ele alma imkânı sunmaktadır. Bu yönüyle XAI, mühendislikte güvenilir, şeffaf ve sorumlu yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesinde vazgeçilmez bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Açıklanabilir yapay zekâ metotlarının mühendislik uygulamalarında güvenilirlik değerlendirmesinin temel boyutlarına olan katkıları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2: XAI Metotlarının Güvenilirlik Değerlendirmesine Katkıları

Güvenilirlik Boyutu	**Açıklama**	**XAI'nin Katkısı**	**İlgili XAI Metotları**
Doğruluk ve Performans	Modelin doğru ve tutarlı sonuçlar üretme kapasitesi	Kararların hangi girdilere dayandığını göstererek performansın yorumlanmasını sağlar	LIME, SHAP
Kararlılık (Robustness)	Küçük girdi değişimlerine karşı tutarlı davranış	Farklı senaryolarda açıklamaların tutarlılığını analiz etmeye olanak tanır	LIME, SHAP
Önyargı (Bias) Tespiti	Modelin belirli girdilere aşırı bağımlılığı	Kritik değişkenlerin aşırı etkisini ortaya çıkarır	SHAP
Şeffaflık	Karar süreçlerinin anlaşılabilirliği	Model davranışlarının kullanıcıya açıklanmasını sağlar	LIME, SHAP, Grad-CAM
İnsan Güveni	Kullanıcıların sistemi benimsemesi	Açıklamalar sayesinde kullanıcı güvenini artırır	Tüm XAI metotları

Tablo 2'de yer alan değerlendirmeler, doğruluk, kararlılık, önyargı tespiti, şeffaflık ve kullanıcı güveni gibi kriterler çerçevesinde ele alınmış olup, ilgili literatürdeki kavramsal ve uygulamaya yönelik çalışmaların bütüncül bir sentezi niteliğindedir (Guidotti vd., 2018:99; Arrieta vd., 2020:95; Gunning, 2019:7).



Şekil 2: Açıklanabilir Yapay Zekâ Temelli Güvenilirlik Değerlendirme Süreci

Şekil 2'de, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ modellerinin açıklanabilirlik yaklaşımları aracılığıyla güvenilirlik değerlendirmesine nasıl katkı sağladığı kavramsal olarak gösterilmektedir. Açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yaklaşımları, kararlılık, önyargı tespiti ve şeffaflık gibi temel boyutlar üzerinden model davranışlarının analiz edilmesine olanak tanımakta; bu analizler sonucunda güvenilirlik değerlendirmesi yapılmakta ve insan güveni ile sistem kabulü desteklenmektedir.

UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarındaki etkisi, farklı alanlarda geliştirilen uygulama örnekleri üzerinden daha somut biçimde değerlendirilebilmektedir. Bu bölümde, otonom sistemler, endüstriyel karar destek sistemleri ve enerji yönetimi gibi mühendislik açısından kritik alanlarda XAI metotlarının güvenilirlik değerlendirmesine olan katkıları ele alınmaktadır.

Otonom Sistemlerde Açıklanabilir Yapay Zekâ

Otonom sistemler, çevresel verileri algılayarak bağımsız kararlar alabilen ve bu kararları fiziksel eylemlere dönüştüren mühendislik sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Otonom araçlar, insansız hava araçları ve robotik sistemler bu kapsamdaki başlıca uygulama alanları arasında yer almaktadır. Bu sistemlerde kullanılan derin öğrenme tabanlı modeller, yüksek doğruluk oranları sunmakla birlikte karar süreçlerinin şeffaf olmaması güvenilirlik açısından önemli bir sorun oluşturmaktadır (Arrieta vd., 2020:90).

Grad-CAM gibi görsel açıklanabilirlik yöntemleri, otonom sistemlerin algı süreçlerini görselleştirerek modelin hangi çevresel unsurlara odaklandığını ortaya koymaktadır. Bu tür açıklamalar, özellikle güvenlik açısından kritik kararların doğrulanmasına ve hatalı algılamaların tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Böylece otonom sistemlerde yapay zekâ kararlarının güvenilirliği artırılmakta ve insan operatörlerin sisteme müdahale edebilmesi kolaylaşmaktadır (Guidotti vd., 2018:101).

Endüstriyel Karar Destek Sistemleri

Endüstriyel mühendislik uygulamalarında yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri, üretim planlama, kalite kontrol ve kestirimci bakım gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, çok sayıda değişkeni eş zamanlı olarak değerlendirerek yöneticilere analitik destek sunmaktadır.

Ancak kararların hangi kriterlere dayandığının net biçimde açıklanamaması, kullanıcı güvenini olumsuz etkileyebilmektedir (Siau ve Wang, 2018:52).

LIME ve SHAP gibi modelden bağımsız açıklanabilirlik yöntemleri, endüstriyel karar destek sistemlerinde bireysel kararların yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Özellikle SHAP yöntemi, üretim performansını etkileyen değişkenlerin göreli önemini nicel olarak ortaya koyarak karar süreçlerinin şeffaflığını artırmaktadır. Bu durum, sistem çıktılarının mühendislik açısından daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Doshi-Velez ve Kim, 2017:12).

Akıllı Enerji Yönetim Sistemleri

Enerji mühendisliği alanında geliştirilen akıllı enerji yönetim sistemleri, enerji talep tahmini, üretim planlaması ve dağıtım optimizasyonu gibi karmaşık problemlerin çözümünde yapay zekâdan yoğun biçimde yararlanmaktadır. Bu sistemlerin güvenilirliği, enerji arz güvenliği ve sistem kararlılığı açısından büyük önem taşımaktadır (European Commission, 2020:6).

XAI yaklaşımları, enerji tüketim tahminlerinde kullanılan modellerin hangi girdilere daha fazla bağımlı olduğunu ortaya koyarak öngörü hatalarının nedenlerinin analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle SHAP tabanlı açıklamalar, hava koşulları, tüketim alışkanlıkları ve zaman faktörlerinin model çıktıları üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu sayede enerji yönetim sistemlerinde alınan kararların güvenilirliği artırılmakta ve olası riskler önceden değerlendirilebilmektedir (Arrieta vd., 2020:95).

Uygulama Örneklerinin Genel Değerlendirmesi

Ele alınan uygulama örnekleri, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının mühendislik sistemlerinde güvenilirlik değerlendirmesine önemli katkılar sağladığını göstermektedir. XAI metotları sayesinde yapay zekâ modellerinin karar süreçleri daha şeffaf hâle gelmekte, potansiyel hatalar ve önyargılar daha kolay tespit edilebilmekte ve kullanıcıların sisteme duyduğu güven artmaktadır.

Bu bağlamda açıklanabilir yapay zekâ, mühendislik uygulamalarında yalnızca teknik bir araç olarak değil, aynı zamanda güvenilir ve sürdürülebilir yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesini destekleyen bütüncül bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 3, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan açıklanabilir yapay zekâ (XAI) metotlarının, güvenilirlik değerlendirmesinin temel boyutlarına olan katkılarını özetlemektedir.

Tablo 3: Mühendislik Uygulamalarında XAI Metotlarının Güvenilirlik Değerlendirmesine Katkısı

Uygulama Alanı	**Kullanılan XAI Metodu**	**Değerlendirilen Güvenilirlik Boyutu**	**Sağlanan Katkı**
Otonom sistemler	Grad-CAM	Şeffaflık, kararlılık	Algı süreçlerinin görselleştirilmesi
Endüstriyel karar sistemleri	SHAP	Önyargı tespiti, güven	Girdi etkilerinin nicel analizi
Enerji yönetimi	SHAP	Kararlılık, doğrulanabilirlik	Tahmin hatalarının yorumlanması
Karar destek sistemleri	LIME	İnsan güveni	Yerel karar açıklamaları

Literatürde yapılan çalışmalar, XAI yaklaşımlarının yapay zekâ sistemlerinde şeffaflık, kararlılık ve önyargı tespiti gibi güvenilirlik kriterlerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Arrieta vd., 2020:85). Modelden bağımsız yöntemler olan LIME ve SHAP'ın, özellikle karar destek ve tahmin sistemlerinde bireysel kararların yorumlanabilirliğini artırarak kullanıcı güvenine katkı sağladığı vurgulanmaktadır (Ribeiro vd., 2016:1137; Lundberg ve Lee, 2017:4766). Derin öğrenme tabanlı görsel uygulamalarda kullanılan Grad-CAM yönteminin ise modelin algısal karar süreçlerini görünür kılarak sistem şeffaflığını desteklediği belirtilmektedir (Guidotti vd., 2018:101). Bu bağlamda tablo, XAI metotlarının mühendislik sistemlerinde yalnızca teknik açıklamalar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda güvenilirlik değerlendirmesi ve sistem kabulünün artırılmasında tamamlayıcı bir işlev üstlendiğini göstermektedir (Gunning, 2019:8; Siau ve Wang, 2018:52).

ETİK, HUKUKİ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Yapay Zekâ Sistemlerinde Etik Boyut

Mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin yaygınlaşması, teknik kazanımların yanı sıra önemli etik tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Özellikle karar alma süreçlerinde kullanılan yapay zekâ modellerinin şeffaf olmaması, sorumluluk, hesap verebilirlik ve adalet gibi temel etik ilkelerin ihlal edilmesine yol açabilmektedir. Bu durum, mühendislik sistemlerinde yapay zekâya dayalı kararların güvenilirliğini ve toplumsal kabulünü doğrudan etkilemektedir (Floridi vd., 2018:692).

Açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, etik açıdan sorun teşkil edebilecek karar mekanizmalarının görünür hâle getirilmesine katkı sağlamaktadır. Model çıktılarının hangi girdilere dayalı olarak üretildiğinin açıklanabilmesi, ayrımcı veya önyargılı kararların tespit edilmesini kolaylaştırmakta ve etik denetim süreçlerini desteklemektedir. Bu yönüyle XAI, mühendislik uygulamalarında etik yapay zekâ ilkelerinin hayata geçirilmesinde önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Arrieta vd., 2020:99).

Hukuki Düzenlemeler ve Açıklanabilirlik Gereksinimi

Yapay zekâ sistemlerinin mühendislik uygulamalarında artan kullanımı, mevcut hukuki çerçevelerin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle güvenlik açısından kritik sistemlerde alınan yapay zekâ temelli kararların hukuki sorumluluğu, açıklanabilirlik gereksinimini daha da ön plana çıkarmaktadır. Kara kutu niteliğindeki modellerin hukuki denetim süreçlerinde yeterli şeffaflığı sağlayamaması, yapay zekâ sistemlerinin yasal açıdan sorgulanmasına neden olmaktadır (Doshi-Velez ve Kim, 2017:3).

Avrupa Birliği tarafından yayımlanan Yapay Zekâ Yasası (AI Act) ve Güvenilir Yapay Zekâ rehberleri, yüksek riskli yapay zekâ sistemlerinde açıklanabilirlik, izlenebilirlik ve insan denetimi gibi ilkeleri zorunlu kılmaktadır. Bu düzenlemeler, mühendislik uygulamalarında kullanılan yapay zekâ modellerinin yalnızca performans açısından değil, aynı zamanda hukuki uyumluluk açısından da değerlendirilmesini gerektirmektedir (European Commission, 2020:8). Bu bağlamda XAI yaklaşımları, mühendislik sistemlerinin hukuki gerekliliklerle uyumlu hâle getirilmesinde kritik bir rol üstlenmektedir.

Gelecek Perspektifi ve Araştırma Yönelimleri

Açıklanabilir yapay zekâ alanındaki güncel araştırmalar, mühendislik uygulamalarında daha bütüncül ve kullanıcı odaklı açıklama yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelmektedir. Gelecekte XAI metotlarının, yalnızca model çıktılarının açıklanmasına değil; model geliştirme, doğrulama ve bakım süreçlerine entegre edilmesi beklenmektedir. Bu durum, yapay zekâ sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca güvenilirliğinin değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır (Guidotti vd., 2018:110).

Bunun yanı sıra, insan-merkezli açıklanabilirlik yaklaşımlarının geliştirilmesi, farklı kullanıcı profillerinin açıklama ihtiyaçlarının dikkate alınmasını gerektirmektedir. Mühendisler, karar vericiler ve son kullanıcılar için farklı açıklama düzeyleri sunabilen XAI sistemleri, gelecekte mühendislik uygulamalarında daha yaygın hâle gelecektir. Bu eğilim, yapay zekâ sistemlerinin teknik başarısının yanı sıra etik, hukuki ve toplumsal kabulünün de artırılmasına katkı sağlayacaktır (Gunning, 2019:9).

SONUÇ

Mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin giderek daha yaygın ve kritik roller üstlenmesi, bu sistemlerin yalnızca yüksek performans göstermesini değil; aynı zamanda güvenilir, şeffaf ve denetlenebilir biçimde çalışmasını zorunlu hâle getirmektedir. Özellikle güvenlik, maliyet ve insan sağlığını doğrudan etkileyen mühendislik alanlarında, yapay zekâya dayalı kararların gerekçelendirilebilir olması, sistemlerin kabul edilebilirliği açısından temel bir gereksinim olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yaklaşımlarının mühendislik uygulamalarında güvenilirlik değerlendirmesine sağladığı katkıları bütüncül bir çerçevede ele alarak bu gereksinime yanıt vermeyi amaçlamıştır.

Çalışma kapsamında, mühendislikte yapay zekânın kullanım alanları, açıklanabilirlik ihtiyacının ortaya çıkışı ve XAI kavramının temel bileşenleri sistematik biçimde incelenmiştir. LIME, SHAP ve Grad-CAM gibi yaygın XAI metotları; açıklama türleri, model bağımlılıkları ve kullanım alanları açısından karşılaştırılarak mühendislik uygulamalarındaki işlevleri ortaya konulmuştur. Elde edilen değerlendirmeler, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının yalnızca model çıktılarının yorumlanmasını kolaylaştırmakla kalmadığını, aynı zamanda güvenilirlik değerlendirmesinin doğruluk, kararlılık, önyargı tespiti, şeffaflık ve insan güveni gibi temel boyutlarını desteklediğini göstermektedir.

Güvenilirlik değerlendirmesine ilişkin yapılan analizler, yüksek doğruluk değerlerinin tek başına güvenilir bir yapay zekâ sistemi için yeterli olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. XAI metotları, model davranışlarının farklı senaryolar altında nasıl değiştiğini görünür kılarak, kararlılık ve tutarlılık analizlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, model kararlarında belirli girdilere aşırı bağımlılıkların tespit edilebilmesi, mühendislik sistemlerinde potansiyel önyargı ve hata kaynaklarının erken aşamada belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle açıklanabilirlik, güvenilirlik değerlendirmesini tamamlayıcı değil, doğrudan belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Otonom sistemler, endüstriyel karar destek sistemleri ve akıllı enerji yönetimi gibi farklı mühendislik alanlarından sunulan uygulama örnekleri, XAI yaklaşımlarının pratikte nasıl değer ürettiğini somut biçimde göstermektedir. Bu örnekler, açıklanabilir yapay zekâ metotlarının mühendislik sistemlerinde insan–makine etkileşimini güçlendirdiğini, kullanıcıların sisteme duyduğu güveni artırdığını ve yapay zekâ tabanlı kararların daha bilinçli biçimde değerlendirilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Etik ve hukuki boyutlar açısından değerlendirildiğinde ise açıklanabilir yapay zekânın, sorumluluk, hesap verebilirlik ve adalet gibi temel ilkelerin mühendislik uygulamalarında hayata geçirilmesinde kritik bir rol üstlendiği görülmektedir. Özellikle yüksek riskli yapay zekâ sistemlerine

yönelik güncel düzenlemeler, açıklanabilirliği teknik bir tercih olmaktan çıkararak zorunlu bir tasarım kriteri hâline getirmektedir. Bu bağlamda XAI, mühendislik uygulamalarında güvenilir ve sorumlu yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi için stratejik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımları, mühendislik uygulamalarında yapay zekâ sistemlerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde vazgeçilmez bir araç niteliği taşımaktadır. XAI'nin sistematik ve bilinçli biçimde kullanılması, mühendislikte şeffaf, güvenilir ve sürdürülebilir yapay zekâ çözümlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların, açıklanabilirliği yapay zekâ sistemlerinin tüm yaşam döngüsüne entegre eden, alan-özel ve kullanıcı odaklı yaklaşımlara odaklanması; mühendislik uygulamalarında yapay zekânın daha güvenli ve etkin biçimde kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

REFERANSLAR

Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., ve Herrera, F. (2020). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion, 58*, 82–115.

Doğan, İ. (2006). *Mühendislikte karar verme yöntemleri*. Ankara: Nobel Yayıncılık.

Doshi-Velez, F. ve Kim, B. (2017). Towards a rigorous science of interpretable machine learning. *arXiv preprint arXiv:1702.08608*.

European Commission. (2020). *Ethics guidelines for trustworthy AI*. Brussels: European Union.

European Commission. (2020). *White paper on artificial intelligence: A European approach to excellence and trust*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., Luetge, C., Madelin, R., Pagallo, U., Rossi, F., Schafer, B., Valcke, P., ve Vayena, E. (2018). AI4People—An ethical framework for a good AI society. *Minds and Machines, 28*(4), 689–707.

Guidotti, R., Monreale, A., Ruggieri, S., Turini, F., Giannotti, F., ve Pedreschi, D. (2018). A survey of methods for explaining black box models. *ACM Computing Surveys, 51*(5), 1–42.

Gunning, D. (2019). Explainable artificial intelligence (XAI). *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, 1–10.

Lipton, Z. C. (2018). The mythos of model interpretability. *Communications of the ACM, 61*(10), 36–43.

Lundberg, S. M. ve Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems, 30*, 4765–4774.

Ocak, M. A. ve Akdemir, Ö. (2009). Yapay zekâ uygulamalarında güven ve performans değerlendirmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15*(2), 139–150.
Ribeiro, M. T., Singh, S., ve Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1135–1144.
Russell, S. ve Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4. bs.). Pearson Education.
Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., ve Batra, D. (2017). Grad-CAM: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 618–626.
Siau, K. ve Wang, W. (2018). Building trust in artificial intelligence, machine learning, and robotics. *Cutter Business Technology Journal, 31*(2), 47–53.

Aort Anevrizmasının Konumu ve Çapının Kan Akışı Üzerindeki Etkilerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi

Hakan BAYRAKCI[1*]
Arif ÇUTAY [1]
Özdeş ÇERMİK [1]

[1]Makine Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Türkiye
[*](bayrakcihakan046@gmail.com)

ÖZET

Aort anevrizmaları, damar duvarında yerel genişleme ile karakterize, rüptür riski yüksek ve yaşamı tehdit eden vasküler patolojilerdir. Klinik uygulamada anevrizma çapı temel bir risk göstergesi olarak kullanılmakla birlikte, anevrizmanın aort üzerindeki anatomik konumu ve buna bağlı gelişen hemodinamik koşulların da hastalığın ilerleyişinde önemli rol oynadığı bilinmektedir. Bu çalışmada, aort anevrizmasının farklı konumları ve çaplarının kan akışı üzerindeki etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çıkan aort, aort yayı ve inen aortu temsil eden idealize üç boyutlu geometriler oluşturulmuş, her bir konum için farklı anevrizma çapları tanımlanarak geometrik değişimlerin akış yapısı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Kan, sıkıştırılamaz ve Newtonyen bir akışkan olarak modellenmiş, fizyolojik koşulları temsil edebilmek amacıyla zamana bağlı atımlı giriş sınır şartları uygulanmıştır. Analizlerde hız dağılımları, akış ayrılması ve resirkülasyon bölgeleri ile birlikte zaman ortalamalı duvar kayma gerilmesi (TAWSS), osilatuvar kayma indeksi (OSI) ve göreli kalış süresi (RRT) gibi temel hemodinamik parametreler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, anevrizma çapının artmasıyla birlikte anevrizma kesesi içerisinde hızların azaldığını, akış düzensizliklerinin ve resirkülasyon bölgelerinin belirginleştiğini göstermiştir. Özellikle düşük TAWSS ve yüksek OSI ile RRT değerlerinin, anevrizmanın konumuna bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, aort anevrizmalarında hemodinamik davranışın hem çap hem de anatomik konumdan güçlü biçimde etkilendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Aort Anevrizması, Kan Akışı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(HAD), Zaman Ortalamalı Duvar Kayma Gerilmesi, Hemodinamik Analiz.

GİRİŞ

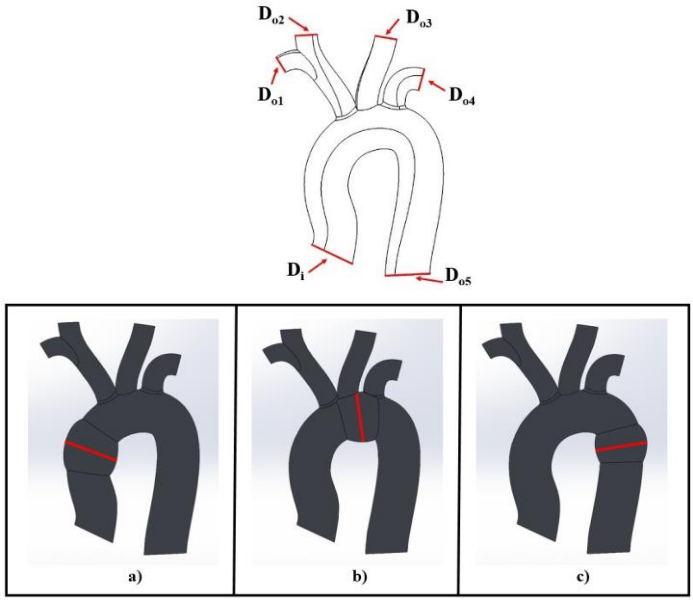
Hasta-özel hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları, aort anevrizmalarında geometrik özellikler ile hemodinamik davranışlar arasındaki ilişkiyi nicel olarak ortaya koyarak, geleneksel çap temelli klinik değerlendirme yaklaşımlarının ötesinde daha kapsamlı bir risk analizine olanak sağlamaktadır. Xenos ve ark. çıkan aort anevrizmalarında hasta-özel HAD analizleri kullanarak, artan aort çapı ve geometrik eğriliğin ikincil ve helisel akış yapılarının güçlenmesine yol açtığını göstermiştir. Çalışma, özellikle aort yayına yakın bölgelerde duvar kayma gerilmesi dağılımlarının belirgin biçimde heterojenleştiğini ve karmaşık akış davranışlarının ortaya çıktığını vurgulamaktadır. Hope ve ark. biküspit aort kapağı (BAV) ile ilişkili çıkan aort anevrizmalarında asimetrik jet oluşumlarının hemodinamik davranış üzerindeki etkisini incelemiştir. Hasta-özel HAD sonuçları, eksantrik jetlerin belirli duvar bölgelerinde artmış kayma gerilmesi ve osilatuvar akış koşulları oluşturduğunu, bunun da bölgesel duvar yüklerini

artırdığını ortaya koymuştur. Ferreira ve ark. çıkan aort anevrizmalarında hemodinamik göstergelerin klinik risk değerlendirmedeki rolünü ele almış ve çap temelli kriterlerin tek başına yetersiz kalabileceğini raporlamıştır. Çalışma, TAWSS ve OSI gibi akış temelli parametrelerin anevrizma ilerlemesini daha iyi yansıtabileceğini göstermiştir. Gallo ve ark. HAD tabanlı stres analizleriyle çıkan aort anevrizmalarında akış kaynaklı duvar yüklerini değerlendirmiştir. Yazarlar, hemodinamik yüklerin bölgesel olarak değişkenlik gösterdiğini ve potansiyel rüptür riskinin yalnızca geometrik büyüklüklerle açıklanamayacağını vurgulamıştır. Bäumler ve ark. idealize ve hasta-özel çıkan aort geometrilerini karşılaştırarak, geometrik varyasyonların akış stabilitesi ve osilatuvar davranış üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Çalışma, küçük geometrik değişimlerin dahi hemodinamik metriklerde anlamlı farklılıklara yol açabileceğini ortaya koymuştur. Migliavacca ve ark. inen torasik aort anevrizmalarında TEVAR öncesi ve sonrası hemodinamik değişimleri hasta-özel HAD analizleriyle incelemiştir. Sonuçlar, stent-greft yerleşiminin akış yönelimi, hız dağılımı ve duvar kayma gerilmesi üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Chen ve ark. inen aort anevrizmalarında göreli kalış süresine (RRT) odaklanarak, anevrizma kesesi içinde düşük hız bölgeleri ve uzun kalış sürelerinin oluştuğunu raporlamıştır. Çalışma, RRT'nin DTAA için birleşik bir hemodinamik risk göstergesi olabileceğini öne sürmektedir. Georgakarakos ve ark. inen torasik aort anevrizmalarında düşük TAWSS ile karakterize edilen bölgelerin tromboz eğilimiyle ilişkili olabileceğini HAD sonuçlarıyla göstermiştir. Yazarlar, anevrizma içindeki düşük kayma bölgelerinin klinik açıdan kritik olabileceğini vurgulamıştır. Morris ve ark. idealize inen aort anevrizma modellerinde yaptığı HAD analizlerinde, geometrik asimetrinin akış ayrılması ve vorteks oluşumunu artırdığını göstermiştir. Bu çalışma, anevrizma şeklinin akış yapısı üzerindeki etkisini erken dönemde ortaya koyan çalışmalardan biridir. Zhang ve ark. hasta-özel inen aort anevrizmalarında TAWSS, OSI ve RRT parametrelerini birlikte değerlendirerek, RRT'nin karmaşık akış koşullarında güçlü bir birleşik risk göstergesi sunduğunu raporlamıştır. Çalışma, DTAA hemodinamiğinin çok parametreli bir bakış açısıyla ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Her ne kadar hasta-özel HAD çalışmaları aort anevrizmalarında geometrik özellikler ile yerel hemodinamik parametreler arasındaki ilişkiyi ayrıntılı biçimde ortaya koymuş olsa da, çıkan aort, aort yayı ve inen aort gibi farklı anatomik konumlarda yer alan anevrizmaların, çap değişimiyle birlikte TAWSS, OSI ve özellikle göreli kalış süresi (RRT) gibi birleşik hemodinamik göstergeler açısından aynı idealize modelleme ve çözüm çerçevesi içinde sistematik ve karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermek amacıyla, farklı anatomik konumlarda tanımlanan aort anevrizmalarının çapla birlikte değişen hemodinamik etkilerini idealize üç boyutlu HAD modelleri kullanarak karşılaştırmalı biçimde incelemektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, aort anevrizmasının farklı anatomik konumları ve çaplarının kan akışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla idealize üç boyutlu aort geometrileri oluşturulmuştur. Anevrizma modelleri çıkan aort, aort yayı ve inen aort olmak üzere üç farklı anatomik bölgede tanımlanmıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere her bir konum için anevrizma çapı 30 mm, 35 mm ve 40 mm olacak şekilde üç farklı senaryo oluşturulmuş ve toplamda dokuz farklı anevrizmalı aort modeli elde edilmiştir. Anevrizmanın hemodinamik etkilerini ortaya koyabilmek amacıyla, anevrizma içermeyen sağlıklı aort modeli referans vaka olarak kullanılmış, geometrik parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Tüm anevrizmalı modeller bu geometri ile karşılaştırılmıştır.

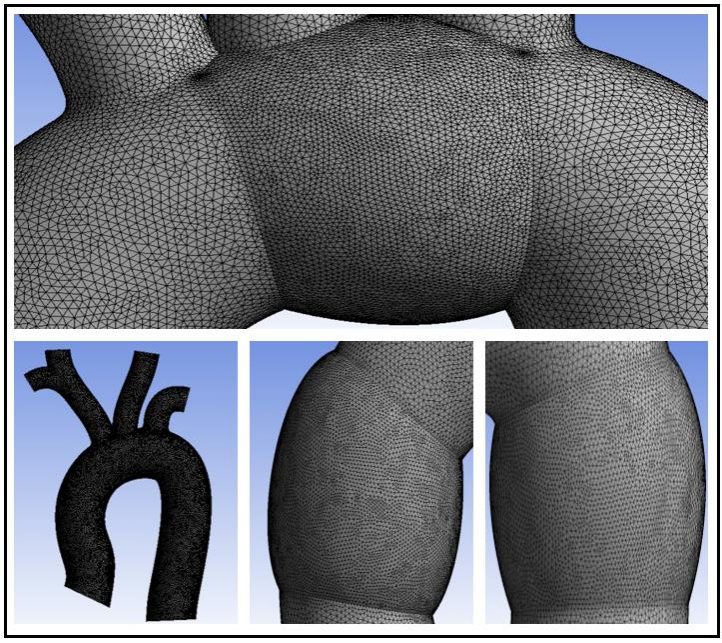


Şekil 1. Anevrizmasız aort teknik resmi ve anevrizma konumları a) çıkan aort, b) aort yayı ve c) inen aort 3B modeli

Tablo 1. Geometri ölçüleri

Çap	Uzunluk(mm)
Çıkan Aort Giriş Çapı (D_i)	25
Sağ Subklavyen Arteri (D_{o1})	10
Sağ Ortak Karotis Arteri (D_{o2})	12.5
Sol Ortak Karotis Arteri (D_{o3})	12.5
Sol Subklavyen Arteri (D_{o4})	12.5
İnen Aort Çıkış Çapı (D_{o5})	25

Tüm geometriler SolidWorks yazılımı kullanılarak oluşturulmuş, akış analizleri ANSYS 2021 R2 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplama alanı, temel eleman boyutu 0,75 mm olacak şekilde ağlandırılmıştır. Anevrizma bölgelerinde akış gradyanlarını daha hassas yakalayabilmek amacıyla 0,5 mm eleman boyutuna sahip yerel yüzey ağ iyileştirmesi uygulanmıştır. Duvar kayma gerilmesi gibi yüzeye duyarlı hemodinamik parametrelerin doğru hesaplanabilmesi için damar duvarlarında 12 katmanlı sınır tabaka ağı tanımlanmış ve katmanlar için büyüme oranı 1,1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Anevrizmasız aort ve anevrizma bölgeleri ağ yapısı

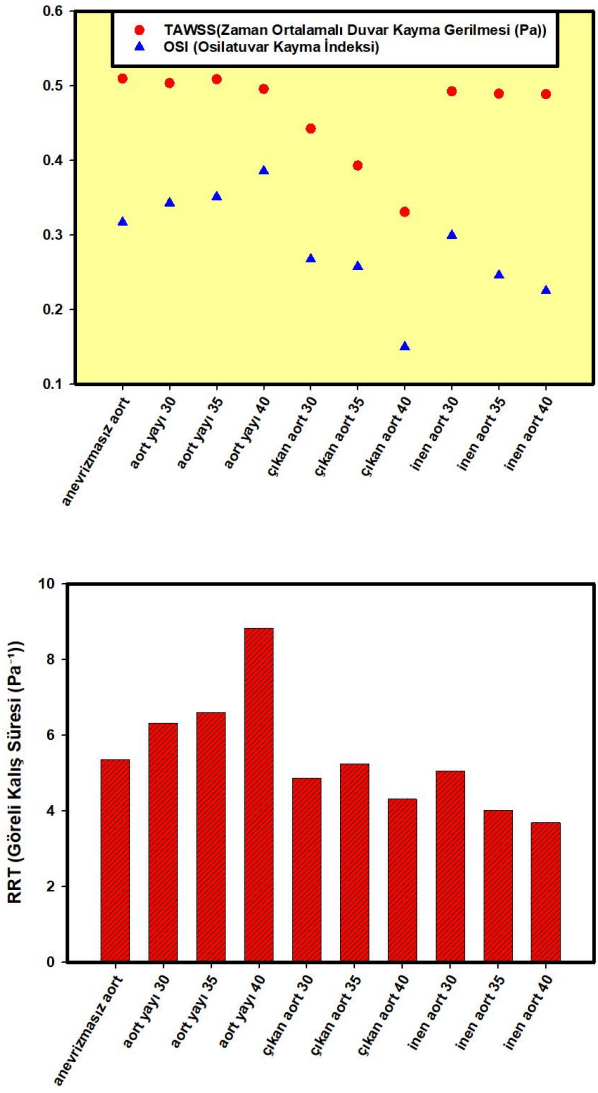
Tablo 2. Ağ yapısı özellikleri

Geometri	Eleman Sayısı	Maks. Skewness	Min. Orthogonal Quality
Anevrizmasız Aort	1334641	0.6623	0.42312
Aort Yayı 30 mm	1528779	0.6627	0.33653
Aort Yayı 35 mm	1629747	0.6329	0.33649
Aort Yayı 40 mm	1752242	0.6357	0.36338
Çıkan Aort 30 mm	1597785	0.6617	0.3375
Çıkan Aort 35 mm	1691943	0.6109	0.3781
Çıkan Aort 40 mm	1818895	0.6173	0.3852
İnen Aort 30 mm	1528061	0.6192	0.3377
İnen Aort 35 mm	1633692	0.6268	0.3381
İnen Aort 40 mm	1751093	0.6374	0.3392

Kan, sıkıştırılamaz ve Newtonyen bir akışkan olarak modellenmiş, akış rejimi laminer kabul edilmiştir. Fizyolojik koşulları temsil edebilmek amacıyla zamana bağlı atımlı giriş sınır şartları tanımlanmış[10], çıkış sınırlarında basınç 0 Pa olarak atanmıştır. Basınç–hız bağlaştırması için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Momentum denklemlerinin çözümünde birinci dereceden ayrıklaştırma şeması, basınç denklemi için ise ikinci dereceden ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır. Tüm çözümler zamana bağlı (transient) olarak yürütülmüştür. Zaman adımı duyarlılık analizini değerlendirmek amacıyla çözümler 0,005 s ve 0,001 s olmak üzere iki farklı zaman adımı ile gerçekleştirilmiş ve zamana bağlı akış karakteristikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında hız dağılımları, akış ayrılması ve resirkülasyon bölgeleri ile birlikte zaman ortalamalı duvar kayma gerilmesi (TAWSS), osilatuvar kayma indeksi (OSI) ve bağıl akışkan kalış süresi (RRT) gibi temel hemodinamik parametreler hesaplanmış ve anevrizmanın konumu ile çapına bağlı olarak değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Şekil 3'te sunulan göreli kalış süresi (RRT) dağılımları, farklı aort geometrik konfigürasyonlarının hemodinamik parametreler üzerinde belirgin farklılıklara yol açtığını göstermektedir. En yüksek RRT değeri aort yayı 40° konfigürasyonunda elde edilirken, anevrizmasız aort referans duruma kıyasla aort yayı açısının artmasıyla RRT'nin düzenli olarak yükseldiği gözlenmiştir. Buna karşılık, aynı açı artışı çıkan ve inen aort bölgelerinde daha sınırlı bir değişim oluşturmuş ve özellikle inen aort 40° konfigürasyonu en düşük RRT değerlerinden birini sergilemiştir.

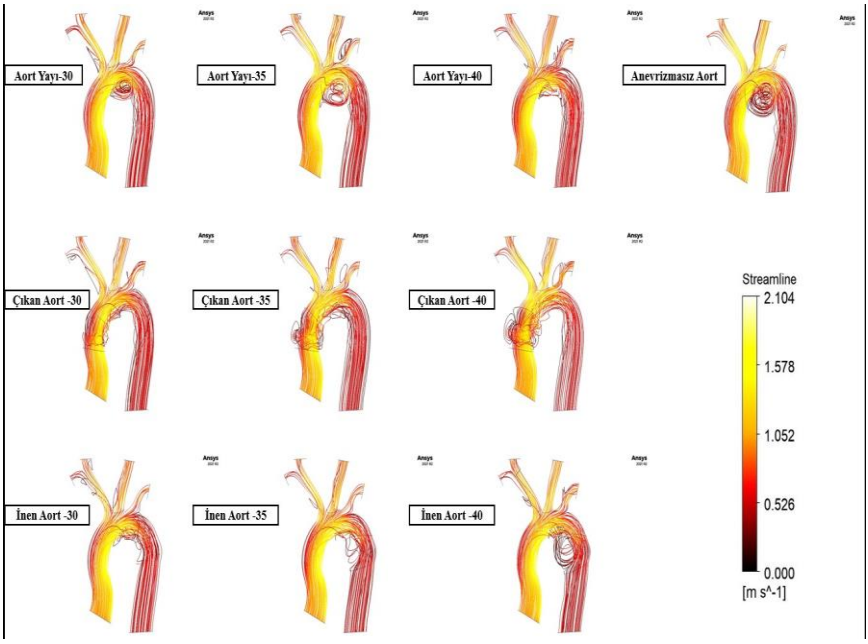


Şekil 3. TAWSS OSI ve RRT grafiği

Zaman ortalamalı duvar kayma gerilmesi (TAWSS) ve osilatuvar kayma indeksi (OSI) değerlerinin birlikte sunulduğu grafikte, hemodinamik parametrelerin bölgesel dağılımları açıkça ayırt edilebilmektedir. Anevrizmasız aort ve aort yayı konfigürasyonlarında TAWSS değerlerinin yaklaşık 0.5 Pa civarında seyrettiği, çıkan aort 40° konfigürasyonunda minimum seviyeye indiği ve inen aort bölgesinde yeniden artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. OSI dağılımları incelendiğinde, aort yayı açısının artmasıyla birlikte osilatuvar kayma etkilerinin güçlendiği ve en yüksek OSI değerlerinin aort yayı 40° konfigürasyonunda ortaya çıktığı gözlenmiştir. Buna karşılık, çıkan aort 40° konfigürasyonu en düşük OSI değerleriyle karakterize edilmiştir. Akım çizgileri, aort geometrisindeki bölgesel konfigürasyon ve açı değişimlerinin akış yapısı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Aort yayı konfigürasyonlarında, Şekil 4'te özellikle açı arttıkça (30° → 40°), akım çizgilerinin belirgin biçimde kıvrıldığı, ikincil akış yapılarının güçlendiği ve yerel girdap bölgelerinin ortaya çıktığı gözlenmektedir. Bu durum, aort yayında akışın yön değiştirme sıklığının arttığını ve akımın duvar yakınında daha karmaşık bir yapı sergilediğini göstermektedir. Aort yayı 40° konfigürasyonunda, akım çizgilerinin iç eğrilik boyunca yoğunlaştığı ve belirgin helisel yapıların oluştuğu dikkat çekmektedir. Bu helisel ve dönel akış yapıları, akışın belirli bölgelerde daha uzun süre tutulmasına neden olabilecek karakterdedir. Bu gözlem, eğrisel bölgelerde osilatuvar akış bileşenlerinin baskın hâle geldiğini gösteren literatürle uyumludur. Çıkan aort konfigürasyonlarında, açı artışına rağmen akım çizgilerinin görece daha düzenli ve eksenel yönelimini koruduğu görülmektedir. Yerel vorteks oluşumları sınırlı kalmakta ve akış, aort yayına kıyasla daha kararlı bir yapı sergilemektedir. Bu durum, çıkan aort bölgesinde geometrik değişimlerin akış yapısını sınırlı ölçüde etkilediğini ve yön değişiminin daha kontrollü gerçekleştiğini göstermektedir.

İnen aort konfigürasyonlarında ise akım çizgileri büyük ölçüde düzgün ve paralel bir dağılım sergilemektedir. Açı artışıyla birlikte yalnızca sınırlı helisel yapılar gözlenmekte, ancak aort yayında görülen belirgin girdap ve geri akım bölgeleri oluşmamaktadır. Bu daha düzenli akış davranış şekli, inen aortta daha stabil bir hemodinamik ortamın varlığına işaret etmektedir. Anevrizmasız aort referans durumu, akım çizgilerinin genel olarak düzenli ancak aort yayı bölgesinde doğal eğriliğe bağlı olarak sınırlı ikincil akış yapılarını içerdiğini göstermektedir. Bu yapı, patolojik olmayan geometrilerde dahi eğrisel bölgelerin akış karmaşıklığına yatkın olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 0.2s anında akım çizgileri

TARTIŞMA

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, aort geometrisindeki bölgesel konfigürasyon ve açı değişimlerinin hemodinamik davranış üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle aort yayı gibi eğrisel bölgelerde, geometrik eğriliğin artmasıyla akış yönünün daha sık değiştiği ve bunun osilatuvar kayma etkilerini güçlendirdiği görülmektedir. Bu mekanizma, düşük duvar kayma gerilmesi ve yüksek osilatuvar akışın aterojenik eğilimle ilişkili olduğunu bildiren önceki çalışmalarla uyumludur.

Literatürde çoğu çalışma TAWSS ve OSI'yi ayrı ayrı değerlendirmiştir; ancak bu çalışmada göreli kalış süresi (RRT) üzerinden bu parametrelerin birleşik etkisi vurgulanmaktadır. Bu yaklaşım, tekil hemodinamik göstergelerin sınırlı kalabildiği karmaşık akış bölgelerinde daha bütüncül bir risk değerlendirmesi sunmaktadır. Ayrıca, farklı aort bölgelerinin aynı metodolojik çerçevede karşılaştırılması, geometrik değişimlere verilen

hemodinamik yanıtın bölgesel olarak farklılaştığını göstermesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

Genel olarak, çalışma, aort yayı geometrisindeki açısal değişimlerin osilatuvar akış bileşenlerini baskın hâle getirdiğini ve bunun göreli kalış süresini artırarak potansiyel hemodinamik riskleri güçlendirdiğini ortaya koymakta; bu yönüyle, aort hemodinamiğine ilişkin mevcut bilgi birikimini tamamlayıcı nitelikte bir katkı sunmaktadır.

SONUÇLAR

- Aort geometrisindeki bölgesel konfigürasyon ve açı değişimleri, RRT, TAWSS ve OSI parametreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.
- Aort yayı bölgesinde açı artışı, özellikle 40° konfigürasyonunda, osilatuvar akış etkilerini belirgin şekilde artırmış ve buna bağlı olarak göreli kalış süresinin maksimum seviyelere ulaşmasına neden olmuştur.
- Anevrizmasız aort referans duruma kıyasla aort yayı açısının artması, akışın duvar yakınında daha uzun süre kalmasıyla ilişkilendirilmiş ve RRT artışıyla sonuçlanmıştır.
- Çıkan ve inen aort bölgelerinde aynı geometrik değişim, aort yayına kıyasla daha sınırlı hemodinamik etkiler üretmiş; özellikle inen aort 40° konfigürasyonu daha kararlı bir akış karakteri sergilemiştir.
- Yüksek OSI ve görece düşük veya orta düzey TAWSS kombinasyonunun, RRT artışıyla doğrudan ilişkili olduğu ve bu ilişkinin aort yayı geometrisinde daha belirgin hale geldiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Xenos, M., Rambhia, S. H., Alemu, Y., Einav, S. ve Bluestein, D. Hasta-özel hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak ascending aortta kan akışının modellenmesi. *Journal of Biomechanics*, 43(9), 1776–1781.

[2] Hope, M. D., Hope, T. A., Meadows, A. K., Ordovas, K. G., Reddy, G. P. ve Higgins, C. B. Biküspit aort kapağında ascending aorttaki sistolik akış paternlerinin dört boyutlu görüntüleme ile değerlendirilmesi. *Radiology*, 255(1), 53–61.

[3] Ferreira, A., Pirola, S., Guo, B. ve Xu, X. Y. Ascending aort anevrizmalarında hemodinamik risk faktörlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile değerlendirilmesi. *Computers in Biology and Medicine*, 146, 105578.

[4] Gallo, D., De Santis, G., Negri, F., Tresoldi, D., Ponzini, R. ve Rizzo, G. Ascending aort anevrizmalarında hemodinamik gerilmeler ve akış kaynaklı yüklerin CFD tabanlı analizi. *Bioengineering*, 11(2), 184.

[5] Bäumler, K., Vedula, V., Sailer, A. M., Seo, J. H., Chiu, P., Mistelbauer, G. ve Mittal, R. Hasta-özel ascending aort modellerinde akışkanlar dinamiği: Geometrinin rolü. *Journal of Biomechanics*, 135, 110984.

[6] Migliavacca, F., Petrini, L., Massarotti, P., Schievano, S., Auricchio, F. ve Dubini, G. İnen torasik aort anevrizmalarında endovasküler onarımın hemodinamik etkilerinin hasta-özel CFD analizi. *Artificial Organs*, 40(10), E146–E157.

[7] Chen, Z., Fan, Y., Deng, X. ve Liu, Y. İnen torasik aort anevrizmalarında göreli kalış süresinin hasta-özel CFD ile değerlendirilmesi. *Physics of Fluids*, 37(1), 011903.

[8] Georgakarakos, E., Ioannou, C. V., Volanis, S., Papaharilaou, Y. ve Katsamouris, A. N. İnen torasik aort anevrizmalarının hemodinamik değerlendirilmesi: CFD tabanlı bir çalışma. *Journal of Vascular Surgery*, 68(5), 1478–1488.

[9] Morris, L., Delassus, P., Walsh, M. ve McGloughlin, T. Hasta-özel abdominal aort anevrizmalarında hemodinamiğin hesaplamalı analizi. *Medical Engineering & Physics*, 30(1), 59–70.

[10] Çutay, A. ve Çermik, Ö. Aortik damarda farklı kalp atım hızlarının kan akış dinamiği üzerindeki etkilerinin sayısal analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1064–1080.

Plazma Aktif Su Uygulamasının Gıdaların Kalitesi ve Bileşenleri Üzerine Etkisi

Berkay KOPUK[1]
Recep GÜNEŞ[2]
Harun URAN[3]

1- Öğr. Gör.; Kırklareli Üniversitesi Gıda Ar-Ge İnovasyon ve Girişimcilik Uygulama ve Araştırma Merkezi. berkaykopuk@klu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7321-9642
2- Doç. Dr.; Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. recepgunes@klu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8007-8697
3- Doç. Dr.; Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü. harununran@klu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3161-6698

ÖZET

Plazma aktif su (PAS), antimikrobiyal etkinliği ve çevre dostu olması nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Geleneksel dezenfektanlara kıyasla yeni ve ilgi çekici bir opsiyon olan PAS, gıda maddelerinde önemli bir değişim meydana getirmeden yüksek dezenfektan kapasitesine sahiptir. Günümüze kadar yapılan birçok araştırmada PAS, çok çeşitli gıda maddelerinde geniş bir mikroorganizma yelpazesine karşı etkinliğini başarıyla kanıtlamıştır. PAS'ın gıdalarda mikrobiyal yükü azaltmada etkinliği kapsamlı bir şekilde incelenmiş olsa da, gıdaların kalitesi üzerine etkisi büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Son araştırmalara göre PAS, et ve et ürünleri, su ürünleri, meyve ve sebzeler, tahıl ürünleri vb. gibi çok çeşitli gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatan potansiyel bir mikrobiyal dezenfektan olabilir. Ancak etkinliği uygulama koşullarına ve uygulanan gıda bileşenlerine göre değişiklik gösterebilir. Diğer taraftan PAS'ın gıda kalitesi üzerindeki etkisi konusunda farklı görüşler bulunmaktadır. Mevcut literatüre dayanarak, test edilen gıda ürünlerinin çoğunun PAS uygulamasından sonra biyokimyasal özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, gıda kalitesini etkilemeden etkinliğini en iyi şekilde kullanmak için PAS parametrelerini optimize etmek üzere daha fazla çalışma yapılması gerektiği açıktır. Bu çalışma, gıda kalitesi ve güvenliğine odaklanarak, PAS'ın hem fizikokimyasal özellikleri ve antimikrobiyal potansiyeli hakkındaki mevcut çalışmaları, hem de gıdaların çeşitli özellikleri üzerine etkilerini inceleyen araştırmaları derinlemesine ele alarak özetlemeyi amaçlamıştır.

Anahtar Kelimeler – Soğuk Plazma, Plazma Aktif Su, Reaktif Türler, Gıda Kalitesi, Fizikokimyasal Özellik, Duyusal Özellik.

GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış ve buna bağlı olarak gelişen tüketici bilinci, gıda endüstrisini hem daha güvenli hem de besin değeri korunmuş gıdalar üretmeye zorlamaktadır. Geleneksel termal işleme yöntemleri, gıdalardaki patojenlerin inaktivasyonunda oldukça etkili olsa da, yüksek sıcaklık uygulamaları vitaminler, antioksidanlar ve renk pigmentleri gibi ısıya duyarlı bileşenlerde geri dönüşümsüz kayıplara neden olabilmekte, gıdanın duyusal kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Tendero vd., 2006). Bu sınırlamalar, araştırmacıları ve gıda üreticilerini minimum işlem görmüş, doğal özelliklerini koruyan ve kimyasal kalıntı bırakmayan yenilikçi gıda işleme teknikleri arayışına yöneltmiştir (Mir vd., 2016). Bu bağlamda, "engel teknolojisi" yaklaşımıyla geliştirilen yeni nesil teknolojiler, gıda güvenliğini sağlarken ürünün taze benzeri karakteristiklerini muhafaza etme noktasında büyük bir potansiyel sunmaktadır.

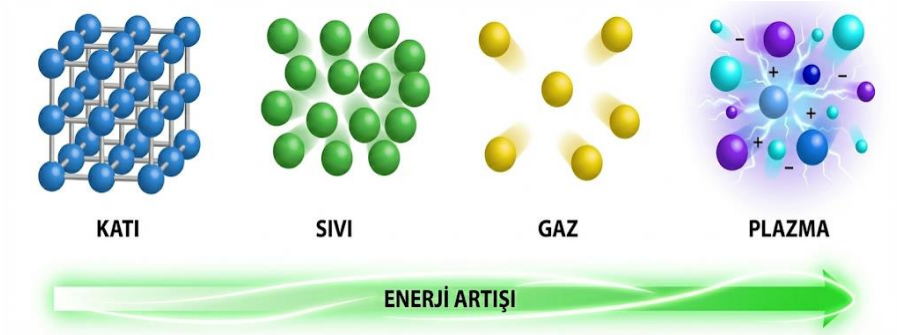
Son yıllarda dikkat çeken bu yenilikçi teknolojilerin başında, maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan "soğuk plazma" gelmektedir. Plazma; elektronlar, iyonlar, serbest radikaller ve uyarılmış moleküller gibi oldukça reaktif türleri içeren iyonize bir gazdır (Kopuk vd., 2022; Surowsky vd., 2015). Geleneksel plazmanın aksine soğuk plazma, oda sıcaklığına yakın koşullarda üretilebilmesi sayesinde ısıya duyarlı gıda ürünlerinin dekontaminasyonunda stratejik bir avantaj sağlamaktadır. Plazma teknolojisinin doğrudan gıda yüzeylerine uygulanması (katı gıdalar gibi) başarılı sonuçlar verse de, bu teknolojinin daha geniş uygulama alanlarına yayılması amacıyla plazmanın sıvılarla etkileşime sokulması üzerine yoğunlaşılmıştır (Pankaj vd., 2018).

Plazma aktif su (PAS), distile su veya şebeke suyu gibi sıvıların plazma deşarjına maruz bırakılmasıyla elde edilen, içeriğinde nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve ozon (O_3) gibi uzun ömürlü reaktif türleri barındıran asidik karakterli bir çözeltidir (Liao vd., 2018). PAS üretimi sırasında plazma fazından sıvı fazına aktarılan bu reaktif türler, çözeltiye güçlü bir antimikrobiyal özellik kazandırmaktadır. PAS uygulaması, doğrudan plazma uygulamasına kıyasla gıdaların daldırma, yıkama veya sprey gibi yöntemlerle muamele edilmesine olanak tanıdığı için endüstriyel ölçekte daha uygulanabilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Thirumdas vd., 2018).

Literatürde yer alan güncel çalışmalar, PAS'ın özellikle et ürünlerinde patojen inaktivasyonu sağlamak, taze meyve ve sebzelerin raf ömrünü uzatmak ve gıda bileşenlerinin oksidasyonunu kontrol altına almak amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir (Liao vd., 2020). Bu perspektifte, bu bölümde, geleneksel gıda işleme yöntemlerine sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkan PAS teknolojisinin gıda güvenliği ve kalitesi üzerindeki etkileri bütünsel bir yaklaşımla ele alınmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle, plazma deşarjı ile su arasındaki etkileşimi sonucunda reaktif oksijen ve azot (RON) türlerinin oluşum mekanizmaları ve bu bileşenlerin sıvının pH, iletkenlik ve oksidasyon-indirgenme potansiyeli üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Araştırmanın temel odağını ise PAS uygulamasının gıda matrisinde yer alan temel makro ve mikro bileşenler üzerindeki etkisi oluşturmaktadır. Bu kapsamda özellikle, PAS içerisinde bulunan hidrojen peroksit, nitrit ve nitrat gibi uzun ömürlü reaktiflerin; proteinlerin yapısal özellikleri, lipid oksidasyon seviyeleri ve vitamin içerikleri üzerindeki modifikasyonları güncel literatür bulguları ışığında sentezlenmiştir. Diğer yandan, PAS kullanımının, ürünün tekstürel, renk ve duyusal karakteristiklerini korurken raf ömrünü ne ölçüde uzattığına dair karşılaştırmalı veriler sunulmuştur. Sonuç olarak, PAS teknolojisinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği, mevcut sınırlamaları ve gelecekteki araştırma yönelimlerini ortaya koyarak gıda mühendisliği literatürüne kapsamlı bir kaynak sağlanması hedeflenmiştir.

SOĞUK PLAZMA

Plazma, en genel tanımıyla, elektronlar, pozitif ve negatif iyonlar, serbest radikaller, gaz atomları, durağan veya uyarılmış haldeki moleküller ve elektromanyetik radyasyon (fotonlar) gibi farklı reaktif türleri içeren yarı nötral iyonize bir gazdır (Şekil 1). Plazma, türlerin (atomlar, moleküller) elektronik yapısını yeniden düzenlemek ve uyarılmış türler ve iyonlar oluşturmak için bir gaza termal, elektriksel ya da elektromanyetik gibi enerji uygulanmasıyla üretilmektedir (Tendero vd., 2006; Mir vd., 2016). Plazma, enerji kaynağı türüne ve plazmaya aktarılan enerji miktarına bağlı olarak yüksek sıcaklıklı plazma ve düşük sıcaklıklı plazma olarak sınıflandırılabilmektedir. Düşük sıcaklıklı plazma kendi içinde termal plazma (yarı denge) ve ısıl olmayan plazma (dengesiz) veya soğuk plazma olarak ikiye ayrılmaktadır. Yarı denge halindeki plazmada elektronlar ve gaz molekülleri gibi türler arasında lokal bir termodinamik denge bulunmaktadır. Bunun aksine, soğuk plazmada herhangi bir termodinamik denge bulunmamakta ve elektronlar yaklaşık 10^4 K sıcaklıktayken, iyonlar ve nötral türler genellikle oda sıcaklığındadır (Surowsky vd., 2015; Pankaj vd., 2018). Soğuk plazma, kısa işlem süreleri ve ısıya duyarlı bileşenler için tehlike arz etmeyecek düşük sıcaklıklar avantajları ile gıdaların mikrobiyolojik/kimyasal güvenliğini sağlamak ve besinsel ve fonksiyonel özelliklerini korumak için geleneksel gıda işleme yöntemlerine bir alternatif olarak ilgi kazanmıştır (Kopuk vd., 2022). Plazma teknolojisi, özellikle de atmosferik basınç altında çalışma kabiliyetine sahip soğuk plazma tekniği, son yıllarda hem akademik hem de endüstriyel boyutta oldukça ilgi görmektedir. Bunun temel sebepleri olarak düşük enerji ve süre gereksinimlerinin yanı sıra maliyet gerektirmeden sadece kuru havayla çalışabilme kabiliyeti, operasyonel açıdan esnekliği ve yüksek ölçekli üretime uygulanabilirlikte kolaylık, gıdanın fiziksel formundan bağımsız olarak her tür gıdanın işlenebilmesi ve yatırım maliyetinin nispeten düşük olması öne sürülebilir. Yine de, özellikle Türkiye'de, bu teknolojiyi kapsayan çalışmalar ve süreçler konunun güncelliğine rağmen oldukça kısıtlıdır. Bu bağlamda, ulusal ve uluslararası tüketicilerin yenilikçi gıda talebini karşılamaya yönelik bu teknolojinin dahil edildiği süreçlerle üretilen minimal işlenmiş ve/veya fonksiyonelliği geliştirilmiş ürünlerin yanı sıra bu teknolojinin ülkemize kazandırılmasına yönelik süreç/modellerin geliştirilmesi son derece önem taşımaktadır.



Şekil 1: Maddenin dört halinin (katı, sıvı, gaz ve plazma) şematize edilmiş görseli.

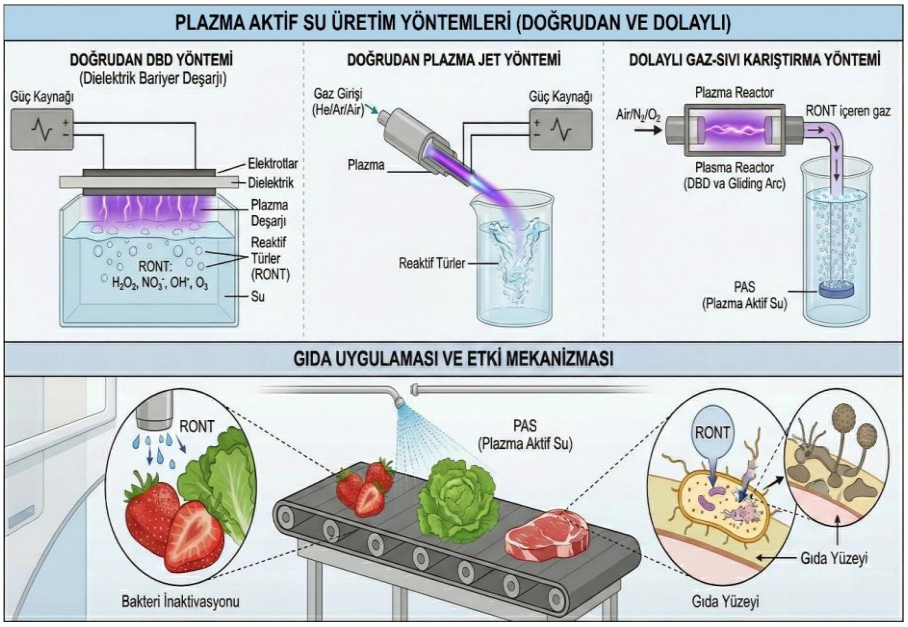
Elektronlar, gaz ortamı boyunca bir elektrik alanda hızlandırıldığında, elektronlar ve gaz içerisinde bulunan atomlar ve moleküller arasında çok sayıda çarpışma gerçekleşmektedir. Bu çarpışmalarda, ağır parçacıkların sıcaklığı artmamakta ve ısı birikimi, nano-saniyeli uyarım enerjisi patlamalarıyla engellenmekte dolayısıyla çok daha düşük bir plazma sıcaklığı elde edilmektedir (Tendero vd., 2006; Sanguansri vd., 2010). Elektronlar ve oksijen ve nitrojen molekülleri arasındaki çarpışmalar, primer reaktif oksijen türlerinin (RO türleri) (atomik O, O_2·-, $^1O_2$, ·OH, H_2O_2, O_3, ·H ve ·OOH) ve reaktif nitrojen türleri (RN türleri) (·NO, ·NO_3, N_2O_5, NO-, NO_2-, NO_3-, N_2O- ve ONOOH/ONOO-) oluşumuna yol açmaktadır. Oluşan bu reaktif türlerin konsantrasyonları, güç girdisi, uygulama süresi, gaz basıncı ve uygulama yöntemi gibi operasyonel koşulların yanı sıra farklı gaz türleri ve karışımlarına, plazma reaktörünün konfigürasyonuna bağlıdır (Kopuk vd., 2022).

Yüksek termal iletkenlik, yüksek UV emisyon spektrumu ve düşük kırınım deşarjı nedeniyle soğuk plazma üretmek için argon ve helyum gibi asil gazlar kullanılsa da, bu gazların pahalı olması ve teknolojideki gelişmeler nedeniyle yakın geçmişte çok daha ucuz bir alternatif olan kuru hava kullanımı yaygınlaşmıştır (Misra ve Jo, 2017). Nitekim bu kapsamda, soğuk plazma üretiminde kullanılan gazların akış hızı önemli bir faktördür. Akış hızına bağlı olarak iki zıt etki elde edilmektedir; (i) akış hızı arttıkça reaktif türlerin taşınım hızı ve dolayısıyla uygulama etkinliği artmaktadır, (ii) akış hızı arttığında ürünle temas süresi çok kısa olacağından ve çok fazla reaktif tür oluşacağından plazma aktivitesi azalmaktadır (Lerouge vd., 2001). Diğer yandan, soğuk plazma uygulama esnasında işlem süresi ve mesafesi de birlikte dikkate alınmalıdır. Kısaca, süre arttıkça ve mesafe azaldıkça reaktif türlerin konsantrasyonu, penetrasyonu ve çeşitliliği artmakta ve daha etkili bir işlem sağlanmaktadır. Örnek miktarı ise reaktif türlerin penetrasyonunu etkileyen bir faktördür (Kopuk vd., 2022). Bu kapsamda soğuk plazma, gıda üretim proseslerine adapte edilebilecek düşük yatırım ve kurulum maliyeti, yüksek sürdürülebilirlik (kuru hava kullanımı gibi), düşük enerji ve süre gereksinimleri, operasyonel kolaylık ve esneklik, ürün sıcaklığını

arttırmayan, fiziksel ve kimyasal açıdan düşük riskli, atmosferik basınçta çalışabilen, ekstra işleme alanı gerektirmeyen ve tamamen otomatik sisteme uygun çevre dostu yeşil bir teknoloji olarak yüksek potansiyel ihtiva etmektedir.

PLAZMA AKTİF SU (PAS)

Soğuk plazma üretimi sırasında oluşan yüksek miktarda reaktif oksijen ve nitrojen türleri (RON türleri), yüksek antimikrobiyal aktivite gösterse de, gıda matriksine doğrudan iletilmesi sonucunda biyoaktif bileşikleri degrade edebilir ve renk ve aromayı değiştirebilir (Ekezie vd., 2017; Sarangapani vd., 2018). Ayrıca, ölçek arttırmaya yönelik bir diğer problem, genellikle küçük çapa sahip jet nozulu veya birkaç santimetre işleme alanına sahip dielektrik bariyer deşarj (DBD) gibi konfigürasyonlarda üretilen soğuk plazma sistemlerinin gıda yüzeyini tekdüze işleyememesi sonucu ürünün tekstürel ve yapısal özelliklerini değiştirmesidir (Munekata vd., 2020). Bu problemlerin üstesinden gelmek için, özellikle son yıllarda, soğuk plazma ile benzer reaktiviteye sahip plazma aktif su (PAS) öne çıkmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2: Genel hatları ile plazma aktif su (PAS) üretim yöntemleri ve gıda uygulamalarına istinaden etki mekanizmasının şematize edilmiş görseli.

Plazma, sıvılar ile etkileşime girdiğinde, iki ortam arasındaki arayüzey bölgesinde çeşitli kompleks kimyasal reaksiyonlar meydana gelerek, işlenen çözelti içerisinde reaktif türlerin oluşumuna ve çözeltinin pH, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) ve elektriksel iletkenliği gibi fizikokimyasal özelliklerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır (Patra vd., 2022). Bir gıda ürünü, üretilen bu PAS'a daldırıldığında, PAS'la yıkandığında ya da gıdanın üzerine PAS püskürtüldüğünde, içeriğindeki bu RON türleri gıda matriksi ile etkileşime girerek mikrobiyal inaktivasyonun yanı sıra asitlik, toplam çözünür katı, antioksidan aktivite, biyoaktif bileşen içeriği, nem miktarı, yapısal ve tekstürel özellikler ve duyusal özelliklerde değişikliklere neden olmaktadır (Gupta vd., 2025).

Reaktif Oksijen ve Nitrojen (RON) Türleri

PAS esaslı uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması amacıyla, PAS üretiminde RON türlerinin oluşum yollarını ortaya çıkarmak ve bu türlerin konsantrasyonlarını belirlemek oldukça önemlidir (Tablo 1 ve Tablo 2). Güncel olarak, reaktif türlerin üretimi ve gaz fazdan sıvıya taşınım mekanizmaları, reaktif türlerin suda çözülümünün yanı sıra plazma-sıvı etkileşimlerinin geniş bir şekilde incelendiği belirtilebilir (Zhou vd., 2018). Plazmadan sıvıya reaktivite transferi, esasen gaz-sıvı arayüzünde gerçekleşir ve gaz partikül çarpışmaları, kütle transferi, püskürtme ve UV fotonları indüklü fotoliz ve diğerleri gibi sayısız fiziksel ve kimyasal prosesler eşlik etmektedir. Genellikle, bir gaza yüksek bir voltaj veya diğer enerji girişi

uygulandığı takdirde, ilk olarak reaktif türler oluşur ve gaz fazda var olur; üretilen türlerin bir kısmı daha sonra gaz-sıvı arayüzüne iletilir ve ardından suya nüfuz eder (Bruggeman vd., 2016). Gaz plazma ile üretilmiş radikaller, sulu çözeltilerde bir dizi sekonder reaktif türlerin üretimi üzerine oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Zhang vd., 2018).

Ozon

Sulu çözelti içerisinde çözünmüş ozon (O_3), güçlü bir antimikrobiyal oksidan ajan olarak kabul edilmektedir. Klor, klor dioksit, hidrojen peroksit ve permanganat gibi tipik oksidanlar arasında en yüksek oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP, $E^0 = 2.07$ V) göstermektedir (Zhou vd., 2018). Tipik bir uzun ömürlü tür (bir kaçtan düzinelerce dakikaya) olarak, gaz fazda üretildikten sonra ozon, arayüz boyunca sıvıya taşınabilir; O_2 içeren kabarcıklarda üretilen plazma deşarjı durumunda olduğu gibi, direkt olarak çözelti içerisinde ozon üretmek de mümkündür (Lukes vd., 2012). Düşük güçlü DBD söz konusu olduğunda, Pavlovich vd. (2013), ne asitlenmiş nitrit ne de hidrojen peroksitin antibakteriyel etkiye katkıda bulunmadığını ve O_3'ün hücre inaktivasyonunda dominant bir rol oynadığını belirtmiştir.

Lukes vd. (2014), NO_2 ve NO ile gaz reaksiyonları veya deşarj sonrası sıvı içerisinde nitritler ile sıvı fazdaki reaksiyonları tarafından O_3 parçalanması nedeniyle bu radikalin hava plazması ile işlenen PAS içerisinde yer alan sıvı-faz kimyasal reaksiyonlara katkıda bulunmadığını öne sürmüştür. Ancak, Ar/O_2 atmosferi altında, *cis,cis*-mukonik asit oluşumu, gaz-sıvı arayüzü üzerinden çözeltiye taşınmış O_3 tarafından indüklenmiş oksidasyon reaksiyonları için direkt bir kanıt sağlamıştır. Wang vd. (2018), 12.0 kV uygulama voltajı için sulu çözelti içindeki 0.15 mg L^{-1} dak^{-1} olan ozon üretim hızının, 18.0 kV uygulama voltajında 0.46 mg L^{-1} dk^{-1}'e yükseldiğini ve dimetil fitalat dekompozisyon verimliliği sonuçları ile uyumlu olduğunu bildirmiştir. Park vd. (2017), PAS içerisindeki O_3, bazı diğer türlerden daha önemli ölçüde daha düşük konsantrasyonda olmasına rağmen, %14 azalma ile biyofilm giderme için ikinci en önemli bileşen olduğunu bildirmiştir.

Hidrojen Peroksit

En yaygın uzun ömürlü reaktif tür olarak hidrojen peroksit (H_2O_2), plazma esaslı sistemlerin antimikrobiyal, antikanser ve yara iyileştirici özelliklerinde temel bir molekül olarak kabul edilmektedir (Boehm vd., 2018). Locke vd. (2011) tarafından bahsedildiği gibi, hidrojen peroksit çeşitli yollardan üretilebilir. Lukes vd. (2008), hidrojen peroksit üretiminin esasen elektronik olarak ayrıştırılmış su moleküllerinden üretilen ·OH radikallerinin kombinasyonundan kaynaklandığı kanıtlamıştır. Liu vd. (2010), bilgisayar simülasyonu yardımıyla, He plazma ile aktive edilmiş bir su buharı sisteminde, H_2O_2'nin esasen ·OH radikallerinin rekombinasyonundan kaynaklandığını göstermiştir. Vasko vd. (2014)

tarafından radyofrekans atmosferik basınçlı plazmaya dayalı farklı bir çalışmada, He-su buharı kullanılarak üretilen hidrojen peroksit için deneysel ve simüle edilmiş sonuçlar karşılaştırılmış ve çıktılar, Liu vd. (2010) tarafından bildirilen önceki model ile eşleşmiştir. Genel olarak, soğuk plazma tarafından aktive edilmiş sıvılarda, sulu hidrojen peroksit esasen iki kaynaktan oluşmaktadır; (1) gaz fazlı plazmadan H_2O_2 taşınımı ve (2) gaz fazdan çözünmüş ·OH radikallerinin rekombinasyonu ve/veya sıvı fazdaki diğer reaktif türler arasındaki reaksiyonlar nedeniyle direkt sıvı içerisinde üretimdir (Samukawa vd., 2012). Ancak, PAS içerisinde üretilen H_2O_2'in mekanizması, farklı sistemler arasında değişebilmekte olup hala bir tartışma konusudur. Güncel olarak, He vd. (2018) özellikle bir DC deşarjında sıvı direkt katot olarak kullanıldığı takdirde, $H_2O_{2sıvı}$'in esasen çözeltide çözünmüş ·OH rekombinasyonundan üretildiğini ve çözünmüş gaz H_2O_2'nin $H_2O_{2sıvı}$'a transferinin önemsiz olduğunu belirtmiştir. Dahası, UV'nin su içerisindeki ihmal edilebilir ölçüde düşük Roseland ortalama opaklığı nedeniyle, plazma ile üretilmiş UV fotonlar tarafından indüklenmiş su fotolizi aracılığıyla $H_2O_{2sıvı}$ üretimini neredeyse ihmal edilebilirdir. Bu nedenle, UV tarafından indüklü reaksiyonlar, yalnızca su buharı fazında önemli kabul edilebilir (He vd., 2018). Van Gils vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen akışkan kimyasına dayalı hesaplamalar, absorbe edilen tüm OH radikallerinin H_2O_2'ye dönüştürüleceğini ve sonrasında gaz fazda oluşan H_2O_2'in işlenen sıvılara taşınacağını göstermiştir. Stara ve Krčma (2004) suda deşarj kaynaklı H_2O_2 üretimini incelemiş ve hidrojen peroksit üretimini etkileyen faktörleri çalışmıştır. Araştırmacılar, uygulama voltajı ve deşarj süresinin hidrojen peroksit oluşumunu doğrusal olarak arttırdığını bildirmiştir. Örneğin, Ikawa vd. (2010), He plazma jet ile aktive edilmiş suda 180 saniyelik aktivasyon sonrası H_2O_2 konsantrasyonunu 1.469 mM olarak bulmuştur. Farklı çalışmalarda PAS içerisinde oluşan H_2O_2 konsantrasyonu, 20 dakika hava plazma ile aktivasyon sonrası 22.4 μM olarak kaydedilmiştir (Shen vd., 2016). Lukes vd. (2008) tarafından belirtildiği gibi, H_2O_2 konsantrasyonu, deşarj sonrası suyun iletkenliğine bağlıdır. Asidik ortamda, H_2O_2'nin konjugat bazı (HO_2^-) fazladan H_2O_2 üretimine sebep olabilir. Araştırmacılar, üretilen H_2O_2'nin final konsantrasyonunun yaklaşık 0.6 mM olduğunu ve bakteriyal gelişimi inhibe etmek için yeterli olacağını gözlemlemiştir.

Shainsky vd. (2010) deiyonize suyu DBD plazmaya direkt maruz bırakarak PAS üretimi üzerine denemeler yapmıştır. Plazmaya maruziyetten hemen sonra 58.7 mM olan H_2O_2 konsantrasyonunun, aktivasyondan 15 dakika sonra 0.2 mM'e düştüğünü gözlemlemişlerdir. Örneğin, H_2O_2'nin hava-sıvı arayüzündeki yarılanma ömrü 1 ms olup sırasıyla 1 μs ve 1 ns olarak bulunan tekil oksijen ve hidroksil iyonlarının yarılanma ömrüne göre oldukça yüksektir (Møller vd., 2007). Bununla birlikte, H_2O_2 sudaki sabit son ürün olarak görülmekte ve 8 saatten 20 güne kadar değişen yarılanma ömrüne sahip olmaktadır. Laurita vd. (2015) kantitatif olarak H_2O_2'nin

konsantrasyonunu ölçmüş ve DBD hava plazma ile aktive edilmiş PAS'da 200 μM olarak bulmuştur. Araştırmacılar aynı zamanda post deşarj kinetiklerin farklı sürelerdeki PAS içindeki H_2O_2'nin dekompozisyonu üzerine etkisini araştırmıştır. Post deşarj kinetiklerin 25 dakika sonrasında, H_2O_2 konsantrasyonu 110 μM'e düşmüştür. Lukes vd. (2014) benzer şekilde H_2O_2'nin deşarj sonrası kinetiklerini araştırmış ve post deşarj süresinden 5 saat sonra başlangıçtaki 200 μM konsantrasyonun 100 μM'e düştüğünü gözlemlemiştir. Post deşarj sırasında nitrit ve hidrojen peroksit arasındaki reaksiyondan nitrat oluşumu, hidrojen peroksit konsantrasyonundaki azalmanın sebeplerinden biri olabilir (Burlica vd., 2010). Suda kayan ark deşarj ile üretilen H_2O_2'nin konsantrasyonunu değerlendirmek için bir çalışma yürütülmüştür (Kim vd., 2013). Hava ve suyun kayan (gliding) ark jeneratörüne akışı, maksimum H_2O_2 verimi sağlanacak şekilde optimize edilmiştir. Suyun plazma ile aktivasyonu, aktivasyon sonrası maksimum 0.8 mM H_2O_2 konsantrasyonu ile sonuçlanmıştır.

Hidroksil Radikali

PAS içerisinde hidrojen peroksit prekürsörü olarak davranan hidroksil radikali (·OH), sulu bir ortamda ve gaz ve sıvı fazları arasındaki arayüzeyde güçlü bir okside edici kabiliyete (E^0 = 2.85 V) sahip önemli bir RO türüdür (Gligorovski vd., 2015). Yüksek reaktivitesi nedeniyle, ·OH'ın gaz fazdaki ömrü 200 μs ve sıvı içerisinde birkaç nanosaniye uzunluğundadır (Liu vd., 2016). Bu nedenle, ·OH'ın hedefle doğrudan etkileşime girmesi için, bu türler hedefin hemen yakınında üretilmelidir. Bu türler, özellikle gaz plazmada diğer reaktif türlerin oluşumu ve taşınımı için önemli bir rol oynamakta olup ·OH radikallerinin konsantrasyonu, plazma uygulaması sonucu sıvı içerisinde üretilen kimyasal türlerin doğasına ve miktarına ve dolayısıyla elde edilen PAS'ın biyokimyasal özelliklerine bağlıdır (Zhang vd., 2018). Park vd. (2017), konsantrasyonu (0.1 μM) diğer reaktif türlerden önemli ölçüde daha düşük olsa da OH radikallerinin bakteriyal inaktivasyonunda şaşırtıcı bir performans sergilediğini ve PAS'ın biyoaktivitesinde önemli olduğunu göstermiştir. Zhang vd. (2018) PAS içerisindeki ·OH radikallerini ölçmüş ve konsantrasyonun, uygulanan farklı besleme gazlarına önemli ölçüde bağlı olduğunu belirterek en yüksek değerin oksijen mikroplazma ile elde edildiğini bildirmiştir.

Tablo 1: Reaktif oksijen türleri

Reaktif Türler	Terminoloji	Kimyasal Formülü	ORP Değeri (V)	Oluşum Yolu
Radikaller	Hidroksil	·OH	~2.7-2.8	$H_2O_2 \rightarrow OH_{sıvı} + OH_{sıvı}$ $O_3 + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + OH + O_2$ $O_3 + HO_2 \rightarrow 2O_2 + OH$
	Süperoksit	$O_2^{-}\cdot$	~0.16	$C(NO_2)_4 + O_2^{\cdot-} \rightarrow C(NO_2)_3^{-} + NO_2^{\cdot} + O_2$ $RO_2^{\cdot} + HO_2^{\cdot} \rightarrow RO_2H + O_2$
Radikal Olmayanlar	Hidrojen peroksit	H_2O_2	~1.78	$OH_{gaz} \rightarrow OH_{sıvı} + OH_{sıvı} \rightarrow H_2O_{2sıvı}$ $H_2O \xrightarrow{UV} H_{sıvı} + OH_{sıvı}$ $OH_{gaz} + OH_{gaz} \rightarrow H_2O_{2gaz} \rightarrow H_2O_{2sıvı}$ $H_2O \xrightarrow{elektron\ radyasyonu} H_{sıvı} + OH_{sıvı}$
	Ozon	O_3	~2.08	$\cdot O + O_2 \rightarrow O_{3gaz} \rightarrow O_{3sıvı}$

Nitritler ve Nitratlar

Plazma tabanlı sistemlerde nitrit ve nitrat iyonlarının varlığı, reaktif nitrojen (RN) türlerinin üretimine direkt bir kanıttır ve özellikle antibakteriyel özellikleri ve bitki gelişimini teşvik etmek için organik gübrelere bir alternatif olarak son zamanlarda oldukça ilgi çekmiştir. Bir taraftan, plazma aktif çözelti içerisinde sekonder ürünler olarak oluşan uzun ömürlü nitrit ve nitrat iyonlarının, asidik ortamlarda güçlü bakterisidal kabiliyet sergilediği bilinmektedir (Girard vd., 2016). Özellikle asitlendirilmiş (düşük pH) koşullarda NO_2^-, kolaylıkla protonlanabilir ve hücrelere oldukça toksik olan H_2O, NO ve NO_2'ye parçalanabilir (Lu vd., 2017). Diğer taraftan, RNS, modern tarımda iki temel rol oynamaktadır: (1) bitki enzimleri (nitrat redüktaz gibi) bir besin olarak emilerek nitrojen bileşiklerinin ve amino asitlerinin üretimine yol açarlar; ve (2) bir sinyal molekülü olarak bitki metabolizması ve gelişimini kontrol edebilirler (Zhang vd., 2017). Nitritler, genellikle deşarj sırasında gaz fazdaki N_2 ve O_2'nin reaksiyonlarından üretilen NO_x'in çözünmesi aracılığıyla PAS içerisinde üretilmektedir (Zhou vd., 2015). NO_2^-, H_2O_2 ve O_3 gibi okside edici ajanlarla birlikte bulunduğu takdirde kolaylıkla nitrata (NO_3^-) dönüşebilmektedir (Zhou vd., 2018). PAS içerisinde NO_3^- ve NO_2^- üretimi ile birlikte, NO_x'in suda çözünmesi de çözeltinin düşük pH'sına katkıda bulunmaktadır (Zhou vd., 2016). Shen vd. (2016), PAS içerisinde uzun ömürlü nitrat iyonlarının sekonder ürünler olarak oluştuğunu ve depolama sırasında antimikrobiyal aktivitesini arttırdığını bildirmiştir. Araştırmacılar 20 dakika aktive edilmiş PAS içerisindeki NO_3^- ve NO_2^- konsantrasyonunun sırasıyla 42 mg/L ve 1.2 mg/L olduğunu gözlemlemiştir. PAS içerisinde meydana gelen NO_2^- ve H_2O_2 arasındaki post deşarj reaksiyonları, ciddi bir antibakteriyel özelliğe sahip peroksinitrit oluşumuna yol açmaktadır. Reaktif oksijen (RO)

türlerinde olduğu gibi, depolama süresi uzadıkça NO_3^- ve NO_2^- gibi RN türlerinin de konsantrasyonu azalmaktadır. Park vd. (2013), PAS içerisinde üretilen nitrit ve nitrat iyonlarının bitki gelişimi üzerine etkisini incelemiş ve bir kayan ark sistemi kullanarak 2 dakikalık plazma uygulaması sonrası NO_2^- ve NO_3^- konsantrasyonları sırasıyla 56 mg/L ve 12 mg/L olarak belirlenmiştir. Oksijen gazlı DBD plazma uygulaması kullanılarak 30 dakikalık aktivasyon sonrası nitrat ve nitrit iyonlarının konsantrasyonu 113 mg/L ve 1.5 mg/L olarak bildirilmiştir (Oehmigen vd., 2010). Su yüzeyi üzerinden plazma deşarjı ve direkt su içerisine deşarj, Ar/O_2 gaz karışımlı plazma mikrojeti kullanılarak üretilen PAS'da farklı konsantrasyonlarda nitrat ve nitrit oluşumuna yol açmıştır (Tian vd., 2015). Direkt su içerisinde üretilen PAS'da nitrat ve nitritlerin konsantrasyonu, su yüzeyi üzerinden deşarj ile üretilene kıyasla biraz daha yüksek bulunmuştur. Park vd. (2013) PAS içerisinde oluşan nitrat ve nitrit iyonlarının bitki gelişimi üzerine etkisini incelemiştir. Suyun kayan ark plazma kullanılarak 2 dakikaya kadar aktivasyonu sırasıyla 56 mg/L ve 12 mg/L nitrat ve nitrit iyonu konsantrasyonu sağlamıştır.

Nitrik Oksit

Farklı organizmalarda bulunan yaygın bir sinyal molekülü olan nitrik oksit (NO), son zamanlarda potansiyel vaat eden bir antimikrobiyal ajan olarak öne sürülmüştür. NO, aktive edilmiş ortam fazında ve direkt ısıl olmayan plazmanın gaz fazında ölçülebildiğinden, klinik uygulamalar için değerli bir araçtır (Carpenter ve Schoenfisch, 2012). Verlackt vd. (2018), sıvı ile etkileşime giren bir plazma jeti için bir model oluşturmuş ve NO'nun sıvıda tespit edilemezken, yalnızca gaz-sıvı arayüzünde tespit edilebildiğini bildirmiştir. Dahası, araştırmacıların öne sürdüğü model, uzun ömürlü türlerin, çoğunlukla direkt çözünme veya çözeltideki sekonder reaksiyonlar aracılığıyla arayüzde oluştuğunu göstermiştir. Bununla birlikte, Jablonowski vd. (2018), sıvı fazdaki NO'nun, gaz fazından çözünme yolundan ziyade çoğunlukla arayüz bölgesinden ve yığından üretildiğini bildirmiştir. Nitekim, gaz fazda, gaz-sıvı arayüzünde ve sıvı fazda meydana gelen ilgili reaksiyonları içeren birincil üretim ve parçalanma reaksiyonları tanımlanmıştır (Jablonowski vd., 2018). Shen vd. (2016), NO'nun diğer RON türlerinin oluşumunu indükleyebileceğini ve tohum çimlenmesinde proteinlerin oksidatif zararlanmasına yol açarak büyümenin inhibisyonuna ve *S. aureus* ve *Penicillium expansum*'un inaktivasyonuna sebep olabileceğini bildirmiştir. 30 gün boyunca düşük sıcaklıkta depolama sonrası, aynı deneysel koşullar altında üretilmiş ve -80 °C, -20 °C, 4 °C ve 25 °C'de depolanmış PAS için $NO\text{-}Fe^{2+}(MGD)_2$ için sinyal yoğunluğu sırasıyla 85.28, 67.91, 78.34 ve 75.84 µmol/L olarak belirlenmiştir. Bu da NO radikal türlerinin bakteriyal inhibisyona önemli bir katkısı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, Tian vd. (2017), PAS içerisindeki NO türlerinin *S. cerevisiae*'nin hücre gelişimini üzerine potansiyel etkisini

incelemiş ve PAS içerisinde yüksek konsantrasyonlarda NO hücre gelişimini inhibe ederken, düşük konsantrasyonlardaki NO'nun pozitif bir etki gösterdiğini bildirmiştir. Kurake vd. (2017), sulu bir çözelti içindeki NO ve ·OH radikallerinin, PAS içerisinde üretilen NO_2^- ve H_2O_2 üzerindeki etkisin araştırmış ve PAM içerisinde üretilen H_2O_2 ve NO_2^-'nin çoğunun sulu ·OH ve ·NO'dan kaynaklanmadığını öne sürmüştür. Araştırmacılar, H_2O_2 ve NO_2^- üretiminin, esasen denge halinde olmayan atmosferik basınçlı plazma radyasyonunu takiben gaz/sulu faz arayüzeyinde üretilen ara ürünlerin yüksek konsantrasyonlarına dayandığını belirtmiştir.

Tablo 2: Reaktif nitrojen türleri

Reaktif Türler	Terminoloji	Kimyasal Formülü	ORP Değeri (V)	Oluşum Yolu
Radikaller	Nitrik oksit	·NO	~0.8	*Gaz fazda NO oluşumu:* $e + N_2/O_2 \rightarrow \cdot N + \cdot O + e$ $\cdot N + \cdot O \rightarrow \cdot NO$ $\cdot N + NO_3 \rightarrow NO_2 + \cdot NO$ $O_2 + \cdot N \rightarrow \cdot NO + \cdot O$ *Arayüzde ve sıvı fazda NO oluşumu:* $\cdot N + \cdot OH \rightarrow \cdot NO + \cdot H$ $\cdot H + NO_2^- \rightarrow \cdot NO + OH^-$ $N_2O_3 \leftrightarrow \cdot NO + \cdot NO_2$ $HNO_2 + \cdot H \rightarrow \cdot NO + H_2O$ $HNO_2 + HNO_2 \rightarrow \cdot NO + \cdot NO_2 + H_2O$ $NO_2^- + H_2O_2^- > ONOO^- \leftrightarrow \cdot NO + \cdot O_2^-$ $\cdot OH + ONOOH \rightarrow \cdot NO + O_2 + H_2O$ $\cdot NO_2 + \cdot O \rightarrow \cdot NO + O_2$ $\cdot NO_2 + \cdot N \rightarrow 2 \cdot NO$ $NO_2^- + \cdot H \rightarrow \cdot NO + OH^-$ *NO Parçalanması:* $\cdot NO + \cdot OH \rightarrow HNO_2$ $\cdot NO + \cdot NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_2$ $\cdot NO + \cdot O_2^- \rightarrow ONOO^-$ $\cdot NO + \cdot HO_2 \rightarrow ONOOH$ $\cdot NO + O_3 \rightarrow \cdot NO_2 + O_2$ $2 \cdot NO + O_2 \rightarrow 2 \cdot NO_2$ $\cdot NO + \cdot HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$ $\cdot NO + \cdot N \rightarrow N_2 + O$
Radikal olmayanlar	Peroksinitrit	$OONO^-$	~1.4-1.6	$NO_2^- + H_2O_2 + H^+ \rightarrow O{=}NOOH + H_2O$ $O_2^- + NO \rightarrow 0.7(NO_3^-) + 0.3(O{=}NOO^-)$ $NO\cdot + O_2^{-}\cdot \rightarrow O{=}NOO^-$ $NO_2 + OH \rightarrow 0.7(NO_3^- + H^+) + 0.32(ONOOH)$ $NO\cdot + HO_2\cdot \rightarrow O{=}NOOH$
	Nitrit	NO_2^-	~1.00	$e + N_2 \rightarrow \cdot N + \cdot N + e$ $e + O_2 \rightarrow O + \cdot O + e$ $N + O \rightarrow NO$ $NO + O \rightarrow NO_2$ $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ $NO_2 + O_3 \leftrightarrow NO_3 + O_2$ $NO + NO_3 \leftrightarrow NO_2 + NO_2$ $NO_2 + NO_2 + H_2O \rightarrow NO_2^- + NO_3^- + 2H^+$ $NO + NO_2 + H_2O \rightarrow 2NO_2^- + 2H^+$ $NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2$ $NO + O_2^- \rightarrow NO_3^-$
	Nitrat	NO_3^-	~0.80	$NO_2^- + H_2O_2 + H^+ \rightarrow NO_3^- + H_2O + H^+$
	Amonyum iyonları	NH_4^+	~0.27	$H_2O + e^- \rightarrow \cdot OH + \cdot H + e^-$ $2 \cdot H \rightarrow H_2$ $H_2 + \cdot OH \rightarrow H_2O + \cdot H$ $\cdot NH_2 + H_2 \rightarrow NH_3 + \cdot H$ $\cdot NH_2 + \cdot NH_2 \rightarrow NH_3 + \cdot NH$ $\cdot NH_2 + H_2O \rightarrow NH_3 + \cdot OH$ $\cdot NH_2 + \cdot OH \rightarrow NH_3 + \cdot O$

Peroksinitrit

Hem $OONO^-$ hem de ONOOH türlerini içeren peroksinitritin biyolojik rolü, bir organizmanın sağlık ve hastalık kontrolünde önemlidir. Lukes vd. (2014), PAS biyoaktivitesinde yer alan ana türlerden birinin peroksinitrit olduğunu bildirmiştir. Çalışmalarında, NO_2^- ve H_2O_2 arasındaki kimyasal reaksiyonların, sürekli peroksinitrit üretimine yol açtığı öne sürülmüştür. Ayrıca asidik çözeltide NO_2^- ve H_2O_2 bulunduğu takdirde, HNO_3'ün kararsız bir izomeri de (ONOOH) üretilebilmektedir (Liu vd., 2016). Daha yüksek pH değerlerinde ise $ONOO^-$ üretilebilmektedir. Dahası, PAS içerisinde peroksinitrit, NO'nun ve süperoksit anyon radikallerinin, nitrit anyon ve ·OH radikallerinin, nitrik oksit ve HO_2 radikallerinin diğer reaksiyonları aracılığıyla üretilebilmektedir (Chen vd., 2017).

Zhou vd. (2018), özellikle asidik koşul altında, PAS içerisinde önemli bir biyoaktif tür olarak kabul edilen peroksinitritin, plazma tarafından indüklenen sinerjistik etkilerden (yani, NO_3^-, NO_2^- ve H_2O_2 reaksiyonları) kaynaklandığını bildirmiştir. Taşıyıcı gaz olarak hava ile çalışan bir plazma jetine ile birleştirilmiş bir sürekli akış sisteminde 30 dakikalık PAS aktivasyonu sonrası peroksinitrit konsantrasyonunun 20.2 μM olduğunu bulmuşlardır. Daha önemlisi, Tarabova vd. (2019), PAS içerisinde nitrit (NO_2^-) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) varlığının, PAS içerisinde baskın olarak güçlü bir H_2DCFDA floresans tepkisine sahip peroksinitröz asit üretimine yol açtığını kanıtlamıştır.

Amonyum İyonları

Amonyak (NH_3), tarımsal gübre, NO_x giderme katalizörlerinde indirgeyici ve kupramonyum rayon (cupro) ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Haruyama vd., 2016). Daha güncel olarak, bir enerji taşıyıcı (hidrojen taşıyıcı gibi) ve potansiyel bir antimikrobiyal ajan olarak kullanılmıştır (Maheux vd., 2015). Plazma aktif çözeltilerde amonyum sentezinin, iki aşamada ilerlediği düşünülmektedir; H_2O moleküllerini uyarmak için gaz fazda ayrışma hidrojen (H_2) üretir, ardından amonyum sentezi, gaz fazda bulunan hidrojen ile nitrojenin reaksiyonunu ve sulu çözeltide bir asit baz reaksiyonunu izler (Peng vd., 2018).

Sakakura vd. (2018), UV radyasyonu ile birlikte plazma/su arayüzünde amonyak üretilebileceğini bildirmiştir. Araştırmacılar, vakum UV ışınlı arayüzey reaksiyon konumunun artan miktarlarda NH_3 ürettiğini öne sürmüştür. Peng vd. (2018), gaz plazma ve sıvı arasındaki sinerjistik etkileşimlere dayanarak NH_3 sentezinde yer alan sinerjistik mekanizmaları öne sürmüştür. Hawtof vd. (2019), bir katalizör olmadan ve yüksek seçicilik ile nitrojen ve sudan NH_3 üretimi için bir plazma elektrolitik sisteminin kullanımını araştırmış ve NH_3 seçiciliğinin, plazma ve sulu ortam arasındaki arayüzeyde üretilen çözünmüş elektronların varlığı ile bağlantılı olduğunu öne sürmüştür. Bu çözünmüş elektronlar, daha sonra protonlar ile tepkimeye girerek esansiyel hidrojen radikali ara ürünlerinin üretimine yol açmaktadır.

PAS'ın Fizikokimyasal Özellikleri

Su, soğuk plazma deşarjına maruz bırakıldığı sırada iki ortam arasındaki arayüzde çeşitli kompleks kimyasal reaksiyonlar meydana gelmekte ve böylece suyun moleküler yapısı ve bileşimi modifiye olmaktadır. Bunun sonucunda, PAS'ın tarım, gıda ve tıp gibi alanlarda biyolojik etkinliğinden sorumlu başta pH, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) ve elektriksel iletkenliği gibi özellikleri önemli ölçüde değişmektedir.

pH

PAS üretimi sırasında soğuk plazma deşarjına maruz bırakılan su ile reaktif plazma türleri arasındaki etkileşim, çoğu durumda suyun asitlenmesine ve pH'sının düşmesine yol açmaktadır. Uygulama süresi arttıkça güçlü asitlerin oluşumu pH'yı düşürmektedir (Shen vd., 2016). Nitrik ve nitröz asit oluşumunun pH'daki düşüşten sorumlu ana türler olduğu düşünülmektedir (Oehmigen vd., 2010). Ancak, uygulama süresi daha da uzatıldığında, pH'daki düşüş baskılanmakta ve nihayetinde, sabit kaldığı bir denge haline ulaşmaktadır. PAS, yüksek asitliğine ve düşük pH'sına rağmen dezenfektan olarak cilt uygulamalarında güvenli kabul edilmekte ve toksik veya korozif bir etki göstermemektedir (Pan vd., 2017). Çalışmalar, fare üzerinde uygulanan PAS'ın, dokulara hasar vermeden ciltte iyileşmeyi hızlandırdığını göstermiştir (Wang vd., 2021). Dahası, pankreatik kanser hücrelerine sahip fareler üzerinde yürütülen bir in vivo çalışma, PAS'ın toksik olmadığını ve hayvanlarda kullanımının güvenli olduğunu ortaya koymuştur (Liedtke vd., 2017). PAS'ın asitliği ve pH seviyesi, plazma kaynağı, deşarj metodu, güç kaynağı parametreleri ve gaz türü ve gaz akış hızı gibi işlem parametrelerinden etkilenmektedir (Takamatsu vd., 2012). Ayrıca, deşarj sırasında uygulanan voltajın polaritesi de pH'yı etkilemektedir. Genel olarak, pozitif deşarja kıyasla negatif deşarj sonucu pH'da daha fazla düşüş meydana gelmektedir (Lukes vd., 2012). PAS'ın pH değeri nispeten nötr olduğunda, içeriğindeki H_2O_2 gibi reaktif türler uzun süre boyunca stabil kalabilmektedir. Ancak, pH değeri düştüğünde, reaktif türler kararsız hale gelmekte ve birbirleri ile aktif reaksiyonlara girerek konsantrasyonlarında farklılıklara yol açmaktadır (Ranieri vd., 2021). Bu bağlamda, Pemen vd. (2016), ısıl ve ısıl olmayan plazmalar kombine edilerek pH'nın düzenlenebileceğini öne sürmüştür.

Elektriksel İletkenlik

Plazma deşarjını takiben pH'daki değişikliklerin yanı sıra elektriksel iletkenlikte de farklılıklar meydana gelmektedir. Elektriksel iletkenlik, sulu çözeltinin elektriği iletme kabiliyeti olup, yüklü türlerin ve iyonların konsantrasyonuna bağlıdır. PAS içerisinde oluşan RON türlerinin konsantrasyonlarında bir artış, PAS'ın iletkenliğinin artmasına yol açmaktadır. PAS'ın elektriksel iletkenliği, içerisinde oluşan reaktif tür ve

iyonların genel konsantrasyonunun en önemli indikatörlerinden birisidir. Bu iyonlar arasında, en yaygın ve en stabil türlerden biri olan NO_3^-, yüksek mobilite ve iyonik gücü nedeniyle elektriksel iletkenlikteki artış açısından önemli bir rol oynamaktadır (Kumar vd., 2025). Wu vd. (2017) ve Ma vd. (2015), aktivasyon süresi arttıkça PAS'ın iletkenliğinin önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. Ancak, PAS'ın iletkenliği pH ile ters orantılıdır. Daha yüksek pH değeri, daha düşük hidrojen iyonu konsantrasyonu anlamına gelmektedir. Bu nedenle, hidroksil iyonlarına kıyasla daha hareketli bir yapıya sahip hidrojen iyonlarının konsantrasyonunda bir azalma sonucu daha düşük iletkenlik elde edilmektedir (Lukes vd., 2012). Ayrıca, daha yüksek iyon üretimi nedeniyle su yüzeyi altından deşarj sonucunda daha yüksek iletkenliğe sahip PAS üretilmektedir. Bu durum, deşarj kaynağına olan mesafenin daha kısa olması sonucu iyon yoğunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır (Lukes vd., 2014).

Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP)

ORP, bir çözeltinin başka bir materyali okside etme veya indirgeme kabiliyetini yansıtmakta olup, mikroorganizmaların hücre membranlarını ve hücresel savunma mekanizmalarını yok ettiğinden dolayı mikrobiyal inaktivasyonda önemli bir parametredir (Lia vd., 2007). PAS, bileşiminde oluşan H_2O_2 gibi oksidan veya indirgen reaktif türler nedeniyle yüksek bir ORP sergilemektedir. Genel olarak, ORP değeri ile plazma uygulama süresi arasında pozitif bir korelasyon bulunmaktadır. PAS'ın ORP değeri arttıkça daha güçlü bir oksidatif ortam oluşması sonucu mikrobiyal hücre membran geçirgenliği bozularak tam inaktivasyona yol açacaktır. Saf su genel olarak 200-300 mV ORP değerine sahipken, 90 saniyelik bir plazma uygulaması sonucu 500 mV'den daha yüksek değerlere ulaştığı bildirilmiştir (Royintarat vd., 2019). Ma vd. (2015), uygulama süresi arttıkça PAS'ın ORP değerinde kayda değer bir artış olduğunu bulmuştur. Uygulama süresinin yanı sıra, Tian vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, su yüzeyi altından plazma uygulamasına kıyasla su yüzeyi üzerinden plazma uygulaması sonucu daha yüksek ORP değeri elde edildiği gözlenmiştir. Stabil koşullar altında, PAS'ın ORP değeri, sıcaklığa bağlı dalgalanmalar olsa da, nispeten sabit kalmakta ve depolama süresine bağlı olarak kademeli bir şekilde azalmaktadır (Shen vd., 2016).

Yoğunluk, Yüzey Gerilimi, Metal İyonları ve Sıcaklık

PAS'ın yoğunluğu, içerisinde oluşan iyonların konsantrasyonu ile doğru orantılıdır. Plazma uygulaması sırasında, gaz fazda oluşan yüklü türlerin ve iyonların suya difüzyonu sonucu sudaki iyon konsantrasyonu ve dolayısıyla suyun yoğunluğu artmaktadır (Low vd., 2023). Diğer yandan, PAS'ın yüzey gerilimi, elektriksel iletkenlikteki artışa bağlı olarak azalmaktadır. PAS'ın yüzey gerilimindeki bu düşüş, NO_3^- iyonlarının konsantrasyonundaki bir artış sonucu hava-sıvı arayüzüne bağlanan NO_3^-

iyonlarının su moleküllerinin hidrojen bağlarına müdahale etmesine bağlanabilir (Wong vd., 2023). Özellikle sıvı yüzeyi altından deşarj sırasında elektrot erozyonu sonucu PAS içerisine metal iyonları salınabilmektedir (Puertas vd., 2020). Chen vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, plazma maruziyet süresinin bir fonksiyonu olarak PAS içerisinde bakır ve çinko iyonları seviyelerinin arttığı ve PAS indüklü mikrobiyal inaktivasyona katkıda bulunduğu bildirilmiştir.

Suyun soğuk plazma ile aktivasyonu, deşarj ve güç kaynağı parametrelerine bağlı olarak su sıcaklığında kayda değer artışlara yol açmamaktadır. Ercan vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, 3 dakikalık uygulama sonucunda plazma aktif deiyonize su, fosfat tampon ve 5 mM N-asetilsistein çözeltilerinin sıcaklıkları 23-26 °C aralığında değişmiştir. Tian vd. (2015) tarafından steril distile su yüzeyi üstünden ve altından mikrojet plazma ile 20 dakika boyunca aktive edilen PAS'ın sıcaklıkları sırasıyla 31.5 °C ve 38.1 °C olarak değiştiği bildirilmiştir. Bu nedenle, PAS, ısıya duyarlı gıda materyallerinin dezenfeksiyonu için uygundur. Ayrıca, plazma jetinin etrafında sirkülasyonlu su banyosu gibi sistemler kullanılarak deşarj sıcaklığı daha da düşürülebilmektedir.

PAS'IN GIDALARIN BİLEŞENLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Gıda üretimindeki başlıca sorunlar gıda kalitesi ve güvenliğidir. Gıda ürünlerine PAS uygulaması esnasında PAS'da mevcut RON türlerinin varlığı nedeniyle, gıdaların biyokimyasal ve duyusal özellikleri olumlu ve olumsuz yönde etkilenebilmektedir. PAS uygulamasının gıda bileşenleri üzerine etkileri, aşağıda verilen alt başlıklar halinde incelenmiştir.

Proteinler

Proteinler metabolizmanın yapı taşlarıdır ve dokular, enzimler ve hormonların temelini oluştururlar. Vücuda enerji sağlamanın yanı sıra, vücudun karmaşık yapısının temelini oluştururlar. Son zamanlarda, araştırma bulguları PAS'ın protein maddeleri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Gıda uygulamaları incelendiğinde, PAS'ın buz niteliğinde uygulaması sonrasında karideslerin genel sülfhidril grubu seviyeleri ve Ca^{2+} ATPaz aktivitesinin (bu ölçümler genel miyozin denatürasyonunu ve bozulmasını yansıtmaktadır) önemli ölçüde farklılık göstermediği bildirilmiştir (Liao vd., 2018). Miyofibriler proteinler (MP'ler), toplam kas proteinlerinin çoğunu oluşturdukları için değerlendirme açısından çok önemlidir (Nyaisaba vd.,

2019). Yapılan bir çalışmada, tavuk butlarında PAS uygulaması sonrası miyofibriler proteinin analiz edilmesi, PAS'daki reaktif türlerin protein bozulmasına neden olmadığını ortaya koymuştur (Qian vd., 2021). Liao vd. (2020) sığır eti üzerinde benzer bir gözlem bildirmiştir. Farklı bir çalışmada, plazma ile aktive edilmiş laktik asitin, sığır eti proteininin sekonder yapısında önemli bir değişiklik göstermediği bildirilmiştir (Qian vd., 2019).

Lipidler

Gıdalarda kalite bozulmasında en önemli parametrelerden biri lipid oksidasyonudur ve bunu renk, lezzet, güvenlik ve besin değerindeki değişiklikler izler. Gıdalara PAS uygulamaları sırasında meydana gelen bu oksidasyon, PAS'da bulunan reaktif oksijen (RO) türleri ile gıdalarda bulunun lipidler arasındaki etkileşime bağlıdır (Yong vd., 2018). Lipid oksidasyonunun birincil ve ikincil ürünleri ise genellikle peroksit değeri (PV) ve TBARS testleri ile ölçülmektedir (Zhao vd., 2021b). Jung vd. (2015b), PAS ile kürlenmiş sosislerin PV değerinin 21 gün boyunca olgunlaştırma ile arttığını, ancak 28 gün boyunca olgunlaştırmada düştüğünü keşfetmişlerdir. Yong vd. (2018) PAS ile kürlenen jambonda iki haftalık depolama süresince PV ile ilgili aynı gözlemi bildirmiştir.

Başka bir çalışma, PAS ve ultrasonun uskumru filetolarına uygulanmasının, ürünlerde PV değerinin deniz ürünleri yağları için izin verilen maksimum sınır olan 5 meq O_2/kg'dan çok daha düşük olan 0,5 meq O_2/kg olduğunu bildirmiştir (Rahman vd., 2022). Zhao vd. (2021a) tarafından yapılan başka bir çalışmada, PAS ile işlenmiş düğme mantarlarında ve kontrol numunesinde 12 günlük depolama boyunca malondialdehit (MDA) içeriğini izlemişler ve PAS uygulanan mantarlarda kontrol grubuna kıyasla önemli bir azalma belirlemişlerdir. Cong vd. (2022), PAS uygulanmış goji meyvelerinde de aynı şekilde membran lipid peroksidasyonunda azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Liao vd. (2020), PAS kullanarak sığır etini çözmenin, tiyobarbitürik asit (TBA) reaktif bileşiklerin içeriğinde önemli bir değişiklik yaratmadığı sonucuna varmışlardır. Liao vd. (2018), PAS buzu ile karideslerin 7 gün boyunca başarıyla depolanabildiğini belirlemişler ve PAS uygulamalarının gıda muhafazasındaki potansiyeline dikkat çekmişlerdir. Depolamadan sonra, karideslerin TBA değeri musluk suyundan elde edilen buzda depolananlara göre daha düşük bulunmuş, bu durum PAS ile edilen buzun mikrobiyal üremeyi azalttığı için lipid oksidasyonunu da azalttığını ortaya koymuştur. Luo vd. (2019), PAS ile kürlenmiş kurutulmuş domuz filetolarının TBARS değerinde belirgin bir azalma gösterdiğini bildirmiş, diğer taraftan bazı çalışmalarda ise PAS uygulamasından sonra sığır etinin TBARS değerlerinde önemli bir değişiklik görülmediği de bildirilmiştir (Zhao vd., 2018; Qian vd., 2019). Mevcut bu bulgular, PAS'ın depolama sırasında özellikle lipid oksidasyonundan kaynaklanan olumsuz değişiklikleri azaltırken, genel kaliteyi arttırma potansiyelini göstermektedir.

Karbonhidratlar

Yapılan çalışmalarda, PAS uygulamasının üzüm gibi bazı meyvelerde toplam çözünmüş katı veya şeker bileşimini önemli ölçüde etkilemediği ifade edilmiştir (Zheng vd., 2019; Xiang vd., 2020). Benzer şekilde Choi vd. (2019), PAS işleminden sonra kıyılmış tuzlu Çin lahanasının şeker konsantrasyonunda önemli bir değişiklik gözlemlememişlerdir. Bu nedenle, PAS'ın bu tür gıdaları, içlerindeki doğal tatlılığı veya genel karbonhidrat miktarını değiştirmeden sindirmek için uygun bir yol olabileceği söylenebilir. PAS'ın şekerler ve diğer karbonhidratlar üzerindeki etkisine ilişkin sınırlı sayıda araştırma bulunduğundan, bu konuda kesin bir yargıda bulunmak mümkün değildir. Bu alan, gelecekteki araştırma çalışmaları için faydalı olabilir (Rahman vd., 2022).

Vitaminler

Vitaminler, gıdaların işlenmesi sırasında önemli ölçüde kayba uğrayabilmektedir. Bu nedenle, PAS uygulaması sırasında vitaminlerin stabilitesini incelemek oldukça önemlidir. Nitekim oldukça yeni bir teknik olan PAS uygulaması sonrası ürünlerde vitamin stabilitesini değerlendirmek için henüz sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır. Xu vd. (2016), PAS'ın hasat sonrası depolama sırasında düğme mantarlarında C vitamini konsantrasyonlarını olumlu yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Zheng vd. (2019) ve Xiang vd. (2020) tarafından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Liu vd. (2020), PAS ile işlenmiş taze kesilmiş elmalardaki C vitamini konsantrasyonunun 12 günlük depolama süresinden sonra azaldığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, işlenmemiş elmalarla karşılaştırıldığında, bu kalıcı azalma belirgin bir şekilde fark meydana getirmemiştir. Sonuç olarak elde edilen bu veriler, C vitamininin stabilitesinin PAS uygulaması tarafından önemli ölçüde etkilenmediğini göstermektedir. Ancak konuyla ilişkili olarak daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilebilir.

Biyoaktif Bileşenler

Antioksidanlar, kararsız moleküller olan serbest radikallerin neden olduğu hücresel hasarı engelleyebilen veya geciktirebilen maddelerdir. Gıdaların besin değerlerini ve renk, doku, tazelik, aroma ve lezzet gibi duyusal özelliklerini korumaya yardımcı olurlar (Wilson vd., 2017). Antioksidan bakımından zengin gıdalar, kardiyovasküler hastalıklar ve belirli kanser türleri dahil olmak üzere çeşitli hastalıkların görülme sıklığını azaltabilir. Taze meyve ve sebzelerdeki biyoaktif bileşenler özellikle antioksidan özellikleri sayesinde insan sağlığına önemli katkıda bulunmaktadırlar (Rahman vd., 2022). Çok sayıda ilgili araştırma, PAS ile yıkamanın taze kesilmiş elma (Liu vd., 2020), armut (Chen vd., 2019) veya mantarların (Zhao vd., 2021a) antioksidan aktivitesini değiştirmediğini göstermektedir. Laurita vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, roka yapraklarının PAS ile muamele edilmesinin ardından örneklerin toplam

flavonoid içeriğinde küçük değişiklikler meydana geldiği, ancak toplam fenolik içerikte herhangi bir değişiklik gözlemlenmediği bildirilmiştir. Bu sonuç farklı bir çalışmada domateslerdeki fenolik bileşiklerin değişimine benzer şekildedir (Ali vd., 2021). Zhao vd. (2021a) tarafından yapılan çalışmada, DPPH yöntemi ile düğme mantarlarının radikal temizleme kapasitesi değerlendirilmiş ve kontrol grubuna kıyasla antioksidan aktivitede önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Liu vd. (2020) tarafından taze kesilmiş elmalarda da benzer bir durum bildirilmiştir. PAS ve hafif ısı kullanımının, üzümlerdeki 2,2'-Azino-Bis-3-Etilbenzotiyazolin-6-Sülfonik Asit (ABTS) radikal temizleme kapasitesi ve FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power, Demir (III) iyonu indirgeyici antioksidan gücü) değerlerinin kontrole kıyasla bir farklılık göstermediği belirlenmiştir (Derradji-Benmeziane vd., 2014). Aynı sonuçlar Xiang vd. (2019) tarafından yeşil fasulye filizleri üzerinde PAS kullanımıyla da rapor edilmiştir.

Enzimler

Enzimler, gıda ürünleri üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkilere sahiptir. Enzimatik aktivite, gıda kalitesinde, dokusunda ve lezzetinde hızlı değişikliklere yol açmaktadır. Çoğu enzimatik aktivite olumsuz etkiler yaratarak çeşitli gıdalarda raf ömrünün ve gıda kalitesinin düşmesine neden olur. PAS'ın gıda ürünleri üzerindeki etkilerine ilişkin araştırmalar sınırlıdır, ancak kullanımında önemli bulgular keşfedilmiştir. Xu vd. (2016) tarafından yapılan araştırma, PAS uygulamasının düğme mantarlarında süperoksit dismutaz (SOD) enzimi (RO türleri ve süperoksit anyon radikallerine karşı en önemli antioksidan savunma sistemidir) üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Bu çerçevede, PAS işleminin depolama süresince SOD içeriğini artırdığı gözlemlenmiş ve bu durumun mantarların stresle başa çıkmasına yardımcı olan bu antioksidanın örnekler üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Sonraki çalışmalarda, taze kesilmiş kivi (Zhao vd., 2019), üzüm (Zheng vd., 2019) ve mantar (Zhao vd., 2021a) için de benzer bulgular elde edilmiştir. Zhao vd. (2021a) ayrıca PAS ile muamele edilmiş düğme mantarlarında polifenol oksidaz (PPO) ve peroksidaz (POD) enzimlerinin aktivitesinin değerlendirilmesine yönelik başka bir çalışma daha gerçekleştirmiştir. Bu enzimlerin aktiviteleri konvansiyonel su ile işlemeye göre daha az bulunmuş, dolayısıyla PAS uygulaması sayesinde hasat sonrası kahverengileşmenin kontrol altına alınmasını sağlanmıştır. PAS uygulaması bazı durumlarda kahverengileşme enzimlerini azaltsa da, taze kesilmiş kivi meyvesinde POD ve katalaz (CAT) aktivitesini artırmıştır.

PAS'IN GIDALARIN KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİ

Enstrümental Tekstür

Bir gıdanın tekstürü, tüketici nezdinde gıdanın görünüşü ve tadıyla ilişkilendirilmekte olup, tüketici kabulü açısından kritik bir özelliktir. Bu bağlamda, PAS ile işlenen gıdaların tekstürel özelliklerinin incelenmesi son derece önemlidir. PAS tekniği, mikrobiyal dekontaminasyonu sağlarken, enzimatik reaksiyonları geciktirerek gıdanın tekstürel kalitesini korumaktadır. Uygulama koşullarının hassas bir şekilde ayarlanmasıyla, PAS tekniğinin gıdaların sertliğini korumada etkili olduğu belirlenmiştir. Örneklerin sertlik ve esneklik değerlerinin korunması, RON türlerinin hücreler arası yapışma ve hücre duvarının yapısal bütünlüğü üzerindeki olumlu etkileriyle ilişkilendirilmektedir. Örneğin, PAS ile muamele edilen çilek örneklerinin adhezifliğindeki artış kontrol altında tutulurken, dokudaki gevşemenin önemli ölçüde geciktirildiği ve ürünün nihai kalitesinin korunduğu bildirilmiştir (Li vd., 2019). Xiang vd. (2020) farklı sıcaklık aralıklarında (25-55 °C) 30 dakika boyunca PAS'a daldırılan üzümlerin tekstürel özelliklerini incelemiş ve sıkılık değerlerinde önemli bir değişiklik meydana gelmediğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Liu vd. (2020), PAS'a daldırılan taze kesilmiş elmaların mikrobiyal sayım sonuçlarının tespit edilemeyecek seviyeye indirgendiğini ve sıkılık değerlerinin kontrol grubuna benzer olduğunu belirtmiştir. PAS uygulaması, meyve-sebzelerin tazeliğini ve tekstürünü korumasının yanı sıra muhafaza sırasında meyve yumuşamasını da etkili bir şekilde geciktirmektedir. Örnek olarak, Çin yaban mersinlerinin PAS ile 5 dakika boyunca işlenmesi sonucu meyve yumuşaması 8 güne kadar önemli ölçüde geciktirilmiş ve 8 günlük depolama periyodundan sonra kontrol grubunun sertliği 2.84'ten 1.51 Newton'a düşerken, PAS ile işlenenler neredeyse değişmeden kalmıştır (Ma vd., 2016). Benzer şekilde, Gavahian vd. (2019), şitaki mantarlarının 20 dakika PAS ile işlenmesi sonucunda doku yumuşamasının 7 gün boyunca geciktirildiğini ve 7 günlük depolama sonunda kontrol ve PAS ile işlenmiş örneklerin sıkılık değerlerinde sırasıyla %56 ve %2 azalma meydana geldiğini bildirmiştir. Bunun aksine, Zhao vd. (2019) ve Liu vd. (2020), PAS uygulamasının sırasıyla taze kesilmiş kivilerin ve elma dilimlerinin depolanması boyunca sıkılığı ve yumuşaması üzerine bir etki etmediğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar, bu durumun, kesme ve mikrobiyal kontaminasyon nedeniyle hücre duvarını degrade eden enzim aktivitesinin artarak hücre yapısını parçalamasından, hücre adezyon kuvvetlerini azaltmasından ve hücre yapısının direncini düşürmesinden kaynaklandığını öne sürmüştür. Xu vd. (2016) PAS'ın hasat sonrası kültür mantarlarının 7 günlük depolanma süreci üzerine etkisini araştırmış ve 7 günlük depolamadan sonra kontrol ve PAS ile işlenmiş örneklerin iletkenlik değerlerinin sırasıyla 0.50 ve 0.70 olduğunu bildirmiştir. Bu çalışma, membran bütünlüğünün bir ölçüsü olan membran geçirgenliğinin depolama boyunca arttığını göstermektedir. Diğer taraftan,

PAS ile işlenmiş mantarların, kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde daha az elektrolit sızdırdığını ve dolayısıyla membran bütünlüğünün daha uzun süre korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, PAS tekniği, süre veya plazma kaynağı gibi işlem koşulları genel olarak ürünlerin tekstürel özellikleri üzerinde kayda değer bir farklılık yaratmadığından dolayı taze meyve ve sebzelerin yüzey dekontaminasyonu için etkili bir yöntem olabilir. Dahası, PAS uygulaması, enzimler ile etkileşimi nedeniyle depolama sırasında meyve sıkılığındaki kayıpları geciktirerek raf ömrünü uzatabilir.

Et ve et ürünleri söz konusu olduğunda, PAS tekniği, çiğ et ve et ürünlerinde yalnızca bozulma yapıcı ve gıda kaynaklı patojenik mikroorganizmaları inaktive etmekle kalmayıp, ürünlerin besinsel içeriğini, pH, tekstürünü ve diğer duyusal özelliklerini de geliştirmektedir (Herianto vd., 2021). Kang vd. (2019), PAS ile işlenen tavuk göğsü örneklerinin tekstürel özelliklerindeki değişiklileri incelemiş ve 12 dakikalık işlem sonrası tekstürel özelliklerinde bir farklılık oluşmadığını bildirmiştir. Bu sonuçlar, tavuk etinde mikrobiyal inaktivasyonu geliştirmek amacıyla ultrason ile kombine PAS kullanılması sonucu tekstürel özelliklerde bir farklılık meydana gelmediğini belirten Royintarat vd. (2020) ile uyuşmaktadır. PAS'ın taze kesilmiş et üzerinde 24 günlük depolama boyunca etkisini araştıran Zhao vd. (2020), uygulama sonrası tekstürel özelliklerde bir farklılık meydana gelmese de, depolama süreci boyunca etin elastikiyet değerinin azaldığını bildirmiştir. PAS'ın taze et için buz çözdürme ortamı olarak kullanıldığı bir çalışmada, dondurulup çözdürülmüş kontrol grubuna kıyasla PAS ile çözdürülmüş örneğin önemli ölçüde daha düşük sertlik değeri sergilediği bildirilmiştir (Liao vd., 2020).

Et ve meyve-sebze ürünlerinin yanı sıra PAS tekniğinin tahıl ürünlerinin tekstürü üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Liao vd. (2020) tarafından bildirilene göre, PAS uygulaması pirinçte bulunan *Bacillus cereus* sporlarında %99'un üzerine inaktivasyon sağlarken, pişirme sonrası pirinç tekstürel ve duyusal özelliklerinde olumsuz bir etki yaratmamıştır. Dahası, buharda pişirilmiş pirinç kekinin PAS ile işlenmesini takiben tekstürel özelliklerinde bir farklılık meydana gelmemiş ve raf ömrünü arttırmak için sodyum hipoklorite bir alternatif olabileceği öne sürülmüştür (Kang vd., 2022). Ayrıca, PAS ile kombine ısı-nem uygulamaları, mumlu ve normal mısır nişastalarının yapısal ve fiziksel özelliklerini geliştirirken, granül yapısını etkilemeden *in vitro* nişasta sindirilebilirliğini azaltmış, dirençli nişasta içeriğini arttırmış ve kristallenme derecesini geliştirmiştir (Yan vd., 2020). PAS'ın nişasta ve un modifikasyonu üzerindeki etkileri son yıllarda oldukça ilgi çekici bir çalışma konusu haline gelmiştir. Shi vd. (2022), PAS ile kombine ısı-nem uygulamasının buğday unu ve hamurunun özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmiş ve uygulama sonrası unun mikroyapısı ve dirençli nişasta içeriği gelişirken, nişasta, protein ve lipitler arasındaki moleküler etkileşimler artarak hamurun reolojik özellikleri gelişmiştir. Wang vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, taze noodle ürünlerinin raf

ömrünü geliştirmek amacıyla potansiyel bir işleme tekniği olarak PAS kullanılmıştır. Araştırmacılar, PAS uygulamasını takiben başlangıç mikrobiyal yükünün kayda değer ölçüde azaldığını ve depolama süresi boyunca mikrobiyal gelişimin geciktirildiğini belirtmiştir. Ayrıca, PAS uygulaması, ürünlerin viskozitesi azaltmış, nişasta retrogradasyonunu önemli ölçüde azaltmış, pişmiş ürün sertliğini düşürmüş ve gluten proteinlerinin dinamik polimerizasyonu ve depolimerizasyonunu etkileyerek hamur stabilitesi ve noodle elastikiyetini arttırmıştır (Wang vd., 2022).

Enstrümental Renk

Renk, gıda tercihinde ve tazelik algısında en önemli duyusal kalite özelliklerinden biridir. Gıda ürünlerinin renginde herhangi bir olumsuz değişiklik, tüketici kabulü açısından son derece negatif bir algı olarak ortaya çıkmaktadır (Guo vd., 2017). Bu nedenle, gıda ürünlerinin PAS ile işlenmesi sonucu oluşan renk değişimlerinin incelenmesi kritiktir. Yapılan araştırmalarda üzüm, taze kesilmiş hindiba marulu, taze ıspanak yaprakları, taze kesilmiş patates, taze kesilmiş kivi, taze kesilmiş elma, pirinç, çilek ve mantar dahil olmak üzere çoğu tarımsal gıda ürününde PAS uygulamasından sonra önemli bir renk değişikliği görülmemiştir (Rahman vd., 2022). Bunun aksine, Laurita vd. (2021), PAS uygulamasını takiben roka yapraklarının renk parametrelerinde kayda değer bir düşüş meydana geldiğini bildirmiştir. Gracy vd. (2019) farklı plazma güçlerinde (2-5 W) 6 dakikaya kadar işlenen domateslerin parlaklık değerlerinde bir azalma olduğunu bildirmiş ve bu azalmanın domates pigmentlerindeki degradasyondan veya doku mikroyapısındaki değişikliklerden kaynaklanabileceğini öne sürmüştür. Guo vd. (2017), antosiyanin pigmentlerin stabilitesi nedeniyle PAS ile işlenmiş üzümlerin renk ve antosiyanin pigment içeriğinde değişiklik olmadığını bildirmiştir. Bunun aksine, Zhao vd. (2021a) PAS uygulamasının düğme mantarlarında esmerleşme indeksini azaltabileceğini belirtmiştir. Et ve balık ürünlerinin PAS ile işlenmesi söz konusu olduğunda, tarımsal gıda ürünlerinde kıyasla renk parametrelerinde kayda değer değişiklikler olduğu gözlenmiştir. PAS et ürünlerinde sentetik nitrite alternatif bir kürleme ajanı olarak kullanılmış ve parlaklık veya sarılık indekslerinde değişiklik olmazken, kırmızılık indeksinin önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir (Jung vd., 2015a; Yong vd., 2018; Inguglia vd., 2020). Kürlemenin yanı sıra, Qian vd. (2019), PAS ile işlenen taze sığır etinin renk parametrelerinde bir değişiklik olmadığını bulmuştur. Başka bir çalışmada, tavuk eti ve derisi PAS ile işlendiği takdirde, kırmızılık indeksinde hafif bir düşüş ve parlaklık indeksinde artış meydana gelirken, deri kısmında sarılık indeksi artmıştır (Royintarat vd., 2020). Qian vd. (2021) tarafından plazma aktif laktik çözeltisi ile işlenen tavuk butlarında parlaklık ve sarılık indeksleri değişmezken, kırmızılık indeksinin önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir. Su ürünlerinin PAS ile işlenmesi söz konusu olduğunda, Zhao vd. (2021b) uskumru filetolarının parlaklık ve sarılık indekslerinin azaldığını bildirirken,

Liu vd. (2021) PAS ile işleme sonrası sarı nehir sazanının parlaklık indeksinin azaldığını, kırmızılık indeksinin ise arttığını belirtmiştir. Genel olarak, bu sonuçlar, PAS ile işlemenin kısa sürelerde gıda ürünlerinin renk parametreleri üzerinde minimal değişikliklere yol açtığını göstermektedir. Ürün türü (bütün veya kesik, katı ya da sıvı), PAS işleme parametreleri (aktivasyon ve gıdaya temas süresi, reaktif tür konsantrasyonu) ve depolama koşulları, renk değişikliklerini etkileyen kritik faktörler olarak ortaya çıkmaktadır.

Duyusal Özellikler

Literatürde, genel olarak, PAS ile işlenen gıdaların görünüş, aroma ve tat indeksleri gibi duyusal özelliklerinde kayda değer farklılıklar oluşmadığı bildirilmiştir. Örnek olarak, Muhammad vd. (2019) tarafından yer bademlerinin (*Cyperus esculentus*) PAS ile işlendiği bir çalışmada, PAS uygulamasının örneklerde lipid oksidasyonunu tetiklemediği, TBARS seviyelerinin kontrol grubuna benzer olduğu ve dolayısıyla duyusal özelliklerinde önemsiz farklılıklar meydana geldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, Han vd. (2020), PAS uygulamasının Kore'ye özgü pirinç kekinde geleneksel olarak kullanılan 0.2 ppm sodyum hipoklorit çözeltisine benzer mikrobiyal inaktivasyon sağlarken, kalite ve duyusal özelliklerinde olumsuz değişikliklere yol açmadığını bildirmiştir. Zhai vd. (2019) PAS uygulamasının ince katmanlı Çin peynirinin kalite özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve uygulama sonrası renk farklılığı olsa da, görünüş kabulü açısından sorun teşkil etmediğini ve dolayısıyla PAS uygulamasının, tofu gibi ürünlerde tüketici kabulünü olumsuz yönde etkilemeden etkili bir dezenfeksiyon aracı olabileceğini öne sürmüştür. Schnabel vd. (2019), taze kesilmiş marulların sanitasyonu için plazma aktif çeşme suyunun dahil edildiği pilot ölçekli bir durulama/yıkama ünitesi geliştirmiş ve uygulama şekline bağlı olarak mikrobiyal inaktivasyon açısından umut verici sonuçlar elde edilirken, ürünlerin tekstürel ve renk özelliklerinin değişmediğini ortaya koymuştur. Tavuk göğsünde bulunan *Pseudomonas deceptionensis* CM2 bakterisinin PAS ile inaktive edildiği bir çalışmada, 60 saniye boyunca kayan ark deşarjı ile aktive edilen steril distile suya 12 dakika boyunca daldırılan tavuk göğsünün tekstürel ve duyusal özelliklerinde kayda değer bir değişiklik olmazken, 1.05 log KOB/g inaktivasyon sağlandığı belirlenmiştir (Kang vd., 2019). Pirinçte bulunan *Baciullus cereus* sporlarının dekontaminasyonu için bir engel teknoloji olarak PAS ile kombine ılımlı ısıtma (40 ve 55 °C) kullanıldığı bir çalışmada, tek başına PAS uygulamasına (0.72 log KOB/g) kıyasla kombine uygulama sonucunda sırasıyla 1.54 ve 2.12 log KOB/g inaktivasyon sağlanırken, tekstürel ve duyusal özelliklerinde kayda değer olumsuz değişiklikler meydana gelmediği belirtilmiştir (Liao vd., 2019). PAS'ın dondurulmuş sığır eti için bir çözülme ortamı olarak kullanıldığı bir çalışmada, hava ile çözülme, su ile çözülme ve mikrodalga ile çözülmeye kıyasla PAS ile çözülmenin lipit ve

protein oksidasyonunu geciktirdiği, toplam bakteri, küf ve maya açısından 0.83-1.76 log azalma sağladığı ve diğer yöntemlere kıyasla etin duyusal kalitesi açısından herhangi bir olumsuzluk yaratmadığı bildirilmiştir (Liao vd., 2020). Bu bağlamda, PAS'ın gıda ürünlerinin duyusal özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden, mikrobiyal inaktivasyon ve mikrobiyal güvenliği geliştirmeye yönelik potansiyel bir işleme tekniği olarak öne çıktığı belirtilebilir.

SONUÇ

Bu bölümde, yenilikçi bir teknoloji olan Plazma Aktif Su (PAS) uygulamasının gıda güvenliği ve kalitesi üzerindeki etkileri güncel literatür verileri ışığında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Soğuk plazmanın su ile etkileşimi sonucu oluşan ve içeriğinde nitrit, nitrat, hidrojen peroksit gibi uzun ömürlü türlerin yanı sıra çeşitli kısa ömürlü reaktiflerin bulunduğu PAS, gıda endüstrisi için geleneksel kimyasal dezenfektanlara karşı güçlü ve çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda PAS'ın en dikkat çekici etkisinin mikrobiyal dekontaminasyon üzerinde olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan pek çok çalışma; PAS uygulamasının gıda yüzeylerindeki patojen bakteriler, küf ve maya popülasyonları, hatta dirençli biyofilm yapıları üzerinde önemli inaktivasyon sağladığını kanıtlamaktadır. PAS'ın gıda bileşenleri üzerindeki etkisi ise çok boyutlu bir tablo çizmekte olup, bu uygulamanın gıda bileşenleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, makro ve mikro bileşenler üzerinde genellikle koruyucu veya minimal düzeyde modifiye edici bir rol oynadığı görülmektedir. Proteinler bazında yapılan araştırmalar, PAS uygulamalarının çoğu durumda protein bozulmasına veya sekonder yapıda radikal değişikliklere neden olmadığını göstermiştir. Bazı çalışmalarda sülfidril gruplarında azalma gibi hafif oksidasyon belirtileri gözlense de, bu durumun ürünün genel protein kalitesini bozmadığı tespit edilmiştir. Lipidler açısından ise PAS, depolama sırasında lipit oksidasyonunu tetiklemekten ziyade, mikrobiyal yükü azaltarak oksidatif bozulmaları dolaylı yoldan yavaşlatma eğilimindedir. Karbonhidratlar ve şeker içeriği üzerinde ise PAS'ın mevcut tatlılık profilini veya toplam çözünmüş katı miktarını değiştirmediği, bu yönüyle meyve ve sebze işleme süreçleri için oldukça güvenli bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Gıda kalitesinin temel taşları olan tekstür, renk ve duyusal özellikler bağlamında PAS, "minimal işlem" felsefesine uygun sonuçlar vermektedir.

Tekstürel analizler, PAS'ın hücre duvarı bütünlüğünü koruyarak meyve ve sebzelerde yumuşamayı geciktirdiğini, et ürünlerinde ise elastikiyet ve sıkılık üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını göstermektedir. Renk parametreleri açısından, çoğu tarımsal üründe (üzüm, ıspanak, elma vb.) anlamlı bir değişim gözlenmezken; et ürünlerinde kırmızılık indeksini artırarak doğal bir kürleme ajanı gibi davranabildiği saptanmıştır. Duyusal değerlendirmeler ise PAS ile işlenen ürünlerin tat, aroma ve görünüş açısından tüketici kabulünü koruduğunu ve sodyum hipoklorit gibi geleneksel yöntemlerle rekabet edebilecek düzeyde olduğunu teyit etmektedir. Nitekim, uygulama süresi, plazma aktivasyon enerjisi ve deşarj süresi gibi parametrelerin optimize edildiği durumlarda; gıdaların tekstürel özellikleri, renk parametreleri ve duyusal karakteristiklerinin büyük oranda korunduğu görülmektedir. Bununla birlikte, PAS içeriğindeki reaktif türlerin yüksek oksidasyon potansiyeli nedeniyle; bazı ürünlerde lipit ve protein oksidasyonunun tetiklenebileceği veya vitaminler gibi bazı hassas bileşenlerde kayıplar yaşanabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu durum, PAS uygulamasının her gıda matrisi için spesifik olarak optimize edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gelecek perspektifinden bakıldığında; PAS teknolojisinin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe taşınması sürecinde aşılması gereken bazı kritik noktalar bulunmakta olup özellikle PAS üretiminde kullanılan enerji tüketiminin minimize edilmesi ve sistemlerin süreklilik arz eden üretim hatlarına (continuous systems) entegrasyonu üzerine daha fazla mühendislik çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç olarak, PAS; düşük sıcaklıkta çalışması, su tasarrufu sağlaması, kimyasal atık bırakmaması ve yüksek antimikrobiyal etkinliği ile "yeşil teknoloji" kavramını tam olarak karşılayan bir yöntemdir. Özellikle gıdaların raf ömrünü uzatırken besin değerini koruma çabası içindeki modern gıda endüstrisi için büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Bu kapsamda, gelecekteki araştırmaların, farklı plazma kaynaklarının verimlilik karşılaştırmalarına ve PAS'ın gıda bileşenleri ile moleküler düzeydeki etkileşimlerine odaklanması; bu teknolojinin ticari gıda işleme tesislerinde standart bir uygulama haline gelmesini hızlandıracaktır.

REFERANSLAR

Ali, M., Cheng, J.H. ve Sun, D.W. (2021). Effect of plasma activated water and buffer solution on fungicide degradation from tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit. *Food Chemistry, 350*, 129195. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129195

Billingsley, H.E., ve Carbone, S. (2018). The antioxidant potential of the Mediterranean diet in patients at high cardiovascular risk: An in-depth review of the PREDIMED. *Nutrition & Diabetes*, *8*, 1–8. https://doi.org/10.1038/s41387-018-0025-1

Boehm, D., Curtin, J., Cullen, P. J., ve Bourke, P. (2018). Hydrogen peroxide and beyond-the potential of high-voltage plasma-activated liquids against cancerous cells. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, *18*(6), 815-823. https://doi.org/10.2174/1871520617666170801110517

Bruggeman, P. J., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G. E., Graham, W. G., Graves, D. B., et al. (2016). Plasma-liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*, *25*(5), 053002. https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002

Burlica, R., Grim, R. G., Shih, K. Y., Balkwill, D., ve Locke, B. R. (2010). Bacteria inactivation using low power pulsed gliding arc discharges with water spray. *Plasma Processes and Polymers*, *7*(8), 640-649. https://doi.org/10.1002/ppap.200900183

Carpenter, A. W., ve Schoenfisch, M. H. (2012). Nitric oxide release: Part II. Therapeutic applications. *Chemical Society Reviews*, *41*, 3742-3752. https://doi.org/10.1039/C2CS15273H

Chen, C., Li, F., Chen, H. L., ve Kong, M. (2017). Aqueous reactive species induced by a PCB surface micro-discharge air plasma device: a quantitative study. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *50*, 445208. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8be9

Chen, T. P., Liang, J. F., ve Su, T. L. (2018). Plasma-activated water: Antibacterial activity and artifacts? *Environmental Science and Pollution Research International*, *25*(27), 26699-26706. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9169-0

Chen, C., Liu, C., Jiang, A., Guan, Q., Sun, X., Liu, S. et. al. (2019). The effects of cold plasma-activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears. *Food and Bioprocess Technology*, *12*, 1842–1851. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02331-w

Choi, E.J., Park, H.W., Kim, S.B., Ryu, S., Lim, J., Hong, E.J., et. al (2019). Sequential application of plasma-activated water and mild heating improves microbiological quality of ready-to-use shredded salted kimchi cabbage (Brassica pekinensis L.). *Food Control*, 98, 501–509. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.007

Clemens, R.A., Jones, J.M., Kern, M., Lee, S.Y., Mayhew, E.J., Slavin, J.L., ve Zivanovic, S. (2016). Functionality of sugars in foods and health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*, 433–470. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12194

Cong, K.P., Li, T.T., Wu, C.E., Zeng, K.F., Zhang, J.H., Fan, G.J., et. al. (2022). Effects of plasma-activated water on overall quality of fresh goji berries

during storage. *Scientia Horticulturae*, *293*, 110650. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110650

Derradji-Benmeziane, F., Djamai, R., ve Cadot, Y. (2014). Antioxidant capacity, total phenolic, carotenoid, and vitamin C contents of five table grape varieties from Algeria and their correlations. *OENO One*, *48*(2), 153–162. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.2.1564

Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., ve Cheng, J. H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, *69*, 46-58. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.007

Ercan, U. K., Wang, H., Ji, H. F., Fridman, G., Brooks, A. D., ve Joshi, S. G. (2013). Nonequilibrium plasma-activated antimicrobial solutions are broad-spectrum and retain their efficacies for extended period of time. *Plasma Processes and Polymers*, *10*(6), 544-555. https://doi.org/10.1002/ppap.201200104

Gavahian, M., Sheu, F. H., Tsai, J., ve Chu, Y. H. (2019). The effects of dielectric barrier discharge plasma gas and plasma-activated water on texture, color, and bacterial characteristics of shiitake mushroom. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1-19. https://doi.org/10.1111/jfpp.14316

Girard, P., Arbabian, A., Fleury, M., Bauville, G., Puech, V., Dutreix, M., ve Sousa, J. S. (2016). Synergistic effect of H_2O_2 and NO_2 in cell death induced by cold atmospheric He plasma. *Scientific Reports*, *6*, 29093. https://doi.org/10.1038/srep29098

Gligorovski, S., Strekowski, R., Barbati, S., ve Vione, D. (2015). Environmental Implications of Hydroxyl Radicals (•OH). *Chemical Reviews*, *115*(24), 13051-13092. https://doi.org/10.1021/cr500310b

Gracy, T. K. R., Gupta, V., ve Mahendran, R. (2019). Influence of low-pressure nonthermal dielectric barrier discharge plasma on chlorpyrifos reduction in tomatoes. *Journal of Food Process Engineering*, *42*, e13242. https://doi.org/10.1111/jfpe.13242

Gupta, R. K., Shams, R., Bahndral, A., Dash, K. K., Pawase, P. A., Shaikh, A. M., ve Béla, K. (2025). Effectiveness of various plasma treatments on nutrient retention and food quality: A comprehensive review of applications and impact. *Applied Food Research*, *5*(2), 101422. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101422

Guo, J., Huang, K., Wang, X., Lyu, C., Yang, N., Li, Y., ve Wang, J. (2017). Inactivation of yeast on grapes by plasma-activated water and its effects on quality attributes. *Journal of Food Protection*, *80*(2), 225-230. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-16-116

Han, J. Y., Song, W. J., Kang, J. H., Min, S. C., Eom, S., Hong, E. J., et. Al. (2020). Effect of cold atmospheric pressure plasma-activated water on the microbial safety of Korean rice cake. *LWT*, *120*, 108918. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108918

Haruyama, T., Namise, T., Shimoshimizu, N., Uemura, S., Takatsuji, Y., Hino, M., et. al. (2016). Non-catalyzed one-step synthesis of ammonia from atmospheric air and water. *Green Chemistry*, *18*, 4536-4651. https://doi.org/10.1039/C6GC01560C

Hawtof, R., Ghosh, S., Guarr, E., Xu, C., Sankaran, R. M., ve Renner J. N. (2019). Catalyst-free, highly selective synthesis of ammonia from nitrogen and water

by a plasma electrolytic system. *Science Advances*, *5*(1), eaat5778. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat5778

He, X., Lin, J., He, B., Xu, L., Li, J., Chen, Q., Yue, G., Xiong, Q., ve Liu, Q. H. (2018). The formation pathways of aqueous hydrogen peroxide in a plasma-liquid system with liquid as the cathode. *Plasma Sources Science and Technology*, *27*(8), 085010. https://doi.org/10.1088/1361-6595/aad66d

Herianto, S., Hou, C. Y., Lin, C. M., ve Chen, H. L. (2021). Nonthermal plasma-activated water: A comprehensive review of this new tool for enhanced food safety and quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(1), 583-626. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12667

Ikawa, S., Kitano, K., ve Hamaguchi, S. (2010). Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application. *Plasma Processes and Polymers*, *7*(1), 33-42. https://doi.org/10.1002/ppap.200900090

Inguglia, E. S., Oliveira, M., Burgess, C. M., Kerry, J. P., ve Tiwari, B. K. (2020). Plasma-activated water as an alternative nitrite source for the curing of beef jerky: Influence on quality and inactivation of *Listeria innocua*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *59*, 102276. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102276

Jablonowski, H., Schmidt-Bleker, A., Weltmann, K. D., Woedtke, T. V., ve Wende, K. (2018). Non-touching plasma-liquid interaction – where is aqueous nitric oxide generated? *Physical Chemistry Chemical Physics*, *20*, 25387-25398. https://doi.org/10.1039/C8CP02412J

Jung, S., Kim, H. J., Park, S., Yong, H. I., Choe, J. H., Jeon, H. J., Choe, W., ve Jo, C. (2015a). Color developing capacity of plasma-treated water as a source of nitrite for meat curing. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, *35*(5), 703-706. https://doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.5.703

Jung, S., Kim, H.J., Park, S., Yong, H.I., Choe, J.H., Jeon, H.J., et. al. (2015b). The use of atmospheric pressure plasma-treated water as a source of nitrite for emulsion-type sausage. *Meat Sci.*, 108, 132–137. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.009

Kang, C., Xiang, Q., Zhao, D., Wang, W., Niu, L., ve Bai, Y. (2019). Inactivation of *Pseudomonas deceptionensis* CM2 on chicken breasts using plasma-activated water. *Journal of Food Science and Technology*, *56*, 4938-4945. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03964-7

Kang, J. H., Han, J. Y., Lee, H. S., Ryu, S., Kim, S. B., Cho, S., et. al. (2022). Plasma-activated water effectively decontaminates steamed rice cake. *LWT*, *157*, 112838. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112838

Kim, H. S., Wright, K. C., Hwang, I. W., Lee, D. H., Rabinovich, A., Fridman, A., ve Cho, Y. I. (2013). Concentration of hydrogen peroxide generated by gliding arc discharge and inactivation of *E. coli* in water. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *42*, 5-10. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.12.004

Kopuk, B., Gunes, R., ve Palabiyik, I. (2022). Cold plasma modification of food macromolecules and effects on related products. *Food Chemistry*, *382*, 132356. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132356

Kumar, A., Saini, V. K., Huaccallo-Aguilar, Y., Reinecke, S. F., ve Hampel, U. (2025). Characterization of reactive species in water induced by cold atmospheric air plasma: experimental applications for industrial

micropollutant removal from wastewater and seed germination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(4), 117263. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117263

Kurake, N., Tanaka, H., Ishikawa, K., Takeda, K., Hashizume, Nakamura, K., et. al. (2017). Effects of •OH and •NO radicals in the aqueous phase on H2O2 and NO_2^- generated in plasma-activated medium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *50*(15), 155202. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5f1d

Laurita, R., Barbieri, D., Gherardi, M., Colombo, V., ve Lukes, P. (2015). Chemical analysis of reactive species and antimicrobial activity of water treated by nanosecond pulsed DBD air plasma. *Clinical Plasma Medicine*, *3*(2), 53-61. https://doi.org/10.1016/j.cpme.2015.10.001

Laurita, R., Gozzi, G., Tappi, S., Capelli, F., Bisag, A., Laghi, G., et. al. (2021). Effect of plasma activated water (PAW) on rocket leaves decontamination and nutritional value. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *73*, 102805. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102805

Lerouge, S., Wertheimer, M. R., ve Yahia, L. H. (2001). Plasma sterilization: A review on parameters, mechanisms, and limitations. *Plasmas and Polymers*, *6*(3), 175-188. https://doi.org/10.1023/A:1013196629791

Li, M., Li, X., Han, C., Ji, N., Jin, P., ve Zheng, Y. (2019). Physiological and metabolomic analysis of cold plasma treated fresh-cut strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(14), 4043-4053. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00656

Lia, L. B., Chen, W. M., ve Xiao, X. M. (2007). The generation and inactivation mechanism of oxidation-reduction potential of electrolyzed oxidizing water. *Journal of Food Engineering*, *78*, 1326-1332. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.004

Liao, X., Su, Y., Liu, D., Chen, S., Hu, Y., Ye, X., et. al. (2018). Application of atmospheric cold plasma-activated water (PAW) ice for preservation of shrimps (*Metapenaeus ensis*). *Food Control*, *94*, 307–314. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.026

Liao, X., Bai, Y., Muhammad, A. I., Liu, D., Hu, Y., ve Ding, T. (2019). The application of plasma-activated water combined with mild heat for the decontamination of *Bacillus cereus* spores in rice (*Oryza sativa* L. ssp. *Japonica*). *Journal of Physics D: Applied Physics*, *53*, 064003. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab573a

Liao, X., Xiang, Q., Cullen, P.J., Su, Y., Chen, S., Ye, X., et. al. (2020). Plasma-activated water (PAW) and slightly acidic electrolyzed water (SAEW) as beef thawing media for enhancing microbiological safety. *LWT*, *117*, 108649. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108649

Liedtke, K. R., Bekeschus, S., Kaeding, A., Hackbarth, C., Kuehn, J. P., Heidecke, et. al. (2017). Non-thermal plasma-treated solution demonstrated antitumor activity against pancreatic cancer cells In Vitro and In Vivo. *Scientific Reports*, *7*, 8319. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08560-3

Liu, D. X., Bruggeman, P., Iza, F., Rong, M. Z., ve Kong, M. G. (2010). Global model of low-temperature atmospheric-pressure He + H_2O plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, *19*, 025018. https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/2/025018

Liu, D. X., Liu, Z. C., Chen, C., Yang, A. J., Li, D., Rong, M. Z., et. al. (2016). Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous

mass transfer and liquid chemistry pathways. *Scientific Reports*, *6*, 23737. https://doi.org/10.1038/srep23737

Liu, C., Chen, C., Jiang, A., Sun, X., Guan, Q., ve Hu, W. (2020). Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *59*, 102256. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102256

Liu, X., Zhang, M., Meng, X., Bai, Y., ve Dong, X. (2021). Effect of plasma-activated water on *Shewanella putrefaciens* populations growth and quality of Yellow River carp (*Cyprinus carpio*) fillets. *Journal of Food Protection*, *84*(10), 1722-1728. https://doi.org/10.4315/JFP-21-031

Locke, B. R., ve Shih, K. Y. (2011). Review of the methods to form hydrogen peroxide in electrical discharge plasma with liquid water. *Plasma Sources Science and Technology*, *20*, 034006. https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034006

Low, M., Hung, Y. M., ve Tan, M. K. (2023). Cooling enhancement for light-emitting diode using plasma-activated water. *Applied Thermal Engineering*, *230*, 120671. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120671

Lu, P., Boehm, D., Cullen, P., ve Bourke, P. (2017). Controlled cytotoxicity of plasma treated water formulated by open-air hybrid mode discharge. *Applied Physics Letters*, *110*(26), 264102. https://doi.org/10.1063/1.49905

Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., ve Sunka, P. (2008). Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. *Plasma Sources Science and Technology*, *17*, 024012. https://doi.org/doi:10.1088/0963-0252/17/2/024012

Lukes, P., Locke, B. R., ve Brisset, J. L. (2012). Aqueous-phase chemistry of electrical discharge plasma in water and in gas-liquid environments. In: Parvulescu, V. I., Magureanu, M., Lukes, P. (eds.), Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids (1st ed., pp. 243-308). Wiley-VCH.

Lukes, P., Dolezalova, E., Sisrova, I., ve Clupek, M. (2014). Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: Evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H_2O_2 and HNO_2. *Plasma Sources Science and Technology*, *23*(1), Article 015019. https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019

Luo, J., Yan, W., Nasiru, M.M., Zhuang, H., Zhou, G., ve Zhang, J. (2019). Evaluation of physicochemical properties and volatile compounds of Chinese dried pork loin curing with plasma-treated water brine. *Scientific Reports*, *9*, 13793. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50351-5

Ma, R., N., Wang, G. M., Tian, Y., Wang, K. L., Zhang, J., ve Fang, J. (2015). Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials, 300*, 643-651. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.061

Ma, R., Yu, S., Tian, Y., Wang, K., Sun, C., Li, X., et. al. (2016). Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries. *Food and Bioprocess Technology*, *9*, 1825-1834. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1761-7

Maheux, S., Duday, D., Belmonte, T., Penny, C., Cauchie, H. M., Clement, F., ve Choquet, P. (2015). Formation of ammonia in saline solution treated by nanosecond pulsed cold atmospheric microplasma: a route to fast inactivation

of *E. coli* bacteria. *RSC Advances*, *52*, 42135-42140. https://doi.org/10.1039/C5RA01109D

Mir, S. A., Shah, M. A., ve Mir, M. M. (2016). Understanding the role of plasma technology in food industry. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(5), 734-750. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1699-9

Misra, N. N., ve Jo, C. (2017). Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry. *Trends in Food Science & Technology*, *64*, 74-86. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.04.005

Møller, I. M., Jensen, P. E., ve Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annual Review of Plant Biology*, *58*, 459-481. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946

Muhammad, A. I., Chen, W., Liao, X., Xiang, Q., Liu, D., Ye, X., ve Ding, T. (2019). Effects of plasma-activated water and blanching on microbial and physicochemical properties of tiger nuts. *Food and Bioprocess Technology*, *12*, 1721-1732. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02323-w

Munekata, P. E. S., Domínguez, R., Pateiro, M., ve Lorenzo, J. M. (2020). Influence of plasma treatment on the polyphenols of food products – a review. *Foods*, *9*(7), 929. https://doi.org/10.3390/foods9070929

Nyaisaba, B.M., Miao, W., Hatab, S., Siloam, A., Chen, M., ve Deng, S. (2019). Effects of cold atmospheric plasma on squid proteases and gel properties of protein concentrate from squid (Argentinus ilex) mantle. *Food Chem.*, 291, 68–76. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.012

Oehmigen, K., Hähnel, M., Brandenburg, R., Wilke, C., Weltmann, K. D., ve Von Woedtke, T. (2010). The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids. *Plasma Processes and Polymers*, *7*(3-4), 250-257. https://doi.org/10.1002/ppap.200900077

Pan, J., Li, Y. L., Liu, C. M., Tian, Y., Yu, S., Wang, K. L., et. al. (2017). Investigation of cold atmospheric plasma-activated water for the dental unit waterline system contamination and safety evaluation in vitro. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *37*, 1091-1103. https://doi.org/10.1007/s11090-017-9811-0

Pankaj, S. K., Wan, Z., ve Keener, K. M. (2018). Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, *7*(4), 1-21. https://doi.org/10.3390/foods7010004

Park, D. P., Davis, K., Gilani, S., Alonzo, C. A., Dobrynin, D., Friedman, G., et. al. (2013). Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. *Current Applied Physics*, *13*, S19-S29. https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.12.019

Park, J. Y., Park, S., Choe, W., Yong, H. I., Jo, C., ve Kim, K. (2017). Plasma-functionalized solution: a potent antimicrobial agent for biomedical applications from antibacterial therapeutics to biomaterial surface engineering *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(50), 43470-43477. https://doi.org/10.1021/acsami.7b14276

Patra, A., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Sutar, P. P., ve Jeevarathinam, G. (2022). Effect of plasma activated water (PAW) on physicochemical and functional properties of foods. *Food Control*, *142*, 109268. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109268

Pavlovich, M. J., Chang, H. W., Sakiyama, Y., Clark, D. S., ve Graves, D. B. (2013). Ozone correlates with antibacterial effects from indirect air dielectric

barrier discharge treatment of water. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *46*, 145202. https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/14/145202

Pemen, A., Hoeben, W., Van Ooij, P., ve Leenders, P. (2016). Plasma activated water. WO Patent 2,016,096,751.

Peng, P., Chen, P., Addy, M., Cheng, Y., Zhang, Y., Anderson, E., et al. (2018). *In situ* plasma-assisted atmospheric nitrogen fixation using water and spray-type jet plasma. *Chemical Communications*, *54*, 2886-2889. https://doi.org/10.1039/c8cc00697k

Puertas, E. C., Dzafic, A., ve Coulombe, S. (2020). Investigation of the electrode erosion in pin-to-liquid discharges and its influence on reactive oxygen and nitrogen species in plasma-activated water. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, *40*, 145-167. https://doi.org/10.1007/s11090-019-10036-3

Qian, J., Zhuang, H., Nasiru, M. M., Muhammad, U., Zhang, J., ve Yan, W. (2019). Action of plasma-activated lactic acid on the inactivation of inoculated *Salmonella enteritidis* and quality of beef. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *57*, 102196. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102196

Qian, J., Wang, C., Zhuang, H., Nasiru, M. M., Zhang, J., ve Yan, W. (2021). Evaluation of meat-quality and myofibrillar protein of chicken drumsticks treated with plasma-activated lactic acid as a novel sanitizer. *LWT*, *138*, 110642. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110642

Rahman, M., Hasan, M. S., Islam, R., Rana, R., Sayem, A. S. M., As Sad, M. A., et. al. (2022). Plasma-activated water for food safety and quality: A review of recent developments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(11), 6630. https://doi.org/10.3390/ijerph19116630

Ranieri, P., Sponsel, N., Kizer, J., Rojas-Pierce, M., Hernández, R., Gatiboni, L., et. al. (2021). Plasma agriculture: Review from the perspective of the plant and its ecosystem. *Plasma Processes and Polymers*, *18*(1), 2000162. https://doi.org/10.1002/ppap.202000162

Rowland, D.J. (2020). Antioxidant therapy to protect against free radical damage implicated in coronary heart disease and cancer. *OSP Journal of Health Care and Medicine*, *2*, 1–3.

Royintarat, T., Seesuriyachan, P., Boonyawan, D., Choi, E. H., ve Wattanutchariya, W. (2019). Mechanism and optimization of nonthermal plasma-activated water for bacterial inactivation by underwater plasma jet and delivery of reactive species underwater by cylindrical DBD plasma. *Current Applied Physics*, *19*(9), 1031-1039. https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.06.003

Royintarat, T., Choi, E. H., Boonyawan, D., Seesuriyachan, P., ve Wattanutchariya, W. (2020). Chemical-free and synergistic interaction of ultrasound combined with plasma-activated water (PAW) to enhance microbial inactivation in chicken meat and skin. *Scientific Reports*, *10*, 1559. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58199-w

Sakakura, T., Uemura, S., Hino, M., Kiyomatsu, S., Takatsuji, Y., Yamasaki, R., et. al. (2018). Excitation of H_2O at the plasma/water interface by UV irradiation for the elevation of ammonia production. *Green Chemistry*, *20*, 627-633. https://doi.org/10.1039/C7GC03007J

Samukawa, S., Hori, M., Rauf, S., Tachibana, K., Bruggeman, P., Kroesen, G., et al. (2012). The 2012 plasma roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *45*, 253001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001

Sanguansri, P., Knoerzer, K., Coventry, J., ve Versteeg, C. (2010). Progress and issues with the commercialization of cold plasma in food processing: A selection of case studies. In Doona, C. J., Kustin, K., Feehery, F. E. (Eds.), Case studies in novel food processing technologies (1st ed., pp. 226-257). Woodhead Publishing Ltd.

Sarangapani, C., Patange, A., Bourke, P., Keener, K., ve Cullen, P. J. (2018). Recent advances in the application of cold plasma technology in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, *9*, 609-629. https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012517

Schnabel, U., Andrasch, M., Stachowiak, J., Weit, C., Weihe, T., Schimdt, C., et. al. (2019). Sanitation of fresh-cut endive lettuce by plasma processed tap water (PPtW) – Up-scaling to industrial level. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *53*, 45-55. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.11.014

Shainsky, N., Dobrynin, D., Ercan, U., Joshi, S., Fridman, G., ve Friedman, G. (2010). Effect of liquid modified by non-equilibrium atmospheric pressure plasmas on bacteria inactivation rates. *IEEE International Conference on Plasma Science*. https://doi.org/10.1109/PLASMA.2010.5533900

Shen, J., Tian, Y., Li, Y., Ma, R., Zhang, Q., Zhang, J., ve Fang, J. (2016). Bactericidal effects against *S. aureus* and physicochemical properties of plasma activated water stored at different temperatures. *Scientific Reports*, *6*, 28505. https://doi.org/10.1038/srep28505

Shi, M., Wang, F., Ji, X., Yan, Y., ve Liu, Y. (2022). Effects of plasma-activated water and heat moisture treatment on the properties of wheat flour and dough. *International Journal of Food Science & Technology*, *57*(4), 1988-1994. https://doi.org/10.1111/ijfs.15317

Stara, Z., ve Krčma, F. (2004). The study of H_2O_2 generation by DC diaphragm discharge in liquids. *Czechoslovak Journal of Physics*, *54*, C1050-C1055. https://doi.org/10.1007/BF03166529

Surowsky, B., Schlüter, O., ve Knorr, D. (2015). Interaction of non-thermal atmospheric pressure plasmas with solid and liquid food systems: A review. *Food Engineering Reviews*, *7*(2), 82-108. https://doi.org/10.1007/s12393-014-9088-5

Takamatsu, T., Kawate, A., Uehara, K., Oshita, T., Miyahara, H., Dobrynin, D., et. al. (2012). Bacterial inactivation in liquids using multi-gas plasmas. *Plasma Medicine*, *2*, 237-247. https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2014010792

Tarabova, B., Lukes, P., Hammer, M. U., Jablonowski, H., Woedtke, T. V., Reuter, S., ve Machala, Z. (2019). Fluorescence measurements of peroxynitrite/peroxynitrous acid in cold air plasma treated aqueous solutions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *21*, 8883. https://doi.org/10.1039/c9cp00871c

Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., ve Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochmicia Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, *61*(1), 2-30. https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003

Thirumdas, R., Kothakota, A., Annapure, U., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R., ve Valdramidis, V. P. (2018). Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, *77*, 21-31. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.007

Tian, Y., Ma, R. N., Zhang, Q., Feng, H. Q., Liang, Y. D., Zhang, J., ve Fang, J. (2015). Assessment of the physicochemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface. *Plasma Processes and Polymers*, *12*(5), 439-449. https://doi.org/10.1002/ppap.201400082

Tian, Y., Guo, J., Wu, D., Wang, K., Zhang, J., ve Fang, J. (2017). The potential regulatory effect of nitric oxide in plasma activated water on cell growth of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Applied Physics*, *122*(12), 123302. https://doi.org/10.1063/1.4989501

Van Gils, C. A. J., Hofmann, S., Boekema, B. K. H. L., Brandenburg, R., ve Bruggeman, P. J. (2013). Mechanisms of bacterial inactivation in the liquid phase induced by a remote RF cold atmospheric pressure plasma jet. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *46*(17), Article 175203. https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175203

Vasko, C. A., Liu, D. X., Van Veldhuizen, E. M., Iza, F., ve Bruggeman, P. J. (2014). Hydrogen peroxide production in an atmospheric pressure RF glow discharge: Comparison of models and experiments. *Plasma Chemistry and Processing*, *34*, 1081-1099. https://doi.org/10.1007/s11090-014-9559-8

Verlackt, C. C. W., Boxem, W. V., ve Bogaerts, A. (2018). Transport and accumulation of plasma generated species in aqueous solution. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *20*, 6845-6859. https://doi.org/10.1039/C7CP07593F

Wang, T., Jia, H., Guo, X., Xia, T., Qu, G., Sun, Q., ve Yin, X. (2018). Evaluation of the potential of dimethyl phtyhalate degradation in aqueous using sodium percarbonate activated by discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*, *346*, 65-76. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.024

Wang, S., Xu, D., Qi, M., Li, B., Peng, S., Li, Q., Zhang, H., ve Liu, D. (2021). Plasma-activated water promotes wound healing by regulating inflammatory responses. *Biophysica*, *1*, 297-310. https://doi.org/10.3390/biophysica1030022

Wang, Y., Liu, Y., Li, M., Ma, M., ve Sun, Q. (2022). Evaluation of the storage stability and quality properties of fresh noodles mixed with plasma-activated water. *Foods*, *11*(1), 133. https://doi.org/10.3390/foods11010133

Wilson, D.W., Nash, P., Buttar, H.S., Griffiths, K., Singh, R., De Meester, F., et. al. (2017). The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: An overview. *Antioxidants*, *6*, 81. https://doi.org/10.3390/antiox6040081

Wong, K. S., Chew, N. S. L., Low, M., ve Tan, M. K. (2023). Plasma-activated water: Physicochemical properties, generation techniques, and applications. *Processes*, *11*(7), 2213. https://doi.org/10.3390/pr11072213

Wu, S., Zhang, Q., Ma, R., Yu, S., Wang, K., Zhang, J., ve Fang, J. (2017). Reactive radical-driven bacterial inactivation by hydrogen-peroxide enhanced plasma-activated-water. *The European Physical Journal Special Topics*, *226*, 2887-2899. https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-60330-y

Xiang, Q., Liu, X., Liu, S., Ma, Y., Xu, C., ve Bai, Y. (2019). Effect of plasma-activated water on microbial quality and physicochemical characteristics of mung bean sprouts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *52*, 49–56. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.012

Xiang, Q. S., Zhang, R., Fan, L. M., Ma, Y. F., Wu, D., Li, K., ve Bai, Y. H. (2020). Microbial inactivation and quality of grapes treated by plasma-activated water combined with mild heat. *LWT, 126,* 109336. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109336

Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q., ve Zhang, J. (2016). Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chemistry*, *197(A)*, 436-444. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.144

Yan, Y., Feng, L., Shi, M., Cui, C., ve Liu, Y. (2020). Effect of plasma-activated water on the structure and in vitro digestibility of waxy and normal maize starches during heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, *306*, Article 125589. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125589

Yong, H. I., Park, J., Kim, H. J., Jung, S., Park, S., Lee, H. J., et. al. (2018). An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety. *Plasma Processes and Polymers*, *15*, 1700050. https://doi.org/10.1002/ppap.201700050

Zhai, Y., Liu, S., Xiang, Q., Lyu, Y., ve Shen, R. (2019). Effect of plasma-activated water on the microbial decontamination and food quality of thin sheets of bean curd. *Applied Sciences*, *9*(20), 4223. https://doi.org/10.3390/app9204223

Zhang, S., Rousseau, A., ve Dufour, T. (2017). Promoting lentil germination and stem growth by plasma activated tap water, demineralized water and liquid fertilizer. *RSC Advances*, *7*, 31244-31251. https://doi.org/10.1039/C7RA04663D

Zhang, X., Zhou, R., Bazaka, K., Liu, Y., Zhou, R., Chen, G., et. al. (2018). Quantification of plasma produced OH radical density for water sterilization. *15*(6), 1700241. https://doi.org/10.1002/ppap.201700241

Zheng, Y., Wu, S., Dang, J., Wang, S., Liu, Z., Fang, J., et. al. (2019). Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water. *Journal of Hazardous Materials*, *377*, 98–105. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.058

Zhao, Y., Chen, R., Liu, D., Wang, W., Niu, J., ve Xia, Y. (2019). Effect of nonthermal plasma-activated water on quality and antioxidant activity of fresh-cut kiwifruit. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *47*(11), 4811-4817. https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2904298

Zhao, Y., Zhao, Z., Chen, R., Tian, E., Liu, D., Niu, J., ve Wang, W. (2020). Plasma-activated water treatment of fresh beef: Bacterial inactivation and effects on quality attributes. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, *4*(1), 113-120. https://doi.org/10.1109/TRPMS.2018.2883789

Zhao, Z., Wang, X., ve Ma, T. (2021a). Properties of plasma-activated water with different activation time and its effects on the quality of button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *LWT*, *147*, 111633. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111633

Zhao, Y. M., Oliveira, M., Burgess, C. M., Cropotova, J., Rustad, T., Sun, D. W., ve Tiwari, B. K. (2021b). Combined effects of ultrasound, plasma-activated water, and peracetic acid on decontamination of mackerel fillets. *LWT*, *150*, 111957. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111957

Zhou, R., Zhang, X., Bi, Z., Zong, Z., Niu, J., Song, Y., Liu, D., ve Yang, S. (2015). Inactivation of *Escherichia coli* cells in aqueous solution by atmospheric pressure N_2, He, Air, and O_2 microplasmas. *Applied and Environmental Microbiology*, *81*, 5257-5265. https://doi.org/10.1128/AEM.01287-15

Zhou, R., Zhou, R., Zhang, X., Li, J., Wang, X., Chen, Q., et. al. (2016). Synergistic effect of atmospheric-pressure plasma and TiO_2 photocatalysis on inactivation of *Escherichia coli* cells in aqueous media. *Scientific Reports*, *6*, 39552. https://doi.org/10.1038/srep39552

Zhou, R., Zhou, R., Prasad, K., Fang, Z., Speight, R., Bazaka, K., ve Ostrikov, K. K. (2018). Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: the crucial role of peroxynitrite. *Green Chemistry*, *20*, 5276-5284. https://doi.org/10.1039/C8GC02800A

Zhou, R., Zhou, R., Yu, F., Xi, D., Wang, P., Li, J., et. al. (2018). Removal of organophosphrous pesticide residues from *Lycium barbarum* by gas phase surface dischage plasma. *Chemical Engineering Journal*, *342*, 401-409. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.107

Fe-Bazlı Süperiletken Sistemlerde Yüksek Basınç Etkisi

Kübra YAKINCI[1]
M. Eyyuphan YAKINCI[2]

1- Doç. Dr.; İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, kubra.yakinci@iste.edu.tr ORCID No:0000-0003-1257-1532.
2- Prof. Dr.; İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, meyyuphan.yakinci@iste.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3244-6432.

ÖZET

Bu çalışmada, Fe-bazlı süperiletken sistemlerde yüksek basıncın süperiletkenlik özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Farklı kristal yapılara sahip 1111, 111, 122 ve 11-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde basıncın kritik sıcaklık (T_c), kristal yapı, manyetik düzen, akı sabitleme (flux pinning) ve vorteks dinamikleri üzerindeki rolü literatürde rapor edilen deneysel bulgular çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bulgular, yüksek basıncın örgü parametrelerini, anyon yüksekliğini ve bağ açılarını değiştirerek süperiletkenliğin ortaya çıkışı ve optimizasyonunda belirleyici bir kontrol parametresi olduğunu göstermektedir. Özellikle FeSe ve Fe($Se_{1-x}Te_x$) sistemlerinde T_c ile anyon yüksekliği arasında güçlü bir korelasyon olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, hidrostatik basıncın yalnızca T_c'yi değil, aynı zamanda kusur yapısını ve tane bağlantılarını düzenleyerek akı sabitlemeyi güçlendirdiği ve kritik akım yoğunluğunu (J_c) önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Manyetik gevşeme ve vorteks dinamiklerine ilişkin çalışmalar, basıncın vorteks sürünmesini bastırdığını ve girdap hareketliliğini azalttığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, yüksek basınç Fe-bazlı süperiletkenlerin hem temel fiziksel mekanizmalarının anlaşılmasında hem de yüksek alan uygulamalarına yönelik performanslarının geliştirilmesinde etkili ve çok yönlü bir ayarlama parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Fe-Bazlı Süperiletkenler, Yüksek Basınç, Akı Sabitleme, Vortex Dinamikleri, Kritik Sıcaklık (T_c).

GİRİŞ

Basınç, sıcaklık gibi temel bir termodinamik değişken olup deneysel olarak son derece geniş bir aralıkta uygulanabilmesi sayesinde astrofizik, jeofizik, yoğun madde fiziği, kimya, biyoloji ve gıda işleme teknolojileri dâhil olmak üzere pek çok bilim ve teknoloji alanında önemli katkılar sağlamaktadır (Schilling, 2000; Schilling 1998). Süperiletkenlik alanı da basıncın sunduğu bu ayarlanabilirliğin etkin biçimde kullanıldığı disiplinlerden biridir. Süperiletkenler üzerinde gerçekleştirilen ilk yüksek basınç çalışmaları, 1925 yılında Sizoo ve Onnes tarafından yapılmış; Sn ve In elementlerinde kritik sıcaklığın (T_c) basınç altında azaldığı gözlemlenmiştir (Sizoo vd., 1925). Araştırmacılar, T_c' deki bu basınca bağlı azalmayı izotop etkisi ile ilişkilendirmiştir. Bu öncü çalışmadan sonra, yüksek basınç deneyleri süperiletkenlik araştırmalarında önemli bir araç hâline gelmiş ve günümüzde de yoğun biçimde kullanılmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, özellikle Fe-bazlı süperiletken sistemlerde yüksek basıncın süperiletkenlik üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Şubat 2008'in

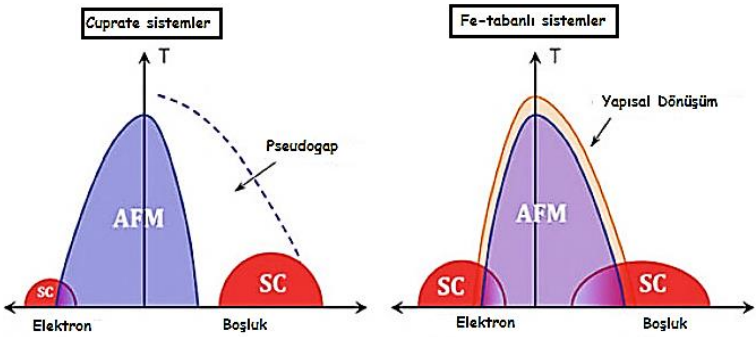
sonunda Hideo Hosono, flor katkılı LaFeAsO bileşiğinde 26 K'lik bir süperiletken geçiş sıcaklığına sahip Fe-bazlı bir süperiletkende süperiletkenliği ilk kez rapor etmiştir (Kamihara vd., 2008). Bu buluş, yeni bir süperiletken ailesinin keşfine öncülük etmiş ve dünya genelinde yoğun araştırma faaliyetlerinin başlamasına yol açmıştır. Söz konusu keşif, süperiletkenliğin kökenine ilişkin kuramsal ve deneysel çalışmalara da yeni bir yön kazandırmıştır. Günümüze kadar demir bazlı süperiletken ailesi; 11, 111, 122, 1111, 1144, 12442, 112, 123 ve 21311 gibi çok sayıda farklı kristal yapıyı kapsayacak şekilde hızla genişlemiş, süperiletken geçiş sıcaklığı ise yaklaşık 57 K'ye kadar yükselmiştir.

Küprat ve Fe-bazlı süperiletkenlerde süperiletken durum, esas olarak kimyasal katkılama/yer değiştirme (x) ve yüksek basınç uygulanması yoluyla indüklenmektedir. Kimyasal katkılama, sisteme delik veya elektron eklenmesine bağlı olarak kafes parametrelerini değiştirmekte ve iç kimyasal basınç oluşturarak elektronik bant yapısını, Fermi seviyesi civarındaki durum yoğunluğunu ve taşıyıcı konsantrasyonunu modüle etmektedir (Sefat, 2011; Wenbin vd., 2016). Yüksek basınç ise süperiletkenliğin incelenmesinde "temiz" ve etkili bir ayarlama parametresi olarak öne çıkmaktadır (Mao vd., 2018). Fe-bazlı süperiletken sistemlerinde basıncın en belirgin etkisi, birim hücre hacminin küçülmesi veya yapısal bir faz geçişinin tetiklenmesidir. Kimyasal bağ uzunlukları ve bağ açıları değiştirildiğinde, ortaya çıkan yapısal faz geçişleri süperiletkenlik de dâhil olmak üzere pek çok fiziksel özelliği doğrudan etkilemektedir.

Yapısal faz geçişleri, kristal kafes boyutlarını değiştirerek katman içi ve katmanlar arası yük transfer süreçlerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle basınç, Fermi seviyesindeki taşıyıcı yoğunluğunu ve taşıyıcı türünü etkin biçimde değiştirebilmekte; bu durum hem normal hâl hem de süperiletkenlik açısından kritik öneme sahip olmaktadır. Ayrıca, manyetik değişim etkileşimleri de yüksek basınç ile kontrol edilebilmektedir. Ferro-manyetik veya antiferro-manyetik etkileşimlerin şiddeti büyük ölçüde bağ uzunlukları ve bağ açılarına bağlı olup, komşu manyetik atomlar arasındaki dalga fonksiyonu örtüşmesini belirlemektedir. Deneysel açıdan bakıldığında, yüksek basınç uygulaması tanelerin sıkışması yoluyla tane bağlantısını iyileştirebilmekte, güçlü bağ oluşumunu teşvik edebilmekte ve polikristal örneklerde anizotropik büzülmeye neden olarak kritik sıcaklığın (T_c) ve kritik akım yoğunluğunun (J_c) önemli ölçüde artmasını sağlayabilmektedir.

Yüksek basınç (P) ve kimyasal katkılama (x), manyetik düzeni ve yapısal faz geçişlerini bastırarak süperiletkenliğin ortaya çıkmasında kilit bir rol oynamaktadır. Kimyasal katkılama durumunda, Şekil 1'de cuprate ve Fe-bazlı süperiletkenler için gösterildiği üzere, süperiletken faz genellikle kubbe şeklinde bir T_c–x ilişkisi sergiler. Katkılama miktarı arttıkça T_c başlangıçta yükselmekte, optimum katkılama değeri x_c'de maksimuma ulaşmakta ve aşırı katkılama bölgesinde tekrar düşmektedir. Benzer şekilde, hem cuprate' larda hem de demir bazlı süperiletkenlerde T_c–P ilişkisi de kubbe biçimli bir

davranış göstermekte; basınç başlangıçta T_c'yi artırırken, daha yüksek basınçlarda T_c azalmaktadır (sefat, 2011).



Şekil 1. Fe-tabanlı ve cuprate sistemlerdeki tipik faz diyagramı (Johnson vd., 2015).

Fe-bazlı sistemlerde süperiletkenliğin, manyetik düzen ile yakın ilişkide olduğu veya bu düzenle rekabet hâlinde bulunduğu genel kabul görmektedir. Manyetik düzeni belirleyen spinler arası değişim etkileşimleri, büyük ölçüde bağ uzunlukları ve bağ açıları tarafından kontrol edilmektedir. Kimyasal katkılama ve basınç uygulaması, bu yapısal parametreleri değiştirerek manyetik düzenin ve süperiletkenliğin açılıp kapanmasına neden olmaktadır. Fe-bazlı süperiletken sistemlerin faz diyagramında süperiletken fazın kubbe biçiminde olması, katkılama seviyesine bağlı olarak süperiletkenliğin hem güçlenebileceğini hem de bastırılabileceğini göstermektedir. Basınç etkisi çoğu durumda kimyasal katkılama ile benzerlik göstermekte; her iki etki de manyetik düzeni bastırarak süperiletkenliği indüklemektedir. Bu nedenle basıncın süperiletkenlik üzerindeki etkisi, farklı bileşikler arasında ve aynı bileşiğin farklı katkılama seviyelerinde önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir.

Yüksek basınç, hem geleneksel hem de geleneksel olmayan süperiletkenlerin keşfi ve geliştirilmesinde tarihsel olarak önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde bu alandaki en dikkat çekici gelişmelerden biri, karbonlu sülfür hidritte oda sıcaklığına yakın süperiletkenliğin yüksek basınç altında gözlemlenmesidir. Benzer şekilde, basınç cuprate ve Fe-bazlı süperiletkenlerin performansı üzerinde de belirleyici etkilere sahiptir. Katkılama bileşimi ve düzeyine bağlı olarak basınç, T_c'yi artırabilmekte, azaltabilmekte veya neredeyse sabit tutabilmektedir. Yüksek basınç altındaki süperiletkenlik mekanizması; yük, spin ve orbital dalgalanmaları gibi temel etkenlerle ilişkili olmaya devam etmektedir. Ayrıca, CuO_2 veya FeAs süperiletken katmanına dik yönde (c-ekseni boyunca) uygulanan basıncın, katmana paralel yöndeki basınca kıyasla daha kolay sıkışmaya neden olduğu bilinmektedir (Sefat, 2011). Bu anizotropik sıkışma, süperiletken katmandaki elektronik durumun modülasyonuna yol açan bir yük yeniden dağılımını beraberinde getirmektedir.

Cuprate süperiletkenler özelinde, çok sayıda çalışma kritik sıcaklığın basınç uygulanmasıyla artırılabildiğini ortaya koymuştur. Örneğin, $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\&}$ (Hg-1223) bileşiğinde yaklaşık 164 K ile şimdiye kadar rapor edilen en yüksek T_c, 31 GPa basınç altında elde edilmiştir (Chu vd., 1993). Benzer şekilde, ortam basıncında T_c=80 K olan $YBa_2Cu_4O_8$ bileşiğinde T_c, 10 GPa basınç altında 108 K'ye yükselmiştir (Souliou vd., 2014). Hg-1223 (Mito vd., 2017), $YBa_2Cu_4O_8$ (Y-124) (Mito vd., 2016), Bi-2212 ve Bi-2223 sistemlerinde T_c' nin basınca bağlı olarak kubbe biçimli bir davranış sergilediği gözlenmiş olup, bu durum taşıyıcı yoğunluğu ile T_c arasındaki ilişkiyle uyumludur. Basınç altında Hall katsayısında gözlenen değişimler de CuO_2 düzlemine taşıyıcı kazandırılabildiğini göstermektedir (Murayama vd., 1991). $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ sisteminde Huang ve çalışma arkadaşları, hidrostatik basıncın yapısal düzensizliği azalttığını ve oksijen düzenini artırdığını bildirmiştir (Huang vd., 2018). Aşırı katkılanmış bölgede ise basıncın Tc'yi düşürebildiği gözlenmiştir. Sıkışma etkisi, Cu–O zincir tabakası ile CuO_2 süperiletken tabakanın birbirine yaklaşmasına yol açarak katmanlar arası yük transferini artırmakta ve CuO_2 düzleminde ilave delik katkılanmasına neden olmaktadır; bu sonuçlar kuramsal modellerle uyum içindedir (Han vd., 1992; Chen vd., 2000; Neumeier vd., 1993). Bununla birlikte, deneysel bulgular yüksek basınç altında elde edilen yaklaşık 107 K'lik maksimum T_c değerinin, ortam basıncındaki yaklaşık 94 K değerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Eğer T_c' deki basınç kaynaklı değişim yalnızca katkılanma ile açıklanabilseydi, maksimum T_c' nin her iki durumda da benzer olması beklenirdi. Bu durum, basınç altında T_c değişiminin yalnızca yük transferi mekanizmasıyla açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Aşağıda başlıca Fe-bazlı süperiletken sistemlerde yüksek basınç etkisi ile yüksek basıncın bu sistemlerde özellikle akı sabitlenmesi ve vorteks dinamikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Fe-BAZLI SÜPERİLETKEN SİSTEMLER ÜZERİNE YÜKSEK BASINÇ ETKİSİ

Çoğu araştırmacı, Fe-bazlı süperiletken sistemlerde süperiletkenliğin manyetik düzen ile yakın ilişkili olduğu veya bu düzenle rekabet hâlinde bulunduğu görüşünde birleşmektedir. Nitekim ana bileşiklerin büyük bir kısmı spin yoğunluk dalgaları veya antiferromanyetik düzen sergilemektedir ve bu manyetik düzen bastırıldığında süperiletkenlik ortaya çıkmaktadır. Manyetik düzeni belirleyen spinler arası değişim etkileşmeleri, büyük ölçüde

bağ uzunlukları ve bağ açıları tarafından kontrol edilmektedir. Fe-bazlı süperiletkenlerde bu değişim etkileşimi, iki Fe atomu arasında yer alan kalkojen veya pniktogen atomları aracılığıyla gerçekleşmektedir. Kalkojen ya da pniktogen atomlarının Fe atomlarıyla aynı düzlemde bulunmaması nedeniyle, Fe-bazlı süperiletkenlerdeki manyetik düzen Fe–kalkojen veya Fe–pniktogen bağ uzunlukları ve bağ açılarına son derece duyarlıdır. Bu bağlamda, kimyasal katkılama ve basınç uygulaması, bağ uzunluklarını ve bağ açılarını değiştirerek manyetik düzenin ve süperiletkenliğin açılıp kapanmasına neden olabilmektedir. Daha da önemlisi, Fe-bazlı süperiletkenlere uygulanan yüksek basınç, beklenmedik biçimde yeni süperiletken fazların ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Kimyasal katkılamaya örnek olarak $LaFeAsO_{1-x}F_x$ bileşiğinde, O konumlarına yapılan F katkılaması ekstra elektron taşıyıcıları sağlamakta ve Fe–As katmanında düzensizlik oluşturarak süperiletkenliği indüklemektedir. Buna karşılık, La konumlarına Sr katkılaması Fe–As katmanına hall taşıyıcıları kazandırmakta ve daha düşük Tc değerlerine sahip süperiletkenlik ortaya çıkarmaktadır. Yüksek basınç altında sentez yöntemi kullanılarak $LaFeAsO_{1-x}$ bileşiğinde La–O katmanında oksijen boşlukları oluşturulması yoluyla da süperiletkenlik doğrudan elde edilebilmektedir. Kimyasal katkılama ve yüksek basınçlı sentez yöntemlerine ek olarak, bazı Fe-bazlı bileşiklerde yalnızca basınç uygulanmasıyla süperiletkenliğin doğrudan ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Ren vd., 2009). Yüksek basınç, bağ uzunluğu ve bağ açısı üzerinden örgü parametrelerini değiştirerek bant yapısını ve yük transferini belirleyen temel fiziksel parametreler üzerinde etkili olmaktadır.

Bunlara ek olarak, "anyonik yükseklik" olarak tanımlanan ve anyonun demir-kare düzleminin üzerindeki yüksekliğini ifade eden parametre, Fe-bazlı süperiletkenlerin kristal yapısı ile T_c arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan önemli bir ölçüttür. Bu kapsamda Y. Mizuguchi ve çalışma arkadaşları, tipik Fe-bazlı süperiletkenler için T_c'nin anyonik yükseklik bağımlılığını araştırmış ve hem ortam basıncı hem de yüksek basınç altında elde edilen verilerin yaklaşık 1.38 Å civarında maksimum gösteren simetrik bir eğriyi izlediğini ortaya koymuşlardır (Mizuguchi vd., 2010). $NdFeAsO_{0.85}$, $SrFe_2As_2$, $BaFe_2As_2$ ve FeSe gibi sistemler için basınç altında elde edilen verilerin, Fe konumlarında düzensizlik içermemelerine rağmen, aynı evrensel eğri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Bir diğer kritik yapısal parametre As–Fe–As bağ açısı (α) olup, C. H. Lee ve çalışma arkadaşları $LaFeAsO_{1-x}$ bileşiği için Tc'nin As–Fe–As bağ açısına bağlı değişimini incelemiş ve çeşitli Fe-bazlı süperiletken sistemler için bu ilişkinin genel bir özetini sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, oksijen eksikliği arttıkça $FeAs_4$ örgüsünün daha düzenli bir tetrahedral yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Buna bağlı olarak T_c' nin, ideal tetrahedral açı olan $\alpha \approx 109.47°$ civarında maksimum değerine ulaştığı belirlenmiştir (Lee vd., 2008). Yüksek basınç, örgü sıkışması yoluyla hem anyonik yüksekliği

hem de As–Fe–As bağ açısını doğrudan değiştirebilmekte ve böylece süperiletkenlik özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Kimyasal katkılama ve yüksek basınç uygulamalarına Fe-bazlı süperiletken sistemlerin verdiği tepkiler, her bir kristal faz için aşağıda ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

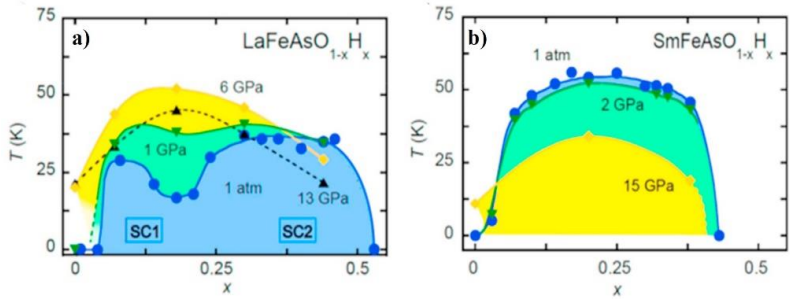
- **1111-fazı**

F katkılı 1111-fazı $RFeAsO_{1-x}F_x$ (R = La, Ce, Nd, Pr, Sm) bileşikleri, görece yüksek T_c nedeniyle Fe-bazlı süperiletkenlerin prototip sistemi olarak kabul edilmektedir. Fe-bazlı süperiletkenlerin tipik faz diyagramı, taşıyıcı katkılanmasının artmasıyla antiferromanyetik (AF) fazdan süperiletken (SC) faza bir geçiş olduğunu göstermektedir; ancak 1111-fazı sistemlerde bu iki faz arasında çok az örtüşme ya da hiç örtüşme bulunmamaktadır. 1111-fazına ait RFeAsO bileşiklerinin basınç altındaki süperiletkenlik özellikleri, nadir toprak elementi R'ye (La, Ce, Sm, Nd) ve taşıyıcı yoğunluğuna (x) güçlü biçimde bağlıdır (Sefat, 2011). Örneğin, LaFeAsO bileşiği için en yüksek T_c değeri 12 GPa basınç altında 21 K olarak rapor edilmiştir (Okada vd., 2008). Buna karşılık, CeFeAsO sisteminde 50 GPa'a kadar uygulanan basınca rağmen herhangi bir süperiletkenlik gözlenmemiştir (Zocco vd., 2011). SmFeAsO bileşiğinde ise maksimum T_c değeri 9 GPa basınç altında 11 K olarak bulunmuştur (Takahashi vd., 2009). F katkılı $LaFeAsO_{1-x}F_x$ bileşiğinde x=0.5 için maksimum T_c değeri 29 K iken, x=0.10 için yaklaşık 4 GPa basınç altında T_c'nin 43 K'ye yükseldiği ölçülmüştür (Takashi vd., 2008; Zocco vd. 2008). Buna karşın, $CeFeAsO_{0.88}F_{0.12}$ bileşiğinde T_c, basınçla birlikte monotonik olarak azalarak ortam basıncındaki 44 K değerinden 26.5 GPa'da 1.1 K'e düşmektedir (Zocco vd. 2008). Benzer şekilde, $NdFeAsO_{0.85}$ ve $NdFeAsO_{0.6}$ bileşiklerinde T_c yaklaşık 51.9 K iken 6.8 GPa basınç altında 35 K'e düşmekte olup, basınç katsayısı $dT_c/dP \approx -2.6$ K/GPa olarak belirlenmiştir (Takeshita vd. 2008). $SmFeAsO_{1-x}F_x$ sisteminde de T_c' nin basınç altında baskılandığı ve farklı katkılama seviyeleri için farklı dT_c/dP değerleri elde edildiği rapor edilmiştir (Takeshita vd. 2008). Örneğin, $SmFeAsO_{0.85}$ bileşiğinde T_c, ortam basıncındaki 55 K'den 7.2 GPa basınç altında 42 K'e düşmekte ve dT_c/dP değeri −2.0 K/GPa olarak bulunmuştur (Takeshita vd. 2008).

$LaFeAsO_{1-x}H_x$ sisteminde ise hidrojen katkılaması yoluyla 1111-fazına elektron taşınmakta ve 6 GPa basınç altında T_c değerinin 50 K'nin üzerine çıktığı gözlenmektedir; bu değer Fe-bazlı süperiletkenler için olağanüstü derecede yüksektir. Bu sistem, iki ana faz ve iki ayrı süperiletken faz içeren özgün bir faz diyagramı sergilemektedir (Takashi vd. 2015). Şekil 2a'da çift kubbeli süperiletken T_c yapısının yalnızca La içeren 1111-fazında gözlendiği, buna karşılık Şekil 2b'de gösterildiği üzere diğer 1111-fazı sistemlerde (R = Ce, Sm, Gd) tek kubbeli bir süperiletken faz diyagramının elde edildiği görülmektedir. Şekil 2b'de ayrıca $SmFeAsO_{1-x}H_x$ bileşiği için 1

atm, 2 GPa ve 15 GPa basınçlar altında elde edilen T_c–x faz diyagramları sunulmaktadır. Uygulanan basınç arttıkça T_c' nin monotonik olarak azaldığı ve tek kubbeli süperiletken bölgenin hafif katkılanmış bölgeye doğru kayarak daraldığı açıkça görülmektedir.

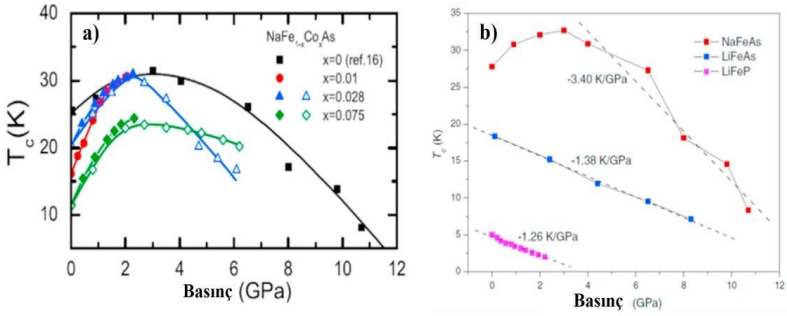
Sonuç olarak, 1111-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde süperiletkenliğin basınç ve katkılama bileşimine verdiği tepki, nadir toprak elementi türüne ve elektronik yapıya son derece duyarlı olup, bu sistemlerde T_c' nin belirlenmesinde basit bir manyetik bastırma mekanizmasının ötesinde çoklu yapısal ve elektronik parametrelerin birlikte rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. $LaFeAsO_{1-x}H_x$ ve $SmFeAsO_{1-x}H_x$ sistemlerinin basınç altındaki faz diyagramları (Sang vd., 2021)

➢ 111-bazlı sistemler

Fe-bazlı süperiletkenler ailesi içerisinde en az incelenmiş sınıflardan biri 111-fazıdır. Bu çalışmada, 111-fazının üç temsilcisi olan NaFeAs, LiFeP ve LiFeAs sistemleri için gerçekleştirilen basınç çalışmaları ele alınmaktadır. NaFeAs bileşiğinde süperiletken geçiş sıcaklığı T_c, yaklaşık 3 GPa basınç altında 31 K ile maksimum değerine ulaşmakta ve basıncın daha da artırılmasıyla birlikte azalmaktadır (Liu vd., 2011). Buna karşılık, LiFeAs ve LiFeP bileşiklerinde T_c' nin basınç altında baskılandığı gözlenmiş olup, bu davranış Şekil 3a ve 3b'de gösterilmektedir (Wang vd., 2011). Ayrıca, Şekil 3a'da Co-katkılı NaFeAs sistemi için basıncın T_c üzerindeki etkisi de sunulmaktadır.



Şekil 3. 111-fazına ait NaFeAs, LiFeP ve LiFeAs sistemlerinde T_c-P ilişkisi (Sang vd., 2021)

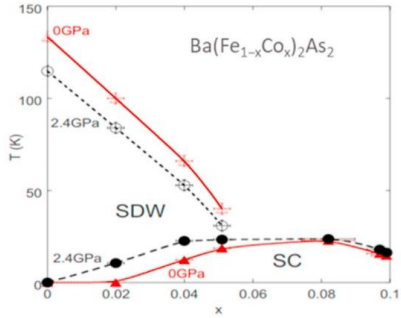
AFeAs(P) (A = Li, Na) bileşiklerinden oluşan 111-serisi Fe-bazlı süperiletkenlerin tümü P4/nmm uzay grup simetrisine sahip olup, kimyasal açıdan benzer kristal yapılara sahiptir; ancak basınç altında sergiledikleri yapısal faz geçişleri açısından belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, NaFeAs sistemi basınç arttıkça sırasıyla tetragonal P4/nmm fazından ortorombik Cmcm fazına ve ardından hekzagonal P-3m1 fazına geçiş göstermektedir. LiFeP sistemi, tetragonal P4/nmm fazından ortorombik Cmcm fazına ve sonrasında tetragonal I4mm fazına dönüşmektedir. LiFeAs sistemi ise basınç altında daha karmaşık bir yapısal evrim sergileyerek, tetragonal P4/nmm fazından hekzagonal P-3m1 fazına, ardından tetragonal I4mm fazına ve son olarak hekzagonal $P6_3/mmc$ fazına geçiş yapmaktadır (Sang vd., 2021).

Sonuç olarak, 111-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde basıncın T_c üzerindeki etkisi bileşime son derece duyarlı olup, benzer kristal simetriye sahip sistemlerin dahi basınç altında farklı yapısal faz geçişleri sergilemesi, bu fazda süperiletkenliğin yapısal kararlılık ve örgü evrimi ile yakından ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

➢ 122-bazlı sistemler

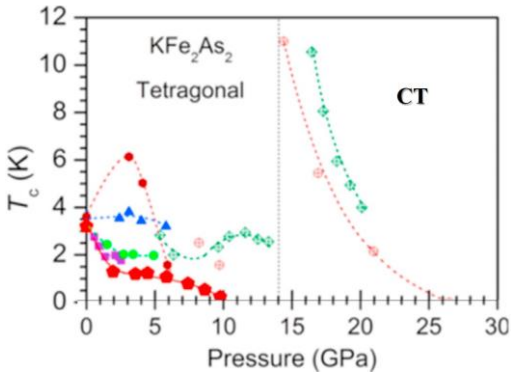
122-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde basınç etkisi, ilk kez Alireza ve arkadaşları tarafından AFe_2As_2 (A = Ba, Sr, Ca) bileşiklerinde basınçla indüklenen süperiletkenliğin rapor edilmesiyle ortaya konmuştur (Alireza vd., 2008). Bu sistemlerde basınçla ortaya çıkan süperiletkenlik, numune kalitesine, uygulanan basınç ortamının hidrostatikliğine ve katkılama düzeyine son derece duyarlıdır. $BaFe_2As_2$ için farklı basınç hücreleri altında elde edilen faz diyagramları, antiferromanyetik düzenin tüm koşullarda bastırıldığını ancak bastırılma derecesinin kimyasal katkılamaya benzer biçimde değiştiğini göstermektedir. $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ sisteminde basınç, özellikle az katkılı bölgede T_c'yi önemli ölçüde artırırken, optimum ve aşırı katkılı bölgelerde etkisi sınırlı kalmaktadır, şekil 4. Benzer şekilde Ba_{1-}

$_xK_xFe_2As_2$ bileşiğinde, basınç ve K katkısının örgü parametreleri ve yapısal distorsiyonlar üzerinde benzer etkiler oluşturduğu rapor edilmiştir.



Şekil 4. $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ sisteminde T_c-x değişimi (Sang vd., 2021)

122-fazı içinde özel bir yere sahip olan KFe_2As_2 sistemi, T_c' nin basınca karşı V-şekilli bağımlılığı nedeniyle yoğun ilgi görmüştür, şekil 5. T_c başlangıçta basınçla azalmakta, kritik bir basınç değeri civarında tekrar artmakta ve daha yüksek basınçlarda süperiletkenlik tamamen ortadan kalkmaktadır. Yüksek basınç altında KFe_2As_2, tetragonal fazdan çöken tetragonal faza izostrüktürel bir geçiş sergilemekte olup, güncel çalışmalar bu CT fazda süperiletkenliğin bulunmadığını ortaya koymuştur. Önceki bazı raporların hidrostatik olmayan basınç koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Sang vd., 2021).



Şekil 5. KFe_2As_2 sisteminda T_c' nin basınca bağlı değişimi (Sang vd., 2021)

Sonuç olarak, 122-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde basınç, manyetik ve yapısal geçişleri hassas biçimde ayarlayan güçlü bir dış parametre olarak öne çıkmakta; ancak süperiletkenliğin ortaya çıkışı ve evrimi, sistemin kimyasal bileşimi, katkılama düzeyi ve basınç koşullarının hidrostatikliği ile belirlenen karmaşık ve malzemeye özgü bir etkileşim tarafından kontrol edilmektedir.

➢ 11-bazlı sistemler

Fe-bazlı süperiletkenler ailesinin en basit kristal yapıya sahip üyesi 11-fazı olup, bu grup Fe-kalkojenitler olarak adlandırılmaktadır. En yaygın kalkojen elementleri Se, Te ve S'dir. Bu çalışmada, genel formülleri FeSe, $FeSe_{1-x}Te_x$ ve FeTe olan bileşiklerin basınç altındaki fiziksel davranışları ayrı ayrı ele alınmıştır. Öncelikle FeSe sistemi, kritik sıcaklık (T_c) üzerinde son derece güçlü bir basınç bağımlılığı sergilemektedir (Miziguchi vd., 2008; Margadonna vd., 2009;Medvedev vd., 2009). T_c değeri, yaklaşık 1–2 GPa basınç aralığında basamak benzeri bir artış gösterdikten sonra, 4 GPa'da 37 K'ye kadar yükselmektedir (Masaki vd. 2009). Bu davranış, yüksek basınç altında gerçekleştirilen nükleer manyetik rezonans (NMR) ölçümleriyle açıklığa kavuşturulmuştur (Masaki vd. 2009). NMR deneylerinde ters gevşeme süresinin sıcaklıkla değişimi ($1/T_1T$), süperiletkenliğin antiferromanyetik spin dalgalanma modu ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Antiferromanyetik spin dalgalanmalarının şiddeti ve T_c, basıncın 1.4 GPa'ya kadar artırılmasıyla birlikte kademeli olarak yükselirken, bu basıncın üzerindeki hızlı T_c artışı spin dalgalanmalarının baskılanmasıyla ilişkilendirilmiştir (Masaki vd. 2009). Dolayısıyla T_c'nin basınca bağlı davranışının anlaşılması FeSe sistemi açısından büyük önem taşımaktadır.

FeSe için yüksek basınç altında gerçekleştirilen yapısal incelemeler, sinkrotron ışınımı kullanılarak yapılan x-ışını kırınımı ölçümleriyle gerçekleştirilmiştir (Margadonna vd., 2009;Medvedev vd., 2009). Bu ölçümler, Fe–Se–Fe bağ açısının (β) 9.0 GPa'ya kadar uygulanan basınç altında 104.53°'den 103.2°'ye düştüğünü göstermektedir. T_c basınçla belirgin biçimde artmasına rağmen, $FeSe_4$ tetrahedronunun ideal tetrahedral geometriden giderek uzaklaştığı gözlenmiştir. Bu sonuç, $FeAs_4$ tetrahedronunun düzenli tetrahedron geometrisine yaklaştığında Tc'nin maksimuma ulaştığı 1111-tipi Fe-bazlı süperiletkenlerde rapor edilen eğilimle çelişmektedir (Lee vd., 2008). Bununla birlikte, FeSe'de anyon yüksekliğinin basınç altında belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Özellikle yaklaşık 1 GPa civarında keskin bir düşüş meydana gelirken, daha yüksek basınçlarda anyon yüksekliği 4–6 GPa aralığında yaklaşık 1.42 Å ile minimum değerlerine ulaşmaktadır. Bu basınç aralığı, T_c'de gözlenen hızlı artış ile oldukça uyumludur. Dolayısıyla FeSe için T_c ile anyon yüksekliği arasında güçlü bir korelasyon bulunduğu söylenebilir. Öte yandan, 6 GPa'nın üzerindeki basınçlarda anyon yüksekliğinin yavaşça artmaya başlaması, T_c'de gözlenen düşüş ile ilişkili olabilir. Ayrıca, daha yüksek basınçlarda hegzagonal faza doğru gerçekleşen yapısal faz geçişinin T_c'yi baskıladığı belirtilmelidir. Yapısal faz geçişlerinin olmadığı koşullarda Tc'nin basınçla artması beklenmektedir.

$Fe(Se_{1-x}Te_x)$ sisteminde ise FeSe'nin atmosfer basıncında yaklaşık 8 K olan T_c değeri, Se'nin Te ile kısmi ikamesi sonucu artış göstermektedir

(Fang vd., 2008). Atmosfer basıncında $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ bileşiği için T_c değeri 14 K ile maksimuma ulaşmaktadır. Se'nin Te ile atomik düzeyde ikamesi doğrudan bir taşıyıcı katkılama etkisi yaratmamasına rağmen, düşük sıcaklıklarda gözlenen ortorombik fazın baskılanmasının Tc artışında belirleyici rol oynadığı düşünülmektedir. Örneğin, $Fe_{1.03}Se_{0.57}Te_{0.43}$ bileşiği için T_c'nin basınca bağlı olarak çan biçimli bir davranış sergilediği ve 3.1 GPa'da 23 K ile maksimum değerine ulaştığı rapor edilmiştir. Ancak bu maksimum T_c değeri, FeSe sisteminde elde edilen T_c değerinin altında kalmaktadır (Gresty vd., 2009). Sinkrotron tabanlı yüksek basınçlı x-ışını kırınımı ölçümleri, $Fe_{1.03}Se_{0.57}Te_{0.43}$ bileşiğinde düşük sıcaklıklarda yaklaşık 2–3 GPa civarında ortorombik fazdan monoklinik faza bir yapısal geçiş meydana geldiğini ortaya koymuştur. Daha yüksek basınçlarda ise T_c'nin azaldığı bildirilmektedir. Benzer şekilde, atmosfer basıncında T_c = 14 K olan $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ bileşiği için de çan biçimli bir basınca bağlı T_c davranışı rapor edilmiştir (Horigane vd., 2009). Yüksek basınçlı x-ışını kırınımı verileri, FeSe sisteminde olduğu gibi anyon yüksekliği ile T_c arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca, yüksek basınç altında gerçekleştirilen NMR ölçümleri de süperiletkenliğin antiferromanyetik spin dalgalanması mekanizması ile bağlantılı olduğunu doğrulamaktadır (Masaki vd. 2009).

Son olarak FeTe bileşiği, atmosfer basıncında yaklaşık 70 K'de tetragonal fazdan monoklinik faza bir yapısal faz geçişi sergilemektedir (Bao vd., 2009; Liv d., 2009). Süperiletken olmayan bu monoklinik fazın basınç uygulanmasıyla bastırılmasına ve yüksek basınç altında ardışık yapısal ve manyetik faz geçişlerinin gözlenmesine rağmen, 19 GPa'ya kadar uygulanan basınçlarda süperiletkenliğin ortaya çıkmadığı rapor edilmiştir (Okada vd., 2009). Bununla birlikte, FeTe'nin yüksek basınç altındaki kristal yapısının henüz tam olarak aydınlatılamamış olduğu da vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, 11-fazı Fe-bazlı süperiletkenlerde uygulanan basınç; kristal yapı parametrelerini, özellikle anyon yüksekliğini ve manyetik etkileşimleri doğrudan değiştirerek Tc'nin belirgin biçimde artmasına veya bastırılmasına yol açmakta olup, süperiletkenliğin ortaya çıkışı ve optimizasyonunda basıncın temel bir kontrol parametresi olduğunu açıkça göstermektedir.

Fe-BAZLI SİSTEMLERDE YÜKSEK BASINCIN AKI SABİTLENMESİ (FLUX PINNING) VE VORTEKS DİNAMİKLERİ (VORTEX DYNAMİCS) ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bilindiği üzere Fe-bazlı süperiletkenler, yüksek kritik sıcaklıkları (T_c), yüksek tersinmezlik alanları (H_{irr}), üst kritik alanları (H_{c_2}) ve görece düşük anizotropileri sayesinde yüksek manyetik alan uygulamaları için önemli avantajlar sunmakta ve büyük kritik akımlar taşıyabilmektedir (Richter v., 2017; Wang vd., 2017; Lida vd., 2018). Basıncın Fe-bazlı süperiletkenlerde Tc'yi belirgin biçimde artırdığı uzun süredir bilinmesine karşın, hidrostatik basıncın akı sabitleme (flux pinning) mekanizmaları ve kritik akım yoğunluğu (J_c) üzerindeki etkileri hakkında mevcut literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bağlamda Wang ve çalışma arkadaşları, hidrostatik basıncın yalnızca T_c'yi artırmakla kalmadığını, aynı zamanda Fe-bazlı süperiletkenlerde akı sabitlemeyi güçlendirdiğini ve J_c'yi önemli ölçüde yükselttiğini öne sürmüştür.

Kritik akım yoğunluğunun ve dolayısıyla akı sabitlemenin geliştirilmesi, süperiletkenlerin pratik ve teknolojik uygulamaları açısından günümüzde hâlen temel zorluklardan biri olarak kabul edilmektedir. Günümüze kadar cuprate ve Fe-bazlı süperiletkenlerde J_c'yi artırmak amacıyla üç temel yaklaşım rapor edilmiştir: kimyasal katkılama, yüksek enerjili iyon implantasyonu veya ışınım (irradiation) işlemleri ve tane sınırlarında ortaya çıkan zayıf-bağlantı problemini azaltmayı hedefleyen tekstürleme teknikleri (Porozov vd., 2014). Bununla birlikte basınç uygulaması, diğer yöntemlere kıyasla akı sabitleme ve J_c' nin iyileştirilmesi açısından daha bütüncül avantajlar sunmaktadır. Uygulanan basınç; (i) örgü parametrelerini küçülterek birim hücre hacmini azaltmakta ve anizotropiyi düşürmekte, (ii) T_c, H_{c2} ve H_{irr} değerlerini artırarak etkin süperiletken hacmi genişletmekte, (iii) kusur yoğunluğunu artırarak yeni sabitleme merkezleri oluşturmakta ve (iv) tane bağlantılarını iyileştirerek tane sınırı kaynaklı zayıf-bağlantı sorunlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Sankar vd., 2018).

Bu nedenlerle, Fe-bazlı süperiletkenlerde basıncın akı sabitleme ve kritik akım yoğunluğu üzerindeki etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, manyetik gevşeme (relaxation) olgusu, II. tip süperiletkenlerde girdap çizgilerinin termal aktivasyon etkisiyle zamanla yeniden düzenlenmesini ve buna bağlı olarak manyetik momentin azalmasını ifade etmektedir (Sundar vd., 2019). Süperiletkenlerin teknolojik uygulamalarındaki temel zorluklardan biri, bu manyetik gevşemenin kontrol altına alınması ve J_c'nin kararlı biçimde artırılmasıdır. Her ne kadar hidrostatik basıncın J_c üzerindeki etkileri dikkat çekici olsa da, Fe-bazlı süperiletkenlerde girdap dinamiklerinin ve girdap–kusur etkileşimlerinin basınca verdiği tepkiyi doğrudan ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu noktada manyetik gevşeme ölçümleri, girdap–girdap ve girdap–kusur etkileşimlerini anlamada en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde yer alan bazı örnekler basıncın bu etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Örneğin 1111-fazı ailesine ait $NaFe_{0.97}Co_{0.03}As$ tek kristalinde, hidrostatik basınç altında manyetik alan performansının belirgin biçimde iyileştiği rapor edilmiştir (Sundar vd., 2019). Yüksek manyetik alan altında J_c yaklaşık iki mertebe artış göstermiştir. Atmosfer basıncında 17.95 K olan T_c değeri, P = 1 GPa basınç altında 24.33 K'ye yükselmiş ve basınç katsayısı $dTc/dP \approx 6.36$ K/GPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca tersinmezlik alanının (H_{irr}) basınç altında kayda değer biçimde artması, basıncın noktasal sabitleme merkezlerinin oluşumunu teşvik ettiğini düşündürmektedir. Benzer şekilde 122-fazına ait $(Ba,K)Fe_2As_2$ tek kristallerinde T_c değeri farklı basınçlar altında yaklaşık 37.9 K seviyesinde sabit kalmasına rağmen, düşük sıcaklıkta (4.1 K) uygulanan basınç kritik akım yoğunluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Uygulanan 2 T ve 12 T manyetik alanlarda sırasıyla 5×10^5 A/cm² ve 2×10^5 A/cm² olan Jc değerlerinin, basınç altında yaklaşık 1×10^6 A/cm² ve 5.5×10^5 A/cm² seviyelerine yükseldiği rapor edilmiştir (Shabbir vd., 2016).

Sonuç olarak, Fe-bazlı süperiletkenlerde uygulanan hidrostatik basınç; örgü parametreleri, kusur yapısı ve tane bağlantılarını eşzamanlı olarak düzenleyerek girdapların daha etkin biçimde sabitlenmesini sağlamakta ve bu durum akı sabitlemenin güçlenmesine bağlı olarak kritik akım yoğunluğunda belirgin bir artışa yol açarak basıncı, yüksek alan uygulamaları için stratejik bir kontrol parametresi hâline getirmektedir.

Son dönemde Fe-bazlı süperiletkenlerde vorteks dinamikleri üzerindeki basınç etkisini aydınlatmak amacıyla Wang ve çalışma arkadaşları, $Fe_{1-x}Co_xSe_{0.5}Te_{0.5}$ tek kristallerinde hidrostatik basınç altında manyetik relaksasyonu inceleyen ilk sistematik çalışmayı rapor etmişlerdir (Shabbir vd., 2016). Elde edilen sonuçlar, uygulanan basıncın manyetik relaksasyon oranı S'yi belirgin biçimde bastırdığını ve vorteks demetlerinin karakteristik boyutunu büyük demet (large-bundle) rejiminden küçük demet (small-bundle) rejimine doğru küçülttüğünü ortaya koymuştur. Buna ek olarak, basınç altında vorteks sürünme mekanizmasının elastik sürünmeden plastik sürünmeye doğru bir geçiş sergilediği belirlenmiştir. Bulgular ayrıca, vorteks sürünme (creep) oranının hidrostatik basınç uygulamasıyla birlikte anlamlı ölçüde azaldığını açıkça göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Fe-bazlı süperiletken sistemlerde yüksek basıncın süperiletkenlik özellikleri, kristal yapı, manyetik düzen, akı sabitleme mekanizmaları ve vorteks dinamikleri üzerindeki etkileri literatürde rapor edilen deneysel ve kuramsal çalışmalar ışığında kapsamlı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, basıncın Fe-bazlı süperiletkenlerde yalnızca kritik sıcaklığı (T_c) ayarlayan bir dış parametre olmadığını; aynı zamanda yapısal, elektronik ve manyetik dereceleri eşzamanlı olarak etkileyen çok boyutlu bir kontrol aracı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Farklı kristal fazlara sahip Fe-bazlı süperiletkenlerde (1111, 111, 122 ve 11-fazları) basınca verilen tepkilerin malzemeye özgü olduğu, Tc'nin basınç altında artabildiği, baskılanabildiği ya da kubbe biçimli bir davranış sergileyebildiği görülmüştür. Bu çeşitlilik, süperiletkenliğin yalnızca manyetik düzenin bastırılmasıyla açıklanamayacağını; anyon yüksekliği, Fe–Pn(Ch)–Fe bağ açıları, örgü sıkışması ve bant yapısındaki yeniden düzenlenmeler gibi yapısal parametrelerin belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Özellikle FeSe ve Fe($Se_{1-x}Te_x$) sistemlerinde basınç altında T_c ile anyon yüksekliği arasında gözlenen güçlü korelasyon, bu parametrenin Fe-bazlı süperiletkenlik için evrensel bir ölçek olabileceğine işaret etmektedir.

Bununla birlikte, çalışmada yüksek basıncın yalnızca T_c üzerindeki etkileriyle sınırlı kalmadığı; akı sabitleme (flux pinning) ve kritik akım yoğunluğu (J_c) açısından da son derece önemli sonuçlar doğurduğu ortaya konmuştur. Hidrostatik basınç altında örgü parametrelerinin küçülmesi, kusur yoğunluğunun artması ve tane bağlantılarının iyileşmesi, vortekslerin daha etkin biçimde sabitlenmesine olanak tanımakta ve bu durum J_c' nin önemli ölçüde artmasına yol açmaktadır. Literatürde rapor edilen örnekler, basıncın noktasal sabitleme merkezlerini güçlendirdiğini ve yüksek manyetik alanlar altında dahi akım taşıma kapasitesini belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir.

Ayrıca, manyetik gevşeme ölçümleri ve vorteks dinamikleri üzerine yapılan çalışmalar, basıncın vorteks sürünmesini bastırdığını, vorteks demet boyutlarını küçülttüğünü ve elastik sürünmeden plastik sürünmeye geçişi tetiklediğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, basıncın yalnızca statik süperiletkenlik parametrelerini değil, aynı zamanda vorteks hareketliliğini ve enerji manzarasını da yeniden şekillendirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Fe-bazlı süperiletkenlerde yüksek basınç; yapısal parametreler, manyetik etkileşimler, akı sabitleme mekanizmaları ve vorteks dinamikleri arasında güçlü bir bağ kurarak hem temel süperiletkenlik mekanizmasının anlaşılmasına hem de yüksek alan uygulamalarına yönelik performansın optimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, basınç kontrollü çalışmaların, Fe-bazlı süperiletkenlerin hem temel fiziğinin aydınlatılmasında hem de teknolojik uygulamalar için yeni tasarım

stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaya devam edeceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Athena S. Sefat, 2011. Pressure effects on two superconducting iron-based families, Rep. Prog. Phys. 74 (12) 124502.

Bao, W. et al. 2009. Phys. Rev. Lett. 102**,** 247001.

Chen, X.J., Lin, H.Q., Gong, C.D. 2000. Pressure dependence of Tc in Y-Ba-Cu-O superconductors, Phys. Rev. Lett. 85 (10) 2180.

Chu, C.W. Gao, L., Chen, F., Huang, Z.J., Meng, R.L., Xue, Y.Y. 1993. Superconductivity above 150 K in HgBa2Ca2Cu3O8şd at high pressures, Nature 365 (6444) 323e325.

Diego A. Zocco, Ryan E. Baumbach, James J. Hamlin, Marc Janoschek, Ivy K. Lum, Michael A. McGuire, Athena S. Sefat, Brian C. Sales, Rongying Jin, David Mandrus, 2011. Search for pressure-induced superconductivity in CeFeAsO and CeFePO iron pnictides, Phys. Rev. B 83 (9) 094528.

Fang, M. H., Pham, H. M., Qian, B., Liu, T. J., Vehstedt, E. K., Liu, Y., Spinu, L. and Mao, Z. Q. 2008 Phys. Rev. B 78**,** 224503.

Gresty, N. C. et al. 2009. J. Am. Chem. Soc. 131, 16944.

Han S.H., Almasan, C.C., Lee, B.W., Paulius, L.M., Maple, M.B., Veal, B.W., Downey, J.W., Paulikas, A.P., Fisk, Z., Schirber, J.E.1992. Pressure dependence of Tc and charge transfer in YBa2Cu3Ox (6.35_ x_ 7) single crystals, Phys. Rev. Lett. 69 (4) (1992) 680.

Horigane K, Takeshita N, Lee C H, Hiraka H and Yamada K 2009 *J. Phys. Soc. Japan* **78** 063705

Huang, H., Jang, H., Fujita, M., Nishizaki, T., Lin, Y., Wang, J., Ying, J., Smith, J.S., Kenney-Benson, C., Shen, G.2018. Modification of structural disorder by hydrostatic pressure in the superconducting cuprate YBa2Cu3O6.73, Phys. Rev. B 97 (17) 174508.

Iida, K., H€anisch, J., Tarantini, C.2018. Fe-based superconducting thin films on metallic substrates: growth, characteristics, and relevant properties, Appl. Phys. Rev. 5 (3) 031304.

Johnson P.D., Xu, G., Yin, W.-G. 2015. Iron-Based Superconductors. Springer International Publishing Switzerland, 436p.

Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M. Hosono, H. 2008. Iron-based layered superconductor La[O1-xFx]FeAs (x ¼ 0.05-0.12) with Tc ¼ 26 K, J. Am. Chem. Soc. 130 (11) 3296e3297.

Lee, C.-H., Iyo, A., Eisaki, H., Kito, H., Fernandez-Diaz, M.T., Ito, T., Kihou, K., Matsuhata, H., Braden, M., Yamada, K. 2008. Effect of structural parameters on superconductivity in fluorine-free LnFeAsO1-y (Ln¼ La, Nd), J. Phys. Soc. Jpn. 77 (8) 083704.

Li, S. et al. 2009. Phys. Rev. B 79, 054503.

Liu, Q. Yu, X. Wang, X. Deng, Z. Lv, Y. Zhu, J. Zhang, S. Liu, H. Yang, W. L.2011. Wang, Pressureinduced isostructural phase transition and correlation of FeAs coordination with the superconducting properties of 111-type Na1ex FeAs, J. Am. Chem. Soc. 133 (20) 7892e7896.

Mao, H.-K., Chen, X.-J., Ding, Y., Li, B., Wang, L. 2018. Solids, liquids, and gases under high pressure, Rev. Mod. Phys. 90 (1) (2018): 015007.

Margadonna, S., Takabayashi, Y., Ohishi, Y., Mizuguchi, Y., Takano, Y., Kagayama, T., Nakagawa, T., Takata, M. and Prassides, K. 2009. Phys. Rev. B 80 064506

Masaki, S., Kotegawa, H., Hara, Y., Tou, H., Murata, K., Mizuguchi, Y. and Takano, Y. 2009. J. Phys. Soc. Japan 78, 063704.

Medvedev, S, McQueen, T. M., Trojan, I., Palasyuk, T., Eremets, M. I., Cava, R. J., Naghavi, S., Casper, F., Ksenofontov, V., Wortmann, G. and Felser, C. 2009. Nature Mater. 8 630

Mito, M., Goto, H., Matsui, H., Deguchi, H., Matsumoto, K., Hara, H., Ozaki, T., Takeya, H., Takano, Y. 2016. Uniaxial strain effects on superconducting transition in Y0.98Ca0. 02Ba2Cu4O8, J. Phys. Soc. Jpn. 85 (2) 024711.

Mito, M., Ogata, K., Goto, H., Tsuruta, K., Nakamura, K., Deguchi, H., Horide, T., Matsumoto, K., Tajiri, T., Hara, H. 2017. Uniaxial strain effects on the superconducting transition in Redoped Hg-1223 cuprate superconductors, Phys. Rev. B 95 (6) 064503.

Mizuguchi, Y., Hara, Y., Deguchi, K., Tsuda, S., Yamaguchi, T., Takeda, K., Kotegawa, H., Tou, H., Takano, Y. 2010. Technology, Anion height dependence of Tc for the Fe-based superconductor, Supercond. Sci. Technol. 23 (5) 054013.

Mizuguchi, Y., Tomioka, F., Tsuda, S., Yamaguchi, T. and Takano ,Y. 2008. Appl. Phys. Lett. 93 152505

Murayama, C., Iye, Y., Enomoto, T., Mori, N., Yamada, Y., Matsumoto, T., Kubo, Y., Shimakawa, Y., Manako, T. 1991. Correlation between the pressure-induced changes in the Hall coefficient and Tc in superconducting cuprates, Phys. C Supercond. 183 (4e6) (1991) 277e285.

Neumeier, J.J., Zimmermann, H.A.,1993. Pressure dependence of the superconducting transition temperature of YBa2Cu3O7 as a function of carrier concentration: a test for a simple charge-transfer model, Phys. Rev. B 47 (13) 8385.

Okada, H., Igawa, K., Takahashi, H., Kamihara, Y., Hirano, M., Hosono, H., Matsubayashi, K., Uwatoko, Y. 2008. Superconductivity under high pressure in LaFeAsO, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (11) 113712.

Okada, H., Takahashi, H., Mizuguchi, Y., Takano, Y. and Takahashi, H. 2009. J. Phys. Soc. Japan 78, 083709

Patricia L. Alireza, YT Chris Ko, Jack Gillett, Chiara M. Petrone, Jacqueline M. Cole, Gilbert G. Lonzarich, Suchitra E Sebastian. 2008. Superconductivity up to 29 K in SrFe2As2 and BaFe2As2 at high pressures, J. Phys. Condens. Matter 21 (1) 012208.

Prozorov, R., Ko_nczykowski, M., Tanatar, M. A., Thaler, A., Bud'ko, S. L., Canfield, P. C., Mishra, V., Hirschfeld, P.J. 2014. Effect of electron irradiation on superconductivity in single crystals of Ba (Fe 1_ x Ru x) 2 as 2 (x¼0.24), Phys. Rev. X 4 (4) 041032.

Qiu, W., Ma, Z., Liu, Y., Al Hossain, M. S., Wang, X., Cai, C., Dou, S.X. 2016. Tuning superconductivity in FeSe thin films via magnesium doping, ACS Appl. Mater. Interfaces 8 (12) 7891e7896.

Ren, Z.-A., Zhao, Z.-X. 2009.Research and prospects of iron-based superconductors, Adv. Mater. 21 (45) 4584e4592

Richter, S. Fritz, K. Iida, K. Pervakov, K. Pukenas, A. Tarantini, C. Jan, J., Jens, H., Grinenko, V., Werner, S. 2017. Superconducting properties of Ba (Fe1exNix)2As2 thin films in high magnetic fields, Appl. Phys. Lett. 110 (2), 022601.

Sang, L.N., Li, Z., Yang, G.S., Yue, Z.J., Liu, J.X., Cai, C.B., Wu, T., Dou, S.X., Ma, Y.W., Wang, X.L. 2021. Pressure effects on iron-based superconductor families: Superconductivity, flux pinning and vortex Dynamics. Materials Today Physics 19, 100414

Sankar, R., Peramaiyan, G., Muthuselvam, I. P., Wen, C.-Y., Xu, X., Chou, F.C. 2018. Superconductivity in a misfit layered (SnS)1.15 (TaS2) compound, Chem. Mater. 30 (4) 1373e1378.

Schilling, J.S. 1998. J. Phys. Chem. Solids 59, 553.

Schilling, J.S. 2000. Hyperfine Interact. 128, 3.

Shabbir, B., Wang, X., Ma, Y., Dou, S.X., Yan, S.S., Mei, L.M. 216. Study of flux pinning mechanism under hydrostatic pressure in optimally doped (Ba,K)Fe2As2single crystals, Sci. Rep. 6, 23044.

Sizoo G.J. and Onnes, H.K. 1925. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, No. 180b.

Souliou, S.M., Subedi, A., Song, Y.T., Lin, C.T., Syassen, K., Keimer, B., Le Tacon ,M. 2014. Pressure-induced phase transition and superconductivity in YBa2Cu4O8, Phys. Rev. B 90 (14) 140501.

Sundar, S., Salem-Sugui S., Lovell, E., Alexander, V., Cohen, L. F., Gong, D., Zhang, R., Lu, X., Luo, H., Ghivelder, L. 2019. Doping dependence of the second magnetization peak, critical current density, and pinning mechanism in BaFe2exNixAs2 pnictide superconductors, ACS Applied Electronic Materials 1 (2)179e188.

Takahashi, H., Igawa, K., Arii, K., Kamihara, Y., Hirano, M., Hosono, H. 2008. Superconductivity at 43 K in an iron-based layered compound Lao1-xFxFeAs, Nature 453 (7193) (2008) 376.

Takahashi, H., Okada, H., Igawa, K., Kamihara, Y., Hirano, M., Hosono, H., Matsubayashi, K., Uwatoko, Y. 2009. High-pressure studies on superconductivity in LaFeAsO1_xFx and SmFeAsO1_xFx, J. Supercond. Nov. Magnetism 22 (6)595e598.

Takahashi, H., Soeda, H., Nukii, M., Kawashima, C., Nakanishi, T., Iimura, S., Muraba, Y., Matsuishi,S., Hosono, H. 2015. Superconductivity at 52 K in hydrogen-substituted LaFeAsO1-xHx under high pressure, Sci. Rep. 5 (2015) 7829.

Takeshita, N., Iyo, A., Eisaki, H., Kito, H., Ito, T. 2008. Remarkable suppression of TC by pressure in NdFeAsO1_ y (y¼ 0.4), J. Phys. Soc. Jpn. 77 (7) (2008) 75003, 075003.

Wang, A., Petrovic, C.2017. Vortex pinning and irreversibility fields in FeS1-exSex (x¼ 0, 0.06), Appl. Phys. Lett. 110 (23) 232601.

Wang, X.C. Zhang, S.J. Liu, Q.Q. Deng, Z. Lv, Y.X. Zhu, J.L. Feng, S.M. Jin, C.Q. 2011. Effect of pressure on a “111”-type iron pnictide superconductor, High Pres. Res. 31 (1) 7e12.

Zocco, D.A., Hamlin, J.J., Baumbach, R.E., Maple, M.B., McGuire, M.A., Sefat, A.S., Sales, B.C., Jin, R., Mandrus, D., Jeffries, J.R., Weir, S.T., Vohra, Y.K.

2008. Effect of pressure on the superconducting critical temperature of La[O0. 89F0. 11] FeAs and Ce[O0. 88F0. 12]FeAs, Physica C 468 (21) 2229e2232.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Yığma Yapılarda Gözlenen Hasar Mekanizmalarının Saha İncelemesi

Muhammet ÇINAR[1]

1- Doç. Dr. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. muhammetcinar@ksu.edu.tr ORCID No:0000-0001-5475-7787

ÖZET

Türkiye, aktif fay hatları üzerinde yer alması nedeniyle yüksek deprem riski taşıyan ülkeler arasında bulunmaktadır. Özellikle mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yığma yapılar, deprem etkileri altında en fazla hasar alan yapı türlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğündeki depremler, Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde yoğun hasara yol açmış; yığma yapıların deprem performansına ilişkin önemli veriler sunmuştur. Bu çalışma kapsamında, söz konusu depremler sonrasında Kahramanmaraş ve Adıyaman merkez ilçelerinde bulunan toplam 30 adet yığma briket yapı yerinde incelenmiş ve oluşan yapısal hasarlar değerlendirilmiştir.

Yapılan saha gözlemleri sonucunda, yığma yapılarda en yaygın hasar türlerinin taşıyıcı duvarlarda meydana gelen düzlem içi kesme ve diyagonal çekme çatlakları ile düzlem dışı duvar devrilmeleri olduğu belirlenmiştir. Hasarların oluşumunda; yatay ve düşey hatıl eksikliği, duvar–duvar ve duvar–çatı bağlantılarının yetersizliği, uzun ve desteklenmemiş duvarlar, uygun olmayan kapı ve pencere boşlukları ile köşe birleşimlerindeki yapım hatalarının belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kötü işçilik, düşük dayanımlı harç kullanımı ve farklı yapı malzemelerinin aynı yapıda birlikte kullanılması, yapısal sürekliliği bozarak hasar seviyesini artırmıştır.

Elde edilen bulgular, incelenen yığma yapıların büyük bir bölümünün Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) hükümlerine uygun olmadığını ortaya koymuştur. (TBDY, 2018:416) Çalışma sonucunda, yığma yapılarda deprem kaynaklı hasarların azaltılabilmesi için mühendislik esaslarına dayalı tasarım ve uygulamaların zorunlu olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Kahramanmaraş Depremleri, Yığma Briket Yapılar, Deprem Hasarları, Saha Gözlemleri, Düzlem İçi Ve Düzlem Dışı Duvar Davranışı.

GİRİŞ

Türkiye, jeolojik açıdan dünyanın en aktif deprem kuşaklarından birinde yer almakta ve bu nedenle deprem riski açısından oldukça yüksek bir ülkedir. Ülke, Avrasya, Afrika ve Arabistan levhalarının kesişim bölgesinde bulunmakta olup, bu levhaların birbirlerine göre hareketleri, bölgede sürekli gerilme ve sıkışma oluşturmaktadır (AFAD, 2023:140). Bu durum, Türkiye'deki birçok fay hattının aktif olmasına ve zaman zaman yıkıcı depremlere neden olmaktadır.

Ülke genelinde deprem riski, deprem bölgeleri ve aktif fay hatları dikkate alınarak belirlenmiştir. Türkiye'deki en önemli fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fayı, Marmara'dan başlayarak Doğu Anadolu'ya kadar

uzanmakta ve özellikle Marmara Bölgesi'ni etkileyen büyük depremler üretmektedir. Ayrıca Doğu Anadolu Fayı ve Ege Bölgesi'ndeki normal faylar, ülkenin farklı kesimlerinde orta ve büyük ölçekli depremlere yol açmaktadır (Musa, 2004:821; Muhammet, 2024:538). Bu fay hatlarının konumu, Türkiye'deki depremlerin çoğunlukla yüzey kırılma depremi türünde olmasına ve hasar potansiyelinin yüksek olmasına yol açmaktadır.

Tarihsel ve güncel veriler, Türkiye'nin deprem açısından ne kadar hassas bir bölgede yer aldığını ortaya koymaktadır. Örneğin, Erzincan 1939 depremi (Mw 7.9), İzmit 1999 depremi (Mw 7.4) ve Van 2011 depremi (Mw 7.2) ülke genelinde büyük can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Ayrıca, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş merkezli olarak meydana gelen 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremler, güneydoğu ve doğu bölgelerinde yıkıcı etkiler oluşturmuş, on binlerce can kaybına ve ciddi altyapı zararına sebep olmuştur. Bu olay, Türkiye'nin aktif fay hatlarının ve deprem riskinin günümüzde de devam ettiğinin somut bir göstergesidir (AFAD, 2023:140).

Bu veriler, Türkiye'de yapı güvenliği ve deprem yönetmeliklerine uygun inşaat uygulamalarının önemini ortaya koymaktadır. Deprem riski, özellikle yığma, betonarme ve çelik yapılarda taşıyıcı sistem tasarımı ve malzeme seçimi açısından kritik bir parametredir. Kahramanmaraş depremi, mevcut yapı stokundaki zayıflıkları ve inşaat standartlarının önemini bir kez daha gözler önüne sermiştir.

Yapılan saha gözlemleri ve analitik çalışmalar, yığma yapıların deprem etkisi altında en kırılgan yapı türlerinden biri olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle mühendislik hizmeti almadan, geleneksel yöntemlerle inşa edilen yığma yapılarda taşıyıcı sistemin deprem yüklerini karşılayacak yeterli süneklik ve dayanım kapasitesine sahip olmadığı belirtilmektedir. Literatürde yapılmış bazı çalışmalar aşağıda gösterilmiştir.

Reşat (2017:296) çalışmasında, 2011 Van depremleri sonrasında yapılan saha incelemelerinde, yığma yapıların büyük bölümünün ağır ve orta düzeyde hasar aldığını ortaya koymuştur. Gözlemlenen hasarlar ağırlıklı olarak düzlem içi kesme çatlakları, köşe ayrılmaları ve düzlem dışı duvar göçmeleri şeklinde meydana gelmiştir. Bu hasarların temel nedenleri arasında düşük malzeme dayanımı, yetersiz işçilik kalitesi ve yapı elemanları arasındaki bağlantı eksiklikleri yer almaktadır. Ayrıca mevcut deprem yönetmeliklerinin gereklerinin uygulanmaması, yığma yapıların deprem performansını olumsuz yönde etkileyen önemli bir faktör olarak öne çıktığını belirtmiştir.

Varol (2016:36) çalışmasında deprem sonrası hasar tespit çalışmalarında yığma yapılarda görülen hasar türlerinin, yapı geometrisi ve taşıyıcı sistem düzensizlikleri ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmektedir. Özellikle açıklık oranı yüksek duvarlarda, yeterli bağ kirişleri ve hatılların bulunmaması durumunda, duvarların düzlem dışı davranışlarının belirleyici olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür yapılarda çatlakların çoğunlukla pencere ve kapı köşelerinde yoğunlaştığı ve zamanla göçmeye dönüştüğü ifade

edilmektedir. Ayrıca, ağır çatı sistemleri ve toprak dam uygulamaları, deprem sırasında yapıya etkiyen atalet kuvvetlerini artırarak hasar seviyesini yükseltmektedir. Bu durumun, geleneksel yığma yapı tekniklerinin deprem etkileri karşısında yetersiz kaldığını gösterdiğini belirtmiştir.

Melek ve Orhan (2020:265) çalışmasında, yığma yapılarda meydana gelen hasarların önemli bir bölümünün, yapı-zemin etkileşiminin göz ardı edilmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde inşa edilen yığma yapıların, deprem sırasında farklı oturmalara maruz kaldığı ve bunun sonucunda duvarlarda geniş çatlakların oluştuğunu belirlemişlerdir. Saha gözlemlerinde, özellikle köşe birleşimlerinde ve temel-duvar ara yüzlerinde ayrılmaların yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, duvar kalınlıklarının yetersiz olması ve taşıyıcı duvar sürekliliğinin sağlanamaması, yapısal bütünlüğü zayıflattığını tespit etmişlerdir. Bu tür yapısal eksiklikler, yığma yapıların deprem dayanımını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Erkan vd. (2013:2287), 2011 Van depremi sonrasında yaptıkları değerlendirmelerde, yığma yapılarda yaygın olarak yatay ve düşey hatıl eksikliğinin bulunduğunu rapor etmiştir. Hatıl kullanılmayan yapılarda, duvarların deprem yükleri altında birlikte çalışamadığı ve bu durumun düzlem içi ve düzlem dışı göçmelere neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca köşe birleşimlerinde yeterli kenetleme yapılmaması, duvar ayrışmalarını hızlandıran önemli bir yapım hatası olarak tanımlanmıştır. Çalışmada, özellikle kırsal alanlardaki yığma yapıların bu tür yapısal eksiklikler nedeniyle ağır hasar gördüğü belirtilmiştir

Fatih vd. (2024:2953), 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yaptıkları kapsamlı saha incelemelerinde, yığma yapılardaki hasarların büyük ölçüde mühendislik hizmeti eksikliğinden kaynaklandığını belirtmiştir. Çalışmada, taşıyıcı duvarlarda kullanılan taş ve tuğlaların düşük dayanımlı olduğu, bağlayıcı harçların ise yetersiz mekanik özelliklere sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, deprem sırasında duvarlarda yaygın kesme çatlakları, köşe ayrışmaları ve kısmi ya da tam göçmelere neden olmuştur. Ayrıca taşıyıcı duvar süreksizlikleri ve düzensiz plan geometrisi, yığma yapıların deprem etkisi altında bütüncül davranmasını engelleyen başlıca hatalar arasında gösterilmiştir.

Rabia vd. (2024:108904), Kahramanmaraş ilinde bulunan yığma yapıların deprem performansını sayısal analizlerle değerlendirmiş ve özellikle kapı ile pencere boşlukları çevresindeki yapım hatalarına dikkat çekmiştir. Çalışmada, açıklık oranlarının kontrolsüz biçimde artırılması sonucu duvar kesitlerinin zayıfladığı ve bu bölgelerde X-şeklinde kesme çatlaklarının hızla geliştiği belirtilmiştir. Ayrıca duvar–duvar ve duvar–döşeme bağlantılarının yetersiz olması, düzlem dışı göçme riskini önemli ölçüde artırmıştır. Yığma duvarların düşük çekme ve kesme dayanımı nedeniyle sünek davranış gösterememesi, ani ve gevrek hasar mekanizmalarının oluşmasına yol açmıştır

Alper vd. (2024:697) çalışmasında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde bulunan yığma yapıların hasar mekanizmaları değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde, yığma yapıların özellikle düşey ve yatay hatıl eksikliği, yetersiz duvar bağlantıları ve büyük açıklık oranları nedeniyle ciddi hasar gördüğünü ortaya koymuştur. Yığma binaların düzlem dışı hasar mekanizmalarına karşı oldukça savunmasız olduğu ve bu hasarların çoğunlukla uzun ve desteksiz duvarlardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Ayrıca, taşıyıcı duvarlarda oluşan düzlem içi hasarların, azalan yanal rijitlik ve artan kesme kuvvetleriyle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

İncelenen çalışmalarda, yığma yapıların depremler karşısında betonarme yapılara kıyasla çok daha kırılgan bir davranış sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle mühendislik hizmeti almadan inşa edilen, düşük malzeme kalitesine sahip ve düzensiz planlı yığma yapılarda ağır hasar ve göçme oranlarının oldukça yüksek olduğu rapor edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde bulunan yığma yapıların deprem etkisi altında oluşana yapısal hasarlar belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmelerle, yığma yapılarda gözlenen hasarların başlıca nedenlerinin ortaya konulmuş ve bu hasarların azaltılabilmesi için uygulanması gereken temel yapısal ve teknik önlemler belirtilmiştir.

YAPI ÇEŞİTLERİ

İnsanoğlu, barınma ihtiyacını karşılamak amacıyla tarih boyunca çeşitli yapılar inşa etmiştir. İlk çağlarda yapılan yapılar, insanların çevreden kolayca temin edebildiği doğal malzemeler kullanılarak ve basit yapım yöntemleriyle oluşturulmuştur. Zamanla nüfusun artması, yerleşik hayata geçilmesi ve toplumların gelişmesiyle birlikte yapı ihtiyacı artmış, buna bağlı olarak yapı teknolojileri de gelişim göstermiştir. Ayrıca deprem, sel, yangın gibi doğal afetler ile savaşlar ve dış tehditler, yapıların daha dayanıklı, güvenli ve uzun ömürlü olmasını gerekli kılmıştır.

İnşaat mühendisliği alanında yapılar, taşıyıcı sistem özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre yapılar genel olarak ahşap yapılar, yığma (kâgir) yapılar, çelik yapılar, prefabrik yapılar ve betonarme yapılar olmak üzere beş ana grupta incelenmektedir. Her yapı türü, kullanılan malzemeler, taşıma kapasitesi ve yapım tekniği açısından birbirinden farklı özellikler taşımaktadır.

Ahşap yapılar, hafif olmaları ve yapım kolaylığı sağlamaları nedeniyle özellikle düşük katlı yapılarda tercih edilmektedir. Bununla birlikte, yangına karşı duyarlılıkları ve düzenli bakım gereksinimleri bu yapı türünün kullanım alanını sınırlandırmaktadır.

Yığma (kâgir) yapılar, taş, tuğla veya briket gibi birim elemanların harç yardımıyla birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Basınç dayanımları yüksek olmakla birlikte çekme ve kesme dayanımlarının düşük olması, bu yapıların özellikle deprem etkileri altında sınırlı performans göstermesine neden olmaktadır.

Çelik yapılar, yüksek dayanım ve süneklik özellikleri sayesinde büyük açıklıklı ve çok katlı yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Deprem yükleri altında avantajlı davranış sergilemelerine rağmen, korozyon ve yangın etkilerine karşı koruyucu önlemler alınması gerekmektedir.

Prefabrik yapılar, yapı elemanlarının fabrika ortamında üretilerek şantiyede birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu tür yapılar, kısa yapım süresi ve kalite kontrol açısından önemli avantajlar sunarken, taşıma ve montaj aşamalarında dikkatli planlama gerektirmektedir.

Betonarme yapılar ise betonun basınç dayanımı ile donatının çekme dayanımının birlikte kullanılması prensibine dayanmaktadır. Günümüzde konut, ticari ve kamu yapılarında en yaygın kullanılan yapı türü olup, uygun tasarım ve doğru uygulama ile yüksek dayanım, güvenlik ve uzun hizmet ömrü sağlamaktadır.

Yığma (Kagir) Yapılar

Yığma (kâgir) yapılar, insanlık tarihindeki en eski yapı türlerinden biri olup günümüzde de özellikle kırsal alanlarda ve düşük katlı konutlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılarda taşıyıcı sistem, kolon ve kirişlerden oluşmaz; bunun yerine taşıyıcı duvarlar temel taşıyıcı elemanlardır. Yapıdan gelen düşey ve yatay yükler, duvarlar aracılığıyla temele ve daha sonra zemine aktarılmaktadır. Bu nedenle yığma yapılarda duvarların kalınlığı, düzeni ve malzeme özellikleri büyük önem taşımaktadır.

Yığma (kâgir) yapılar, kullanılan duvar malzemesine göre günümüzde dört temel gruba ayrılmaktadır. Bunlar taş duvarlı, kerpiç duvarlı, tuğla duvarlı ve blok duvarlı yığma yapılardır. Taş duvarlı yığma yapılar kendi içerisinde moloz taş duvarlı ve kesme taş duvarlı olmak üzere iki alt grupta incelenmektedir. Moloz taş duvarlı yapılarda taşlar doğal hâlleriyle, herhangi bir şekil verme işlemine tabi tutulmadan kullanılırken; kesme taş duvarlı yapılarda taşlar belirli ölçülerde kesilerek daha düzgün ve estetik duvarlar elde edilmektedir.

Kerpiç duvarlı yığma yapılar, toprak esaslı kerpiç çamurunun kalıplara dökülmesi ve güneşte kurutulmasıyla üretilmektedir. Bu yapı türü, maliyetinin düşük olması nedeniyle geçmişte yaygın olarak kullanılmıştır; ancak suya karşı hassas olması ve dayanımının düşük olması önemli dezavantajlarıdır. Tuğla duvarlı yığma yapılar ise toprak esaslı tuğlaların

fırınlarda pişirilmesiyle elde edilir. Pişirme işlemi sayesinde tuğlalar daha dayanıklı hâle gelir ve yığma yapılarda güvenli bir taşıyıcı duvar malzemesi olarak kullanılır.

Blok duvarlı yığma yapılarda briket, gaz beton ve bims blok gibi fabrikada üretilen yapı elemanları kullanılmaktadır. Bu malzemeler, hafif olmaları, ısı ve ses yalıtımı sağlamaları ve uygulama kolaylığı sunmaları nedeniyle günümüzde yığma yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

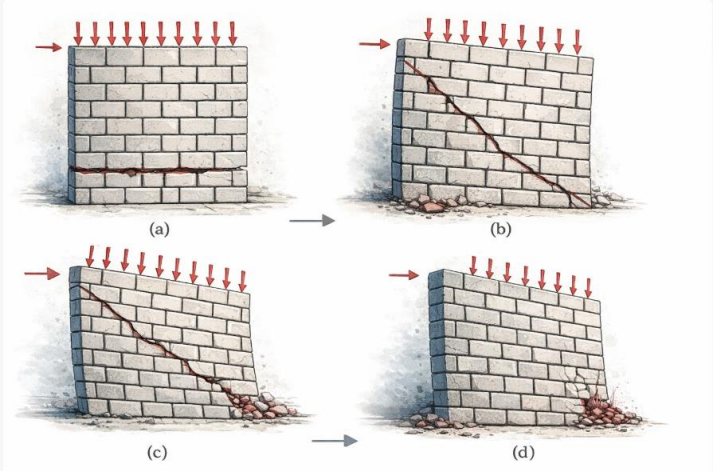
Yığma (Kagir) Yapılarda Meydana Gelen Deprem Hasar Tipleri

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremleri sonrasında Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde depremden etkilenen yığma yapıların hasar türleri ve bu hasarların oluşum nedenleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, Kahramanmaraş ve Adıyaman merkez ilçelerinde bulunan toplam 30 adet briket yığma yapı yerinde incelenmiş ve yapıların deprem sonrası hasar durumları detaylı olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan saha gözlemleri sonucunda, yığma briket yapılarda en yaygın hasar mekanizmalarının düzlem içi davranışa bağlı kesme ve diyagonal çatlaklar ile düzlem dışı davranışa bağlı duvar devrilmeleri olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çatı ile duvarlar arasındaki yetersiz bağlantılar, uygun olmayan pencere ve kapı boşlukları ile köşe birleşimlerindeki zayıflıkların hasar seviyesini artırdığı tespit edilmiştir. İncelenen yapılarda, kötü işçilik ve farklı yapı malzemelerinin birlikte kullanılması nedeniyle yapısal sürekliliğin bozulduğu ve bu durumun deprem performansını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, hatılsız inşa edilen kalkan duvarların deprem sırasında ciddi riskler oluşturduğu ve can güvenliği açısından tehlike arz ettiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, mevcut yığma yapıların önemli bir bölümünün depreme dayanıklı yapı tasarım ilkelerine uygun olmadığını ortaya koymuş; yığma yapılarda hasarların azaltılabilmesi için uygun detaylandırma, kaliteli işçilik ve yürürlükteki deprem yönetmeliklerine uyulmasının zorunlu olduğunu göstermiştir.

Düzlem İçi Duvar Hasarları

Deprem etkisi altında taşıyıcı yığma duvarlarda, düzlem içi davranışa bağlı olarak üç temel hasar türü meydana gelmektedir: kesme hasarı, çekme hasarı ve eğilme hasarı. Bu hasar türleri, duvarın malzeme özelliklerine, duvar geometrisine, yükleme yönüne ve uygulanan deprem ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkar. Kesme hasarı (Şekil 1-a), genellikle yatay yüklerin etkisiyle duvarın köşe bölgelerinde ya da derz hatlarında meydana gelen yatay yada eğik çatlaklarla karakterizedir. Çekme hasarı (Şekil 1-b), duvarın zayıf harç bölgelerinde ya da tuğla–harç ara yüzeylerinde, genellikle düşey veya yatay yada çapraz şekilde çatlaklar şeklinde gözlenir. Eğilme hasarı ise deprem sırasında duvarın uç bölgelerinde çekme gerilmelerinin artması sonucu oluşur. Bu durumda,

duvarda devrilme (Şekil 1-c) ve tabanda ezilme hasarları (Şekil 1-d) meydana gelir. Şekil 1'de, taşıyıcı yığma duvarlarda deprem etkisi altında oluşabilecek bu hasar türleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1: Düzlem içi deprem hasarları (a) Kesme hasarı, (b) Diyagonal çekme hasarı, (c) Devrilme ve (d) Tabanda ezilme hasarı (Oyguç, 2017:296)

Şekil 2'de deprem sebebi ile oluşmuş düzlem içi duvar hasarları gösterilmiştir. Şekil 2-a ve b 'de kesme hasarı, c ve d'de diyagonal çekme hasarı, e'de devrilme hasarı, f ve g'de tabanda ezilme hasarları gösterilmiştir.



Şekil 2:Düzlem İçi Duvar Hasarları

Düzlem Dışı Duvar Hasarları

Deprem kuvvetlerinin yığma duvarlara düzlem dışı doğrultuda etki etmesi durumunda, taşıyıcı yığma duvarlar zayıf bir davranış sergiler. Bu durumda duvarlar, deprem kuvvetlerinin etkisiyle dışa doğru kesme ve eğilme davranışı gösterir. Oluşan bu etkiler sonucunda, duvar yüzeyinde düzlem dışı hasarlar meydana gelir.

Düzlem dışı hasarların temel nedeni, genellikle mesnetlenmemiş uzun duvarların bulunmasıdır. Bu tür duvarlar, yeterli yatay veya düşey hatıl elemanlarıyla desteklenmediklerinde deprem yükleri altında dışa doğru devrilme veya ayrılma eğilimi gösterirler.

Bu hasarların önlenmesi amacıyla TBDY (2018:416) kapsamında belirli geometrik sınırlamalar getirilmiştir. Yönetmeliğe göre: Binanın uzunluğu boyunca düşey hatıllar belirli aralıklarla yerleştirilmelidir. Düşey hatıllar arası yatay mesafe 4 metreden fazla olmamalıdır. Binanın toplam uzunluğu ise 16 metreyi geçmemelidir. (TBDY, 2018:416) Bu düzenlemeler, duvarların deprem yükleri altında daha dengeli davranmasını, dolayısıyla taşıyıcı sistemin bütünlüğünün korunmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

TBDY (2018:416) yönetmeliğine göre, donatısız ve kuşatılmış yığma binalarda taşıyıcı duvar uzunlukları için belirlenen sınırlar şunlardır: Birinci ve ikinci derece deprem bölgeleri (DTS 1, 1a, 2, 2a): Desteklenmemiş duvar uzunluğu en fazla 5,5 metre olmalıdır. Üçüncü ve dördüncü derece deprem bölgeleri (DTS 3, 3a, 4, 4a): Desteklenmemiş duvar uzunluğu en fazla 7,5 metre olmalıdır. Bu sınırlamalar, yığma duvarların düzlem dışı deprem etkileri altında devrilme veya göçme riskini azaltmak ve duvar rijitliğini artırmak amacıyla getirilmiştir.

Kahramanmaraş depremleri sonrasında, yığma briket duvarlarda çeşitli düzlem dışı hasar türleri gözlemlenmiştir. Bu hasarlar; tek doğrultuda devrilme, köşe bölgelerinde iki doğrultuda devrilme, kısmi kopma (ayrılma) davranışı şeklinde meydana gelmiştir. Bu tür hasarlar, deprem etkisi altında duvarların yatay yükleri karşılayacak yeterli rijitliğe ve bağlantı bütünlüğüne sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3'te, bu hasar türleri sırasıyla görsel olarak sunulmuştur. Şekil 3-a ve b' tek doğrultuda düzlem dışı devrilme, c ve d'de iki doğrultuda düzlem dışı devrilme, e ve f'de kısmi kopma hasarı görselleri gösterilmiştir.



Şekil 3: Düzlem Dışı Duvar Hasarları

Çatı ile Duvarlar Arasındaki Yetersiz Bağlantı Hasarı

Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan saha gözlemlerinde, birçok yığma briket yapıda çatı ve duvar arasındaki bağlantı detaylarının yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Özellikle çatının ağırlığının doğrudan taşıyıcı duvar üzerine aktarılması ve hatıl elemanlarının (kuşatma kirişlerinin) kullanılmaması, bu yapılarda önemli düzeyde yapısal hasarlara neden olmuştur. Bu durum, duvarların deprem sırasında düzlem dışı yönde devrilmesine, çatının duvardan ayrılmasına ve bazı durumlarda kısmi göçmelere yol açmıştır.

Şekil 4-a-b-c'de, çatı ve duvar arasındaki bağlantı eksikliklerinden kaynaklanan hasarlar gösterilmiştir



Şekil 4: Çatı ile Duvar Arasında Yetersiz Bağlantı Hasarları

Uygun Olmayan Pencere ve Kapı Boşlukları Sebebi ile Oluşan Hasarlar

Yığma duvarlarda yer alan boşluk alanlarının (kapı ve pencere açıklıkları) boyutlarının yetersiz veya uygunsuz şekilde düzenlenmesi, deprem sırasında yapılarda ciddi hasarların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, yönetmeliklerde açıklıkların en küçük olması gereken uzunlukları tanımlanmış ve bu sınırlar, deprem tehlike sınıflarına göre ayrı olarak belirlenmiştir.

TBDY (2018:416) yönetmeliğine göre, yığma yapılarda taşıyıcı duvarlardaki kapı ve pencere boşluklarının düzenlenmesi, duvar bütünlüğünün ve deprem güvenliğinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Yönetmelikte, desteklenmemiş duvar uzunluğu içinde yer alan açıklıkların toplam uzunluğunun, duvar uzunluğunun %40'ını geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca pencere ve kapı açıklıkları en fazla 3 metre olmalı; pencere ile kenar köşe arasındaki mesafe, yüksek deprem tehlikesine sahip bölgelerde en az 1,5 metre, diğer bölgelerde ise en az 1,0 metre olmalıdır. Kapı ile pencere arasındaki duvar uzunluğu sırasıyla en az 1,0 metre ve 0,8 metre, kapı ile kenar köşe arasındaki mesafe ise en az 0,5 metre olarak sınırlandırılmıştır. (TBDY, 2018:416) Bu düzenlemeler, deprem etkisi altında yığma duvarların rijitliğini artırarak çatlak oluşumunu ve olası göçme risklerini azaltmayı hedeflemektedir.

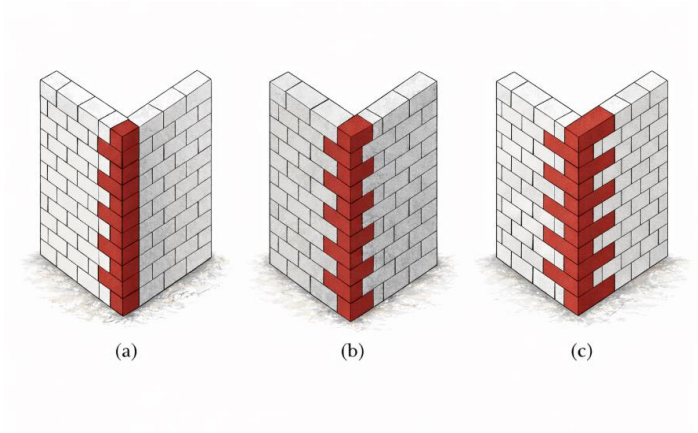
Deprem bölgesinde yönetmeliğe uygun olmayan ve hatalı yapılmış açıklıklardan dolayı oluşan hasarlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5-a ve b'de pencere ile kenar köşe arasındaki mesafenin 1.5m küçük olması ve c ve d'de pencere ve kapı arasındaki duvar uzunluğu 1m küçük olmasından dolayı bu hasarlar oluşmuştur.



Şekil 5: Uygun Olmayan Pencere ve Kapı Boşlukları Sebebi ile Oluşan Hasarlar

Köşe Birleşim Hasarları

Yığma duvarlı taşıyıcı sisteme sahip yapılarda, köşe noktalarında birbirine dik olarak bağlanan duvarlar arasında yeterli mesnetleme yapılmaması veya kilit taşı kullanılmaması nedeniyle çeşitli yapısal hasarların meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tür hatalı uygulamalar, duvar köşelerinde bütünlüğün bozulmasına ve deprem etkisi altında ayrılma veya devrilme davranışlarının oluşmasına yol açmaktadır. Şekil 6'da, köşe bölgelerinde gözlemlenen hatalı imalat örnekleri ile doğru olması gereken imalat detayları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6: Köşe detayları: (a) Kilit taşı eksikliği, (b) Yetersiz mesnetlendirme, (c) Yeterli bir birleşim (Oyguç, 2017:296)

Şekil 7'de kilit taşı eksikliği ve yetersiz mesnetleme sebebi ile depremde hasar alan yapılar gösterilmiştir.



Şekil 7:Köşe Birleşim Hasarları

Kötü İşçilik, Farklı Yapı Malzemelerinin Birlikte Kullanılması Kaynaklı Hasarlar

Kırsal bölgelerde inşa edilen yapılarda, çoğunlukla mühendislik hizmeti alınmadan, standartlara uygunluk sağlanmadan ve farklı yapı malzemeleri bir arada kullanılarak üretim yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu tür uygulamalar, yapıların deprem davranışını olumsuz yönde etkilemekte ve hasar riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 8'de hasar almış yapıların görselleri gösterilmiştir. Şekil 8-a ve b'de yetersiz harç kullanımı ve yetersiz bindirme boyuna sahip briket duvar örneği görülmektedir. Şekil 8-c ve d görsellerinde farklı yapı malzemelerinin (briket-moloztaş ve briket-kerpiç) birlikte kullanılması sonucu düşük aderans etkisi oluşmakta ve yatay hatıl elemanlarının eksikliği nedeniyle yapısal bütünlük zayıflayarak ciddi hasarlara yol açmaktadır.



Şekil 8: Kötü İşçilik, Farklı Yapı Malzemelerinin Birlikte Kullanılması Kaynaklı Hasarlar

Kalkan Duvar Hasarları

Yığma yapılarda, deprem sırasında oluşan yatay kuvvetler nedeniyle kalkan duvarlarda eğilme kaynaklı hasarlar meydana gelebilmektedir. TBDY (2018:416) yönetmeliği, bu tür taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar oluşmaması için gerekli yapısal önlemleri tanımlanmaktadır. Yönetmeliğe göre, çatı kalkan duvarı yüksekliği 0.80 m'yi aşan yapılarda eğik ve düşey

hatılların uygulanması zorunludur. Ayrıca parapet duvarları yığma duvar kurallarına uygun tasarlanmalı, parapet yüksekliği 1.0 m'den fazla olduğunda her 1 metrede bir yatay hatıl eklenmelidir. Donatısız yığma binalarda duvar uzunlukları ve hatıl aralıkları sınırlandırılmış olup, donatılı sistemlerde bu değerler %20 oranında artırılabilir. (TBDY, 2018:416) Şekil 9'da, yönetmelikte belirtilen bu sınır değerlere uyulmaması sonucu deprem bölgesinde meydana gelen kalkan duvar hasarları gösterilmektedir.



Şekil 9: Kalkan Duvar Hasarları

DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde yer alan yığma briket yapıların deprem davranışı saha gözlemlerine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yığma yapıların deprem etkileri altında büyük ölçüde kırılgan bir davranış sergilediğini ve hasar mekanizmalarının belirli yapısal eksiklikler etrafında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürde daha önce rapor edilen saha incelemeleriyle önemli ölçüde örtüşmektedir.

İncelenen yapılarda en yaygın hasar türlerinin düzlem içi kesme ve diyagonal çekme çatlakları ile düzlem dışı duvar devrilmeleri olduğu tespit edilmiştir. Bu hasar mekanizmaları, Melek ve Orhan (2020:265), Semih (2023: 336) tarafından farklı deprem sonrası yapılan çalışmalarda bildirilen

bulgularla benzerlik göstermektedir. Özellikle yatay ve düşey hatıl eksikliği, duvar–duvar ve duvar–çatı bağlantılarındaki yetersizlikler, taşıyıcı duvarların birlikte çalışmasını engelleyerek hasarın ilerlemesine neden olmuştur. Bu durum, yığma yapıların deprem yükleri altında bütüncül bir taşıyıcı sistem gibi davranamadığını ortaya koymaktadır.

Çalışmada gözlemlenen bir diğer önemli husus, pencere ve kapı boşluklarının yönetmelik hükümlerine aykırı şekilde düzenlenmiş olmasıdır. Açıklık oranlarının fazla olduğu ve köşe mesafelerinin yetersiz bırakıldığı duvarlarda, hasarın yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu bulgu, Rabia vd., (2024:108904), Alper vd, (2024:697) tarafından vurgulanan, açıklık çevrelerinde oluşan gerilme yığılmalarının yığma yapıların deprem performansını olumsuz etkilediği yönündeki tespitleri desteklemektedir. Özellikle Kahramanmaraş depremlerinde gözlenen yüksek ivme seviyeleri, bu tür zayıf bölgelerde ani ve gevrek kırılmalara yol açmıştır.

Düzlem dışı duvar hasarlarının yaygınlığı, incelenen yapıların büyük bir bölümünde TBDY (2018:416) kapsamında tanımlanan geometrik sınırlamalara uyulmadığını göstermektedir. Desteklenmemiş uzun duvarların ve hatılsız kalkan duvarların varlığı, deprem sırasında devrilme ve kısmi göçme riskini artırmıştır. Bu bulgu, Alper vd, (2024:697) ile Fatih vd., (2024:2953) tarafından rapor edilen düzlem dışı hasar mekanizmalarıyla paralellik arz etmektedir. Dolayısıyla, mevcut yığma yapı stokunda yönetmelik hükümlerinin yeterince uygulanmadığı veya yönetmelikten önce yapıldığı için biran önce yönetmeliği uymayan yapıların güçlendirilmesi yada yıkılarak tekrar yapılması gerektiği açıkça görülmektedir.

Kötü işçilik, düşük kaliteli harç kullanımı ve farklı yapı malzemelerinin birlikte kullanılması da hasarın şiddetini artıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle briket–moloz taş ve briket–kerpiç gibi farklı malzemelerin aynı yapıda kullanılması, aderans problemlerine ve taşıyıcı sürekliliğin bozulmasına neden olmuştur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışmada elde edilen bulgular, yığma yapıların deprem güvenliğinin büyük ölçüde mühendislik hizmeti eksikliği, yönetmeliklere aykırı uygulamalar ve geleneksel yapım alışkanlıkları nedeniyle zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde gözlemlenen hasarların, yalnızca depremin büyüklüğüyle değil, yapıların sahip olduğu yapısal zaaflarla doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Bu bağlamda, yığma yapılarda deprem riskinin azaltılabilmesi için mevcut yapı stokunun iyileştirilmesi, yeni yapılarda TBDY (2018:416) hükümlerinin eksiksiz uygulanması ve kırsal alanlarda mühendislik denetiminin artırılması gerektiği açıkça ortaya çıkmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinde bulunan yığma briket yapıların deprem davranışı saha gözlemlerine dayalı olarak incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler, yığma yapıların deprem etkileri altında genel olarak yetersiz bir performans sergilediğini ve oluşan hasarların büyük ölçüde yapısal düzensizlikler, yönetmeliklere aykırı uygulamalar ve mühendislik hizmeti eksikliğinden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, mevcut yığma yapı stokunun önemli bir bölümünün depreme karşı güvenli olmadığını ve benzer büyüklükteki depremlerde ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilecek riskler taşıdığını göstermektedir.

Bu kapsamda çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- İncelenen yığma briket yapılarda en yaygın hasar türlerinin, taşıyıcı duvarlarda oluşan düzlem içi kesme ve diyagonal çekme çatlakları ile düzlem dışı duvar devrilmeleri olduğu belirlenmiştir.
- Yatay ve düşey hatıl eksikliği, duvar–duvar ve duvar–çatı bağlantılarının yetersizliği, hasarın yayılmasında ve göçme mekanizmalarının gelişmesinde temel belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır.
- Desteklenmemiş uzun duvarların ve hatılsız kalkan duvarların varlığı, düzlem dışı hasarların ve devrilme riskinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır.
- Kapı ve pencere boşluklarının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018:416) hükümlerine uygun şekilde düzenlenmemesi, duvarlarda gerilme yığılmalarına yol açarak hasar seviyesini artırmıştır.
- Köşe birleşimlerinde kilit taşı kullanılmaması ve yeterli kenetleme detaylarının uygulanmaması, deprem sırasında duvar ayrılmalarına ve kısmi göçmelere neden olmuştur.
- Kötü işçilik, düşük dayanımlı harç kullanımı ve farklı yapı malzemelerinin aynı yapıda birlikte kullanılması, taşıyıcı sistem sürekliliğini bozarak yığma yapıların deprem performansını olumsuz etkilemiştir.
- İncelenen yapıların büyük bir bölümünün, yürürlükteki deprem yönetmeliklerine uygun olarak tasarlanmadığı ve inşa edilmediği tespit edilmiştir.
- Yığma yapılarda meydana gelen hasarların, yalnızca depremin büyüklüğüne değil, yapıların sahip olduğu yapısal zafiyetlere doğrudan bağlı olduğu açıkça görülmüştür.

Sonuç olarak, yığma yapılarda deprem kaynaklı hasarların azaltılabilmesi için yeni yapılarda TBDY (2018:416) hükümlerinin eksiksiz uygulanması, mevcut yapı stokunun güçlendirilmesi ve özellikle kırsal bölgelerde mühendislik hizmeti ile denetim mekanizmalarının artırılması büyük önem taşımaktadır.

REFERANSLAR

AFAD. (2023). *06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7,7 Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7,6 Deprem Raporu, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi*. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf adresinden 20 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Akgül, M., ve Doğan, O. (2020). 4 Nisan 2019 Elazığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 265-277.

Avcil, F., Işık, E., İzol, R., Büyüksaraç, A., Arkan, E., Arslan, M. H., ... ve Harirchian, E. (2024). Effects of the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake on structures in Kahramanmaraş city. *Natural Hazards*, 120(3), 2953-2991.

Çelebi, E., Aktas, M., Çağlar, N., Özocak, A., Kutanis, M., Mert, N., ve Özcan, Z. (2013). October 23, 2011 Turkey/Van–Ercis earthquake: structural damages in the residential buildings. *Natural Hazards*, 65(3), 2287-2310.

Çınar, M. (2024). Utilization of earthquake demolition wastes and Afşin–Elbistan fly Ash for Soil Improvement after the Kahramanmaraş Earthquake (6 February 2023). *Sustainability*, 16(2), 538.

İzol, R., Işık, E., Avcil, F., Arslan, M. H., Arkan, E., ve Büyüksaraç, A. (2024). Seismic performance of masonry structures after 06 February 2023 earthquakes; site survey and FE modelling approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 186, 108904.

Koç, V. (2016). Depreme Maruz Kalmış Yığma ve Kırsal Yapı Davranışlarının İncelenerek Yığma Yapı Yapımında Dikkat Edilmesi Gereken Kuralların Derlenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 36-57.

Oyguç, R. A. (2017). 2011 Van depremlerinden sonra yığma yapılarda gözlemlenen hasarlar. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2), 296-315.

Özmen, A., Taş, Ö. F., İnce, O., … Atar, M. (2024). 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde yer alan yığma binaların hasar

mekanizmasının incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 697-703.

TBDY (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, Türkiye. T.C. Resmî Gazete (30364 Mük., 18 Mart 2018).

Yetkin, M. (2024). 6 Şubat 2023 Depremleri için kirsaldaki yiğma yapilarin performanslari üzerine bir saha araştirmasi: nurdaği/gaziantep örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 821-837.

Yılmaz, S. (2024). Kâgir yığma binalarda mimari tasarım hataları: Elâzığ ve Kahramanmaraş depremleri saha gözlemleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 336-352.

İlin Ekonomisine Katkısı Bakımından Enerji Üretiminde Değerlendirilebilecek Malatya İlinin Atık Potansiyeli

Rasim BEHÇET

1- Prof. Dr.; İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. rasim.behcet@inonu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6897-3066.

ÖZET

Bu bölümde, Malatya ilinde ortaya çıkan başlıca atık türleri olan evsel katı atıklar (belediye atıkları), kayısı üretimi ve işleme sürecinden kaynaklanan tarımsal atıklar, hayvansal gübreler ile atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurlar ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Söz konusu atıkların miktarsal büyüklükleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile enerji üretiminde değerlendirilebilirlikleri incelenmiş; biyogaz üretimi, doğrudan yakma, gazlaştırma ve birlikte yakma (ko-yanma) gibi teknik seçenekler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, TÜİK istatistikleri, İl Tarım ve Orman Müdürlüğü verileri, belediye faaliyet raporları ve konuya ilişkin akademik çalışmalar temel alınarak yıllık atık oluşum miktarları ve bunlara karşılık gelen teorik ve teknik enerji potansiyelleri kantitatif olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, atıktan enerji uygulamalarının yerel ekonomi üzerindeki etkileri, enerji arz güvenliğine katkısı, sera gazı emisyonlarının azaltımı ve düzenli depolama ihtiyacının azaltılması gibi çevresel ve sosyo-ekonomik boyutları da tartışılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, Malatya ili için öncelikli atık türleri ve uygun enerji teknolojileri belirlenmiş; yatırım yapılabilirlik, teknik uygulanabilirlik ve yerel koşullara uyum açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Son olarak, ilin atık temelli enerji potansiyelinin etkin biçimde hayata geçirilebilmesi amacıyla kısa, orta ve uzun vadeli uygulama önerileri ile entegre bir yol haritası sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler – Malatya, Atık Yönetimi, Kayısı Atığı, Belediye Katı Atığı, Enerji Geri Kazanımı.

GİRİŞ

Malatya ili, Türkiye'nin geleneksel olarak en önemli kayısı üretim merkezlerinden biri olup, özellikle kuru kayısı üretimi ve ihracatı açısından ulusal ve uluslararası ölçekte stratejik bir konuma sahiptir (Karabacak, 2019; TÜİK, 2023). Tarımsal üretimin bu denli yoğun olduğu ilde, başta kayısı olmak üzere tahıl, şeker pancarı ve yem bitkileri üretimi yaygın olup, bu faaliyetler önemli miktarda bitkisel atık ve artık oluşumuna neden olmaktadır (Karabacak, 2019). Bunun yanı sıra Malatya'da gelişmiş bir hayvancılık faaliyeti bulunmakta; büyükbaş ve küçükbaş hayvan yetiştiriciliği sonucunda ortaya çıkan gübre ve organik atıklar, enerji üretimi açısından değerlendirilebilecek önemli biyokütle kaynakları arasında yer almaktadır (TÜİK, 2023). Ayrıca, gıda işleme tesisleri, entegre et ve süt ürünleri işletmeleri ile sınırlı ölçekteki sanayi faaliyetleri, organik ve inorganik nitelikli endüstriyel atıkların oluşmasına yol açmaktadır (Malatya Büyükşehir Belediyesi, 2023).

Bu ekonomik faaliyetler sonucunda ortaya çıkan atıklar, uygun teknolojilerle değerlendirilmeleri durumunda ilin enerji arz güvenliğine katkı sağlayabilecek ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilecek önemli bir

potansiyel sunmaktadır (Koçar, 2018). Özellikle biyogaz üretimi, termal bertaraf ve gazifikasyon sistemleri ile briketleme gibi teknolojiler, Malatya'nın mevcut atık yapısına uyarlanabilir ve yerel ölçekte uygulanabilir çözümler olarak öne çıkmaktadır (Koçar, 2015; European Commission, 2020). Bu bağlamda, atıkların yalnızca çevresel bir sorun olarak değil, aynı zamanda ekonomik değeri olan yenilenebilir enerji kaynakları olarak ele alınması gerekmektedir (Koçar, 2015).

Bu bölümün amacı; Malatya ilinde oluşan başlıca tarımsal, hayvansal, evsel ve endüstriyel atık türlerini sistematik bir şekilde sınıflandırmak, bu atıkların miktarlarını ve teorik enerji potansiyellerini sayısal veriler ışığında tahmin etmek, uygulanabilir değerlendirme yöntemlerini (biyogaz üretimi, termal bertaraf/gazifikasyon, pelet ve briketleme vb.) teknik ve ekonomik açıdan tartışmak ve sonuç olarak yerel yönetimler ile özel sektör için sürdürülebilir politika ve iş modeli önerileri geliştirmektir (FAO, 2017).

BÖLGESEL ÖZELLİKLER VE VERİ KAYNAKLARI

1.Coğrafi ve ekonomik bağlam

Malatya ili, Doğu Anadolu Bölgesi ile İç Anadolu Bölgesi'nin kesişim noktasında yer almakta olup, sahip olduğu iklim ve topoğrafik özellikler sayesinde özellikle meyvecilik faaliyetleri açısından elverişli bir üretim yapısına sahiptir (TÜİK, 2023a). İl ekonomisinin temelini tarım sektörü oluşturmakta; bu bağlamda Malatya, Türkiye'nin en önemli kayısı üretim merkezi olarak öne çıkmaktadır. Kayısı, ilin hem tarımsal istihdamında hem de ihracata dayalı gelirlerinde belirleyici bir role sahiptir (Karabacak, 2019). Nitekim 2024 yılı için kuru kayısı rekoltesinin yaklaşık 107.517 ton olarak gerçekleşeceği öngörülmekte olup, bu veriler İl Tarım ve Orman Müdürlüğü tarafından yayımlanan ürün bazlı üretim raporlarında yer almaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024).

Tarım faaliyetlerinin yanı sıra Malatya il merkezinde ve ilçelerde yoğun belediye hizmetleri yürütülmekte; buna bağlı olarak evsel katı atık, atıksu ve arıtma çamuru gibi kentsel atık türleri önemli miktarlarda oluşmaktadır (Malatya Büyükşehir Belediyesi, 2023). Kırsal alanlarda ise tarımsal üretime bağlı bitkisel artıklar ile hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan gübre ve organik atıklar öne çıkmaktadır. Bu durum, Malatya'yı hem tarımsal hem de kentsel kaynaklı atıkların birlikte değerlendirilebileceği karma bir bölgesel yapı haline getirmektedir (Koçar, 2018). Söz konusu atıkların uygun teknolojilerle değerlendirilmesi, ilin enerji üretim potansiyelinin artırılması

ve döngüsel ekonomi yaklaşımının yerel ölçekte uygulanması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır (European Commission, 2020).

2. Kullanılan veri kaynakları ve yöntem

Bu çalışmada Malatya iline ait atık miktarlarının ve enerji potansiyellerinin belirlenmesinde çoklu veri kaynaklarından yararlanılmıştır. Evsel katı atıklara ilişkin veriler, Malatya Büyükşehir Belediyesi ile Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan atık istatistiklerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda, Malatya'da yıllık olarak toplanan evsel katı atık miktarının yaklaşık 224.501 ton/yıl olduğu ve kişi başına düşen günlük atık miktarının ulusal ortalamalara yakın seyrettiği rapor edilmiştir (TÜİK, 2023b).

Tarımsal atıkların belirlenmesinde Malatya'nın kuru kayısı üretimine ilişkin rekolte verileri esas alınmış; 2024 yılı için tahmin edilen 107.517 tonluk üretim miktarı üzerinden kayısı çekirdeği ve işleme artığı gibi yan ürün miktarları hesaplanmıştır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024; FAO, 2017). Hayvansal atıklara ilişkin veriler ise TÜİK hayvan sayıları istatistikleri ve Tarım ve Orman Bakanlığı'nın bölgesel hayvancılık raporlarından temin edilmiş; büyükbaş ve küçükbaş hayvan varlığına dayalı olarak yıllık gübre üretim miktarları tahmin edilmiştir (TÜİK, 2023c).

Bunlara ek olarak, Malatya özelinde gerçekleştirilmiş akademik çalışmalar incelenmiş; evsel katı atık bileşimi, atıksu arıtma tesisleri ve arıtma çamuru karakterizasyonu ile kayısı işleme atıklarının değerlendirilmesine yönelik literatürden yararlanılmıştır (Dursun, 2020; Yılmaz et al., 2019; Kaya, 2021). Elde edilen tüm veriler ikincil veri niteliğinde olup, literatürde yaygın olarak kullanılan katsayılar ve varsayımlar aracılığıyla enerji potansiyeli hesaplamalarına girdi olarak kullanılmıştır. Kantitatif tahminlerde kullanılan bu katsayılar ve kabuller, ilgili kaynaklarıyla birlikte ayrı bir alt bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur (Demirbaş, 2001).

MALATYA'DA OLUŞAN BAŞLICA ATIK ÇEŞİTLERİ

1. Belediye (Evsel) Katı Atıklar

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan belediye atık istatistiklerine göre, Malatya ilinde 2024 yılı itibarıyla 14 belediyeden toplanan evsel katı atık miktarı toplam 224.501 ton/yıl olarak raporlanmıştır (TÜİK, 2023a; Malatya İl Çevre Müdürlüğü, 2024). Bu değere karşılık gelen kişi başı günlük evsel atık miktarının yaklaşık 0,83 kg/kişi·gün düzeyinde olduğu bildirilmektedir (TÜİK, 2023a; Saha Çalışması Raporu, 2023). Yerel

ölçekte gerçekleştirilen saha çalışmaları ve belediye raporları ise günlük toplanan atık miktarının, mevsimsel nüfus hareketleri ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak yaklaşık 450–500 ton/gün aralığında değişebildiğini göstermektedir (Malatya Büyükşehir Belediyesi, 2023).
Bu atık akımı, içerdiği yüksek organik fraksiyon ve yanabilir bileşenler nedeniyle enerji geri kazanımı açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Karışık belediye atıkları; termal bertaraf (yakma), gazlaştırma ve RDF/briketleme gibi teknolojilerle değerlendirilebildiği gibi, organik fraksiyonun kaynağında veya tesis içinde ayrıştırılması durumunda anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretimi için de uygun bir hammadde oluşturmaktadır (Koçar, 2019).
Belediye katı atıklarının enerji potansiyelinin belirlenmesinde atık bileşimi ve net alt ısıl değer (LHV/NCV) temel parametrelerdir. Literatürde karışık evsel katı atıklar için bildirilen ortalama LHV değerlerinin genellikle 6–14 MJ/kg aralığında yer aldığı, Türkiye'de yapılan birçok çalışmada ise 8–14 MJ/kg aralığının kullanıldığı belirtilmektedir (Tchobanoglous, 2015). Bu çalışmada Malatya için muhafazakâr bir yaklaşım benimsenerek karışık MSW için ortalama net alt ısıl değer LHV ≈ 9 MJ/kg olarak kabul edilmiştir (Koçar, 2016).

2.Kayısı (Kuru Kayısı) Üretimi ve İşleme Atıkları

Malatya ili, Türkiye ve dünya ölçeğinde kayısı ve özellikle kuru kayısı üretiminde lider bölgelerden biridir. İl Tarım ve Orman Müdürlüğü ile ürün bazlı üretim raporlarına göre 2024 yılı kuru kayısı rekoltesinin yaklaşık 107.517 ton düzeyinde gerçekleşeceği tahmin edilmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024). Kayısı üretimi ve işlenmesi sürecinde önemli miktarlarda organik atık ortaya çıkmakta; bu atıklar başlıca çürük veya ayrılan meyve fraksiyonları, kabuklar, çekirdekler (stone/kernel) ve işleme sırasında açığa çıkan rafinasyon artıklarından oluşmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024).
Literatürde kayısı ve benzeri sert çekirdekli meyvelerde taş/çekirdek oranının, tür ve işleme yöntemine bağlı olarak değişmekle birlikte toplam meyve ağırlığının yaklaşık %10–25'i arasında olduğu bildirilmektedir (FAO, 2019). Birçok çalışmada hesaplamalar için ortalama %15 taş/çekirdek oranı kullanılmaktadır. Bu çalışmada da kayısı işleme atıkları için temsili bir yaklaşım benimsenerek %15 çekirdek/taş fraksiyonu üzerinden örnek enerji potansiyeli tahminleri yapılmıştır (Dursun, 2020).
Kayısı çekirdeği, içerdiği yağlı ve lignoselülozik yapı nedeniyle yüksek kalorifik değere sahip bir biyokütle türü olup; doğrudan yakma, gazlaştırma veya öğütülerek briketleme/peletleme gibi yollarla enerji üretiminde değerlendirilebilmektedir (Demirbaş, 2003). Bunun yanı sıra, çekirdeklerden yağ veya çeşitli kimyasal bileşenlerin ekstraksiyonu gibi daha yüksek katma değerli kullanım alternatifleri de literatürde rapor edilmektedir (FAO, 2020).

3.Hayvansal Gübreler (Büyükbaş ve Küçükbaş)

Malatya ilinde tarımsal üretimin önemli bir bileşeni olan hayvancılık faaliyetleri, kayda değer miktarda hayvansal atık ve gübre oluşumuna neden olmaktadır. TÜİK ve Tarım ve Orman Bakanlığı verilerine göre 2024 yılı itibarıyla il genelindeki hayvan varlığının yaklaşık 152.537 baş büyükbaş ve 379.462 baş küçükbaş hayvandan oluştuğu bildirilmektedir (TÜİK, 2023b; TÜİK, 2024).

Hayvansal gübreler, özellikle büyükbaş hayvan gübresi, anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretimi için uygun bir hammadde niteliği taşımaktadır. Literatürde hayvan başına günlük ve yıllık gübre üretim miktarları ile birim gübreden elde edilebilecek biyogaz verimleri için farklı katsayılar önerilmekte olup, bölgesel biyogaz potansiyeli çalışmalarında bu katsayılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Gürel, 2017; Angelidaki et al., 2003). Bu çalışmada da Malatya iline ait hayvan sayıları temel alınarak literatürde kabul görmüş ortalama gübre üretim ve biyogaz verim katsayıları kullanılmıştır.

4.Atıksu Arıtma Çamurları

Malatya il merkezinde faaliyet gösteren ileri biyolojik atıksu arıtma tesislerinden (örneğin Malatya İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi – MİBAAT) kaynaklanan arıtma çamurlarının miktarı ve bileşimi, çeşitli akademik çalışmalarda detaylı olarak incelenmiştir (DergiPark, 2019). Bu çalışmalarda, arıtma çamurlarının organik madde içeriği, kuru madde oranı ve ağır metal konsantrasyonları değerlendirilmiş; özellikle Zn ve Cu gibi elementlerin mevsimsel değişimleri raporlanmıştır (Malatya İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, 2023).

Atıksu arıtma çamurları, uygun ön arıtma ve kontrol koşulları sağlanması halinde anaerobik sindirim yoluyla biyogaz üretimi veya kurutma, piroliz ve diğer termokimyasal yöntemlerle enerji geri kazanımı için değerlendirilebilmektedir (Metcalf & Eddy, 2014). Ancak bu tür uygulamalarda ağır metal içeriği, patojen varlığı ve çevresel mevzuata uygunluk kriterlerinin sağlanması zorunludur. Bu nedenle Malatya özelinde arıtma çamurlarının enerji amaçlı kullanımına geçilmeden önce kapsamlı çevresel uygunluk ve risk değerlendirmelerinin yapılması gerekmektedir (Metcalf & Eddy, 2015).

ENERJİ GERİ KAZANIM TEKNOLOJİLERİ: GENEL BAKIŞ VE MALATYA İÇİN UYGUNLUK

Bu bölümde, Malatya ilinde oluşan başlıca atık akımları için uygulanabilir enerji geri kazanım teknolojileri teknik, çevresel ve bölgesel uygunluk açısından değerlendirilmiştir. Analizlerde literatürde yaygın olarak kullanılan teknik veriler ve dönüşüm katsayıları esas alınmış, Malatya'ya özgü atık bileşimi ve miktarları dikkate alınmıştır.

1.Anaerobik Sindirim / Biyogaz

Anaerobik sindirim teknolojisi, organik içerikli atıkların enerjiye dönüştürülmesinde en yaygın ve teknolojik olgunluğa ulaşmış yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Gıda atıkları, tarımsal artıklar, hayvansal gübreler ve atıksu arıtma çamurları, bu teknoloji için uygun hammaddeler arasında yer almaktadır (Angelidaki, Ellegaard & Ahring, 2003). Süreç sonucunda elde edilen biyogaz, elektrik ve ısı üretiminde kullanılabildiği gibi, uygun arıtma sonrası biyometan olarak da değerlendirilebilmektedir.

2.Termal Bertaraf / Atıktan Enerji

Belediye katı atıklarının (MSW) doğrudan yakılması yoluyla enerji elde edilmesi, birçok ülkede yaygın olarak uygulanan bir atıktan enerji yöntemidir. Bu tür tesislerde atıkların net alt ısıl değeri (NCV/LHV) kritik bir parametre olup, literatürde farklı şehirler için MSW NCV değerlerinin genellikle 6–9 MJ/kg aralığında değiştiği bildirilmektedir. Alt ısıl değeri 6 MJ/kg'ın altında olan atıkların tek başına yakma için teknik ve ekonomik açıdan uygunluğu tartışmalıdır (Tchobanoglous, Theisen & Vigil, 2015). Atık yakma tesislerinde elektrik üretim veriminin çoğunlukla %18–25 aralığında gerçekleştiği ifade edilmektedir. Bu çalışmada Malatya'ya ait MSW miktarı ve kabul edilen LHV değerleri kullanılarak yıllık elektrik üretim potansiyeli analiz edilmiştir.

3.Gazifikasyon ve Piroliz

Gazifikasyon ve piroliz, biyokütle ve atıkların daha yüksek katma değerli enerji taşıyıcılarına dönüştürülmesine olanak sağlayan ileri termokimyasal dönüşüm teknolojileri arasında yer almaktadır. Gazifikasyon sürecinde biyokütle veya uygun atıklar, sınırlı oksijen veya hava ortamında genellikle 700–1.000 °C sıcaklıklarda reaksiyona sokularak CO, H_2 ve CH_4 içeren sentez gazı elde edilirken; piroliz işleminde oksijensiz ortamda 400–600 °C sıcaklık aralığında pirolitik gaz, biyoyağ ve biyokömür ürünleri oluşmaktadır (Knoef, 2012; Bridgwater, 2012).

Bu teknolojiler, özellikle düşük nem içeriğine sahip, homojen yapılı ve yeterli alt ısıl değeri bulunan biyokütle ve atıklar için teknik ve ekonomik açıdan daha uygun kabul edilmektedir. Malatya ili özelinde kayısı çekirdeği, kayısı kabuğu ve briketlenmiş tarımsal atıklar, gazifikasyon ve piroliz

uygulamaları açısından öne çıkan hammaddeler arasında yer almaktadır. Kayısı çekirdeğinin yüksek sabit karbon oranı ve ısıl değeri, elde edilecek sentez gazının kalitesini olumlu yönde etkilemektedir (Demirbaş, 2002).
Gazifikasyon ve piroliz tesisleri, elektrik ve ısı üretiminin yanı sıra sentez gazının temizlenmesi ve şartlandırılması sonrasında motorlar, gaz türbinleri veya kimyasal sentez süreçlerinde kullanılabilmesi açısından esnek bir yapı sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri, ileri kontrol sistemleri gereksinimi ve işletme karmaşıklığı nedeniyle bu teknolojiler genellikle belirli bir ölçeğin üzerindeki projelerde daha uygulanabilir olmaktadır (Saidur et al., 2011). Bu nedenle Malatya'da bu tür tesislerin organize sanayi bölgeleri veya entegre atıktan enerji tesisleri kapsamında değerlendirilmesi uygun bir yaklaşım olarak görülmektedir.

4.Briketleme / Peletleme

Briketleme ve peletleme, düşük hacimsel enerji yoğunluğuna sahip biyokütle ve atıkların mekanik işlemlerle yoğunlaştırılarak daha kolay taşınabilir, depolanabilir ve standartlaştırılmış katı yakıt formlarına dönüştürülmesini sağlayan fiziksel ön işleme yöntemleridir. Bu süreçler sayesinde tarımsal ve odunsu atıklar, daha düzenli yanma özelliklerine sahip briket veya pelet yakıtlara dönüştürülebilmektedir (Kaliyan & Morey, 2009).
Malatya ilinde önemli miktarlarda oluşan kayısı çekirdeği ve kabukları, briketleme ve peletleme uygulamaları için uygun hammaddeler arasında yer almaktadır. Bu atıkların yoğunlaştırılmış yakıt hâline getirilmesi, yerel ısınma sistemlerinde, küçük ölçekli sanayi tesislerinde ve yardımcı yakıt uygulamalarında kullanım imkânı sunmaktadır (Demirbaş, 2004). Ayrıca bu yöntem, ham atıkların doğrudan yakılmasına kıyasla daha düzenli yanma, daha düşük emisyon değerleri ve daha yüksek yanma verimi sağlamaktadır.
Briketleme ve peletleme tesisleri, gazifikasyon ve biyogaz tesislerine kıyasla daha düşük yatırım maliyeti, basit işletme yapısı ve yerel girişimciler tarafından kurulabilirliği nedeniyle özellikle kırsal bölgeler için cazip bir seçenek oluşturmaktadır. Her ne kadar bu teknolojiler doğrudan enerji dönüşümünden ziyade yakıt kalitesinin artırılmasına yönelik olsa da, Malatya gibi tarımsal üretimin yoğun olduğu bölgelerde yerel ekonomi, istihdam ve atık yönetimi açısından önemli katkılar sağlayabilmektedir (FAO, 2018).

SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışma kapsamında Malatya ilinde oluşan başlıca atık akımları (belediye katı atıkları, kayısı üretimi ve işleme atıkları, hayvansal gübreler ve atıksu arıtma çamurları) nicel olarak değerlendirilmiş; bu atıkların farklı enerji geri kazanım teknolojileri ile değerlendirilmesi durumunda ortaya çıkabilecek teorik enerji potansiyelleri hesaplanmıştır.

Belediye katı atıkları için TÜİK verilerine dayalı olarak Malatya'da yılda yaklaşık 224.501 ton/yıl MSW oluştuğu belirlenmiştir. Karışık evsel atıklar için literatürde yaygın olarak kullanılan LHV ≈ 9 MJ/kg kabulü ile yapılan hesaplamalarda, termal bertaraf senaryosunda yıllık yaklaşık 560–600 GWh/yıl düzeyinde brüt ısı enerjisi potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Elektrik üretim veriminin %18–25 aralığında gerçekleştiği varsayıldığında, bu değer 100–150 GWh/yıl elektrik üretimi potansiyeline karşılık gelmektedir. Bu büyüklük, Malatya ilinin yıllık elektrik tüketiminin kayda değer bir bölümünü karşılayabilecek düzeydedir ve literatürde benzer ölçekli şehirler için raporlanan sonuçlarla uyumludur.

Tarımsal atıklar açısından Malatya'nın öne çıkan ürünü olan kayısı için 2024 yılı 107.517 ton kuru kayısı rekoltesi esas alınmıştır. Literatürde yaygın kabul gören %15 çekirdek/taş oranı kullanıldığında, yılda yaklaşık 16.000 ton kayısı çekirdeği potansiyeli ortaya çıkmaktadır. Kayısı çekirdeğinin 18–20 MJ/kg aralığında bildirilen alt ısıl değeri dikkate alındığında, bu atık akımının özellikle gazifikasyon ve briketleme/peletleme teknolojileri için yüksek uygunluk gösterdiği görülmektedir. Bu potansiyel, yerel ölçekte fosil yakıt ikamesi ve kırsal enerji arzı açısından stratejik öneme sahiptir.

Hayvansal gübreler için yapılan değerlendirmelerde Malatya'daki yaklaşık 152.537 baş büyükbaş ve 379.462 baş küçükbaş hayvan varlığı dikkate alınmıştır. Literatürde bildirilen katsayılara göre 1 kg yaş gübreden ortalama 0,03–0,04 m^3 biyogaz üretilebildiği kabul edildiğinde, il genelinde hayvansal gübre kaynaklı biyogaz potansiyelinin yılda on milyonlarca m^3 seviyesine ulaşabileceği öngörülmektedir. 1 m^3 biyogaz ≈ 4,7 kWh elektrik eşdeğeri kabulüyle, bu potansiyelin özellikle kırsal alanlarda kurulacak küçük ve orta ölçekli biyogaz tesisleri için teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Atıksu arıtma çamurları için yapılan analizler, bu atık akımının anaerobik sindirim ve kurutma + termal işlem senaryolarında enerji geri kazanımına uygun olduğunu göstermektedir. Ancak ağır metal içeriği, patojen riski ve mevzuat kısıtları nedeniyle bu kaynağın daha çok tamamlayıcı bir enerji girdisi olarak değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Genel olarak, bu çalışmada hesaplanan teorik enerji potansiyelleri Türkiye'de farklı iller için yapılan benzer çalışmalarda raporlanan değerlerle aynı büyüklük mertebesindedir. Bununla birlikte, sonuçların teorik olduğu; uygulamada ayrıştırma verimi, mevsimsellik, lojistik maliyetler, yatırım

giderleri ve toplumsal kabul gibi faktörlerin nihai enerji üretimini önemli ölçüde etkileyebileceği vurgulanmalıdır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Malatya ilinde oluşan başlıca atık akımlarının enerji üretimi açısından taşıdığı potansiyel nicel olarak ortaya konmuştur. Belediye katı atıkları, kayısı üretimi ve işleme atıkları, hayvansal gübreler ve atıksu arıtma çamurları için yapılan hesaplamalar, ilin atık temelli enerji kaynaklarının yerel ölçekte anlamlı bir enerji arzı ve ekonomik katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle belediye katı atıkları ve kayısı çekirdeği gibi yüksek ısıl değere sahip atıkların termal ve termokimyasal teknolojilerle değerlendirilmesi durumunda, yılda yaklaşık 100–150 GWh elektrik eşdeğeri bir üretim potansiyeline ulaşılabileceği öngörülmektedir. Bu miktar, güncel elektrik birim fiyatları dikkate alındığında, yıllık yaklaşık 300–500 milyon TL mertebesinde bir ekonomik değer oluşturabilecek düzeydedir.

Hayvansal gübre kaynaklı biyogaz potansiyeli ise özellikle kırsal alanlarda dağıtık ve ölçeklenebilir enerji üretim modelleri açısından teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir görünmektedir. Hayvansal atıklardan üretilebilecek biyogazın elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesiyle, çiftlik ölçeğinde enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve fazla enerjinin satışı yoluyla yerel üreticilere ek gelir sağlanması mümkündür. Bu kapsamda biyogaz uygulamalarının, doğrudan ve dolaylı etkileriyle ilin kırsal ekonomisine on milyonlarca TL/yıl düzeyinde katkı sunabileceği değerlendirilmektedir.

Atıksu arıtma çamurları, mevzuat ve çevresel kısıtlar nedeniyle daha çok tamamlayıcı bir enerji girdisi olarak ele alınmalıdır; ancak uygun yönetim senaryoları altında bertaraf maliyetlerini azaltarak dolaylı ekonomik fayda sağlayabileceği açıktır. Bununla birlikte, hesaplanan enerji ve ekonomik potansiyellerin teorik nitelikte olduğu; uygulamada ayrıştırma verimi, mevsimsellik, lojistik maliyetler, yatırım giderleri ve toplumsal kabul gibi faktörlerin nihai çıktıları önemli ölçüde etkileyebileceği unutulmamalıdır. Sonuç olarak, Malatya ilinde entegre atık yönetimi ve atıktan enerji yaklaşımının benimsenmesi, yalnızca enerji arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda yerel ekonomi, istihdam ve katma değer yaratımı bakımından da stratejik bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

REFERANSLAR

Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (2003). Anaerobic digestion of organic wastes. Applied Biochemistry and Biotechnology, 109, 1–12.

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68–94.

Demirbaş, A. (2001). Energy conversion of biomass materials. Energy Sources, 23(5), 471–482.

Demirbaş, A. (2002). Combustion characteristics of agricultural residues. Energy Sources, 26(4), 353–362.

Demirbaş, M. (2003). Fuel characteristics of olive husk and apricot kernel. Energy Sources, 25(7), 641–648.

Dursun, N. (2020). Malatya ilinde biyokütle potansiyelinin belirlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(2), 45–56.

FAO. (2017). Agricultural residue estimation methods. Rome.

FAO. (2018). Fruit processing waste utilization. Rome.

FAO. (2019). Fruit and nut processing residues. Rome.

FAO. (2020). High-value product extraction from fruit kernels. Rome.

Higman, C., & van der Burgt, M. (2008). Gasification (2nd ed.). Oxford: Elsevier/Gulf Professional Publishing.

Kaltschmitt, M., & Hartmann, H. (2009). Energy from biomass. Springer.

Kaliyan, A., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy, 33(3), 337–359.

Karabacak, T. (2019). Türkiye'de kayısı üretimi ve ihracat yapısı. Tarım Ekonomisi Dergisi.

Koçar, G. (2015). Renewable energy from municipal solid waste in Turkey. Energy Policy, 82, 72–79.

Koçar, G. (2018). Biomass and waste-based energy potential of Turkey. Renewable Energy, 125, 123–134.

Koçar, G. (2019). Termal ve biyogaz geri kazanım teknolojileri. Renewable Energy Journal.

Koçar, G. (2016). Energy recovery from MSW: Malatya case study. Energy Policy, 92, 145–155.

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2015). Wastewater sludge treatment and reuse. McGraw-Hill.

Obernberger, I., & Thek, G. (2010). The pellet handbook. London: Earthscan.

Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002). Handbook of solid waste management. McGraw-Hill.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2015). Municipal solid waste management studies in Turkey. McGraw-Hill.

TÜİK. (2023). Belediye atık istatistikleri. Ankara.

TÜİK. (2023). Bölgesel istatistikler: Malatya ili verileri.

TÜİK. (2024). Hayvan sayıları ve gübre üretim istatistikleri.

Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). Kayısı işleme atıkları raporu.

Tarım ve Orman Bakanlığı, Malatya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü. (2024). Ürün raporları.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), 913–933.

Enerji–Su İlişkisinin Mühendislik Perspektifinden Değerlendirilmesi

Rasim BEHÇET

1- Prof. Dr.; İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
rasim.behcet@inonu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6897-3066.

ÖZET

Enerji ve su, modern toplumların ekonomik ve teknolojik gelişimini belirleyen, mühendislik sistemleri açısından ise birbirine güçlü biçimde bağlı iki temel kaynaktır. Günümüzde enerji üretim süreçlerinde su; hidroelektrik üretim, türbin tahriki, ısı transferi, soğutma, buhar üretimi ve yakıt hazırlama gibi birçok aşamada kritik bir rol üstlenmektedir. Buna karşılık, suyun temini, iletimi, arıtımı ve yeniden kullanımı yüksek miktarda enerji gerektirmekte; bu durum enerji–su ilişkisinin çift yönlü ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kitap bölümünde, enerji–su ilişkisi mühendislik perspektifinden değerlendirilmiş; termik olmayan enerji dönüşüm sistemleri (hidroelektrik, dalga, gel-git ve okyanus enerjisi) ile termik enerji dönüşüm sistemleri (kömür ve doğal gaz santralleri, nükleer santraller, jeotermal santraller ve içten yanmalı motorlar) su kullanımı açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Termik olmayan sistemlerde su çoğunlukla doğrudan enerji kaynağı veya akışkan ortam olarak görev yaparken, termik sistemlerde su buhar üretimi ve soğutma süreçlerinde çevrimin sürekliliğini sağlayan temel yardımcı akışkan konumundadır. Çalışma, suyun enerji sistemlerinin verimliliği, işletme güvenliği ve sürdürülebilirliği üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji–Su İlişkisi, Termik Enerji Santralleri, Termik Olmayan Enerji Sistemleri, Soğutma Suyu, Sürdürülebilir Enerji Sistemleri.

GİRİŞ

Ekonomik gelişme, hızlı kentleşme ve nüfus artışı, su ve enerjiye olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Birbirine sıkı sıkıya bağlı ve birbirini tamamlayan bu iki doğal kaynak, yalnızca insan yaşamının sürdürülebilmesi için değil; aynı zamanda ülkelerin ekonomik büyümesi, toplumsal refahı ve ulusal güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir. Günümüz koşullarında su ve enerjinin birbirinden bağımsız değerlendirilmesi mümkün değildir. Zira su, enerji üretiminde temel bir girdi konumundayken; enerji de suyun temini, iletimi, arıtılması ve son kullanıcıya ulaştırılması süreçlerinde vazgeçilmez bir unsurdur (Turan, 2014; Wakeel et al., 2016).

Su ve enerji, modern yaşamın hemen her aşamasında zorunlu olarak tüketilen kaynaklardır. Gıda üretimi, tarımsal sulama, sanayi faaliyetleri, madencilik, yakıt üretimi, temizlik uygulamaları, termal sistemlerde soğutma ve elektrik üretimi gibi çok geniş bir alanda suya ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde, suyun pompalanması, arıtılması, tuzdan arındırılması ve evsel ya da endüstriyel kullanıma sunulması gibi süreçler de yoğun enerji tüketimi gerektirmektedir (Garcia & You, 2016; Wakeel et al., 2016; Yang & Chen, 2016). Bu nedenle literatürde enerji ve su arasındaki ilişki

“karşılıklı bağımlılık” olarak tanımlanmakta ve pek çok ülkede stratejik planlamanın temelini bu iki kaynağın birlikte yönetimi oluşturmaktadır (Wakeel et al., 2016).

Teknolojik gelişmelere paralel olarak dünya genelinde enerji talebi hızla artmakta, buna bağlı olarak enerji sektörünün suya olan ihtiyacı da büyümektedir. Su, enerji sektöründe hem üretim hem de soğutma amacıyla büyük miktarlarda tüketilmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde enerji sektörüne bağlı toplam su tüketiminin, 2030 yılına kadar 2012 yılına kıyasla yaklaşık %85 oranında artacağı öngörülmektedir (Duan & Chen, 2016). Konvansiyonel enerji santrallerinde elektrik üretimi ve soğutma suyu ihtiyacı bu tüketimin önemli bir bölümünü oluştururken; yakıt üretimi, ulaştırma, temizlik ve tarımsal sulama gibi süreçlerde de su hayati bir rol üstlenmektedir (Howells & Rogner, 2014; Yang et al., 2010). Bu bağlamda enerji sektörü, küresel ölçekte tarım sektöründen sonra en fazla su kullanan ikinci sektör konumundadır (Hightower & Pierce, 2008).

Öte yandan su, enerji kadar kritik bir kaynaktır. Biyolojik yaşamın devamı için elzem olmasının yanı sıra ekonomik faaliyetleri, sanayi üretimini, verimliliği ve sosyoekonomik kalkınmayı doğrudan etkilemektedir. Dünya genelinde özellikle yarı kurak bölgelerde su kıtlığı önemli bir tehdit haline gelmiş; artan nüfus ile birlikte suya erişim sorunları daha belirgin bir boyut kazanmıştır (Başeşme, 2003). Elektrik üretimi ile su temini arasında güçlü ve ayrılmaz bir bağ bulunduğundan, bu sistemlerden birinde yaşanan aksaklık diğerini de doğrudan etkilemektedir (Yang & Chen, 2016).

Artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme süreçleri, su ve enerji talebinin hızla yükselmesine neden olmaktadır. Bu talebi azaltmanın en etkili yollarından biri, mevcut kaynakların verimli kullanılması ve israfın önlenmesidir. Evsel ve endüstriyel tüketimde enerji verimliliği yüksek cihazların tercih edilmesi, su tasarrufunu artıran teknolojilerin yaygınlaştırılması ve bilinçli tüketim alışkanlıklarının geliştirilmesi bu açıdan büyük önem taşımaktadır (AlternaTürk, 2013). Aksi halde sınırlı fosil kaynaklara bağımlılık, hammadde darboğazları ve artan çevresel baskılar hem enerji hem de su temini açısından sürdürülebilirliği tehdit etmektedir (Siyaset Ekonomi Yönetim, 2014).

Yapılan projeksiyonlar, gelecekte enerji ve su arasındaki karşılıklı bağımlılığın daha da artacağını göstermektedir. 2060 yılı itibarıyla dünya enerji ihtiyacının 2002 yılına kıyasla yaklaşık %60 oranında artacağı ve bu süreçte hem su temini için daha fazla enerjiye hem de enerji üretimi için daha fazla suya ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (EMO, 2014; Malik, 2002). Bu durum, literatürde “enerji–su nüfuzu” olarak tanımlanan çift yönlü baskının daha da güçleneceğine işaret etmektedir. Nüfus artışına paralel olarak kişi başına düşen yıllık su miktarı da azalmaktadır. 1950 yılında kişi başına yaklaşık 16.800 m^3 olan su miktarı, 2000 yılında 7.300 m^3’e düşmüş; bu değerin 2025 yılında yaklaşık 4.800 m^3 seviyesine gerilemesi beklenmektedir (Nevşehir Üniversitesi, 2014).

Dünya genelinde tatlı su kullanımının yaklaşık %70'i tarımda, %22'si enerji sektöründe ve %8'i evsel–endüstriyel alanlarda gerçekleşmektedir. Bu nedenle su–enerji ilişkisine yönelik akademik çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir (Tan & Zhi, 2016). Pekin'de endüstriyel sistemlerin su–enerji ilişkisini inceleyen Lu ve Chen (2016), Brezilya'da düşük gelirli hanelerde su ve kanalizasyon hizmetlerinin enerji tasarrufu potansiyelini araştıran Vieira ve Ghisi (2016) ile İspanya'da biyoyakıt tüketiminin sanal su ve enerji ayak izi üzerindeki etkilerini değerlendiren Galan-del-Castillo ve Velazquez (2010) bu alandaki önemli çalışmalara örnek teşkil etmektedir. Küresel ölçekte su ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik programların geliştirilmesi ve ulusal stratejilerin uygulanması da bu eğilimin doğal bir sonucudur (Malik, 2002).

Bu çalışmanın amacı, enerji üretiminde kullanılan makine ve tesislerde suyun doğrudan ve dolaylı etkilerini inceleyerek, suyun sistem performansı üzerindeki rolünü değerlendirmek ve su–enerji ilişkisinin mühendislik bakış açısıyla verimli biçimde yönetilebilmesine yönelik çıkarımlar sunmaktır. Bu kapsamda, suyun yoğun olarak kullanıldığı enerji üretim sistemleri ile enerjinin kritik rol üstlendiği su temin süreçleri karşılıklı olarak ele alınmış ve bu iki unsurun birbirini tamamlayan yapısı ortaya konulmuştur.

ENERJİ KAYNAKLARI VE ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİ

1. Enerji Kaynakları

Enerji, farklı doğal ve yapay enerji kaynakları kullanılarak elde edilmektedir. Enerji kaynakları genel olarak yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji kaynakları yenilenemeyen enerji kaynakları grubunda yer alırken; rüzgâr, güneş, hidrolik, jeotermal, biyokütle, dalga, gel-git ve hidrojen enerjileri yenilenebilir enerji kaynakları kapsamında değerlendirilmektedir (Howells & Rogner, 2014; EMO, 2014).

Enerji kaynakları, elektrik enerjisine dönüştürülebilme özelliklerine göre de sınıflandırılabilmektedir. Bu çerçevede enerji kaynakları; termik kaynaklar, hidrolik kaynaklar, nükleer kaynaklar ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal vb.) şeklinde gruplandırılmaktadır (Başeşme, 2003).

Termik kaynaklar, uygun koşullar altında ısı enerjisi üretebilen katı, sıvı ve gaz yakıtları kapsamaktadır. Günümüzde enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan termik kaynaklar arasında kömür, petrol, doğal gaz, biyogaz,

asfaltit, bitümlü şistler ve büyük yerleşim alanlarından kaynaklanan katı atıklar yer almaktadır. Bu yakıtların yakılması sonucu elde edilen ısı enerjisi, çeşitli termodinamik çevrimler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Howells & Rogner, 2014).

Enerji üretiminde kullanılan bir diğer önemli kaynak grubu ise nükleer enerji kaynaklarıdır. Toryum, plütonyum ve uranyum gibi radyoaktif elementlerin atom çekirdeklerinin nükleer santrallerde kontrollü olarak parçalanması (fisyon) sonucu açığa çıkan ısı enerjisi, tıpkı termik santrallerde olduğu gibi elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Nükleer enerji, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte; güvenlik, atık yönetimi ve çevresel etkiler açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir enerji türüdür (EMO, 2014; Ackerman & Fisher, 2013).

Hidrolik enerji, akarsuların ve deniz seviyesinden yüksekte bulunan göllerin sahip olduğu potansiyel enerjinin değerlendirilmesiyle elde edilmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden yararlanılmaktadır. Hidroelektrik enerji, yerli ve yenilenebilir bir kaynak olması nedeniyle Türkiye açısından stratejik öneme sahiptir (Başeşme, 2003).

Diğer enerji kaynakları grubu ise güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, dalga ve gel-git gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kapsamaktadır. Bu kaynaklar, çevresel etkilerinin görece düşük olması ve sürdürülebilir nitelikleri nedeniyle günümüzde giderek artan bir öneme sahiptir (Tan & Zhi, 2016).

Türkiye'de yer altı enerji kaynaklarının ülke ihtiyacını karşılamada yetersiz kalması ve enerji talebinin sürekli artması, dışa bağımlılığı artırmaktadır. Elektrik üretiminde önemli paya sahip olan doğal gaz, kömür, linyit ve fuel-oil gibi fosil yakıtların büyük bölümü ithal edilmektedir. Kullanılan petrolün yaklaşık %92'si, doğal gazın ise %99'a yakını dış kaynaklardan temin edilmektedir (EMO, 2014).

Bu nedenle enerji kaynaklarının güvenli, sürekli ve kabul edilebilir maliyetlerle tüketiciye ulaştırılması temel hedefler arasında yer almaktadır (Howells & Rogner, 2014). Türkiye'de enerji üretiminin artırılması, dışa bağımlılığın azaltılması ve yerli kaynakların daha etkin kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ile mümkün olabilecektir. Günümüz koşullarında Türkiye için yenilenebilir enerji kaynakları arasında en avantajlı, ekonomik ve çevre dostu enerji kaynağı suya dayalı çalışan hidroelektrik santraller olarak öne çıkmaktadır (Başeşme, 2003; EMO, 2014).

2. Enerji Üretim Sistemleri

Enerjiyi bir biçimden başka bir biçime dönüştüren makine veya tesisler enerji dönüşüm sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler tek bir makineden oluşabileceği gibi, birden fazla alt bileşeni içeren karmaşık tesisler şeklinde de tasarlanabilmektedir. Enerji dönüşüm sistemlerinin temel

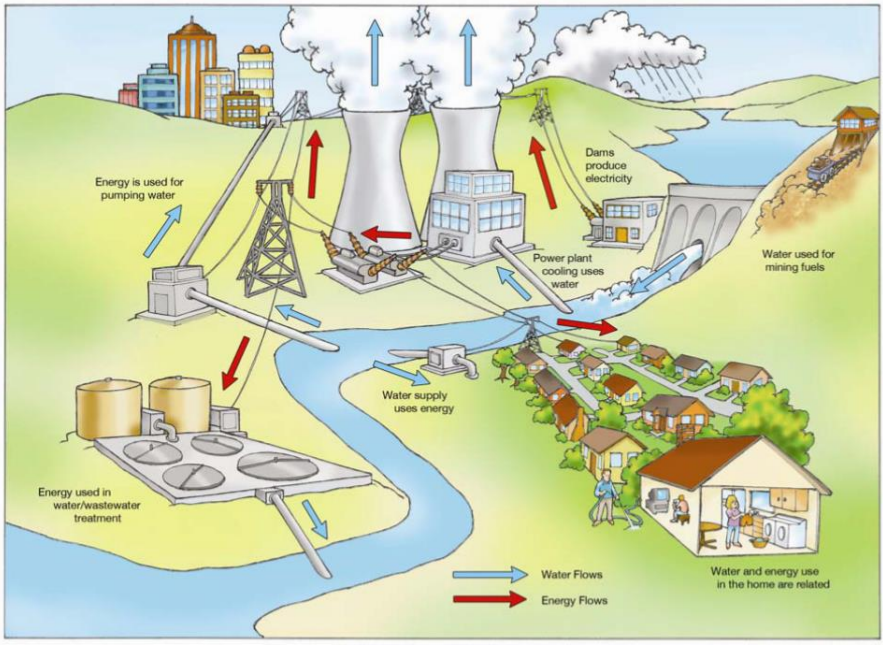
amacı, birincil enerji kaynaklarında bulunan enerjinin kullanılabilir ve ekonomik bir enerji türüne dönüştürülmesidir (Carrillo & Frei, 2009).
Bir termik makinede enerji dönüşümü, yakıtta bulunan kimyasal enerjinin yanma sonucu önce ısı enerjisine, ardından çalışma akışkanının genleşmesiyle kinetik enerjiye dönüşmesiyle gerçekleşmektedir. Gazın genleşmesi sonucu oluşan kinetik enerji pistonun doğrusal hareketine, bu hareket ise biyel kolu ve krank mili aracılığıyla dairesel harekete dönüştürülmektedir. Elde edilen mekanik enerji, iletim organları yardımıyla son kullanıcıya aktarılmaktadır (Howells & Rogner, 2014).
Enerji santralleri, enerji üretimini gerçekleştiren tüm makine, ekipman ve yardımcı sistemlerin bir araya gelmesiyle oluşan tesislerdir. Bu santraller; jeotermal, hidrolik, nükleer, termik, rüzgâr ve gel-git gibi farklı doğal enerji kaynaklarını kullanarak öncelikle mekanik enerji, ardından jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisi üretmektedir (Tan & Zhi, 2016).
Kömürlü termik santrallerde enerji dönüşüm süreci çok aşamalıdır. Kömürün kazanlarda yakılmasıyla yakıtın kimyasal enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmekte; bu ısı ile elde edilen buharın kinetik enerjisi türbinleri döndürerek mekanik enerji üretmektedir. Türbin miline bağlı jeneratörler sayesinde bu mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilmektedir. Doğal gaz ve fuel-oil gibi yakıtlarla çalışan diğer termik santraller de temel olarak aynı prensiplerle çalışmaktadır (Howells & Rogner, 2014).
Yakıtın yanması sonucu termik makinelerde sıcaklık değerleri oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Bu durum, metal malzemelerde genleşmeye ve malzeme özelliklerinin bozulmasına yol açarak sistemin güvenli ve verimli çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle yakıtla çalışan termik sistemlerde soğutma işlemi zorunludur. Termik santrallerde soğutma işlemi çoğunlukla su ile gerçekleştirildiğinden, bu tür enerji üretim sistemlerinde su kritik bir öneme sahiptir (Yang & Chen, 2016).
Suyun enerji dönüşümünde doğrudan rol oynadığı bir diğer sistem ise hidroelektrik santralleridir. Enerji dönüşüm prensipleri açısından termik ve hidroelektrik santraller karşılaştırıldığında, her iki sistemin son aşamalarında türbin ve jeneratör bileşenlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak ilk enerji kaynağı ve dönüşüm mekanizmaları farklıdır (Başeşme, 2003).
Termik santrallerde yakıtın yanmasıyla elde edilen ısı enerjisi suya aktarılmakta ve buharlaşma yoluyla türbinler döndürülmektedir. Hidroelektrik santrallerde ise suyun potansiyel enerjisi cebri borular aracılığıyla kinetik enerjiye dönüştürülmekte, bu enerji türbinleri döndürerek mekanik enerjiye ve ardından jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir (Başeşme, 2003).
Sonuç olarak su, hem termik hem de hidroelektrik santrallerde enerji üretiminin temel ve vazgeçilmez unsurlarından biridir. Termik santrallerde su, enerji üretimi ve soğutma amacıyla kullanılırken; hidroelektrik santrallerde doğrudan enerji üretiminin ana girdisini oluşturmaktadır (Yang & Chen, 2016).

ENERJİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SU–ENERJİ İLİŞKİSİ

1. Su Sektörü ve Enerji

Su ve enerji, modern toplumların sürdürülebilirliği açısından birbirini tamamlayan ve ayrılmaz biçimde birbirine bağlı iki temel kaynaktır. Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği üzere, suyun temini, arıtılması, taşınması ve kullanımı için enerjiye; enerji üretiminin önemli bir bölümünde ise suya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu karşılıklı bağımlılık, günümüzde literatürde "su–enerji ilişkisi" (water–energy nexus) kavramı ile ifade edilmektedir (Howells & Rogner, 2014; Wakeel et al., 2016).

Su sektörü; içme ve kullanma suyu temini, tarımsal sulama, endüstriyel kullanım, atık su arıtımı ve deniz suyunun tuzdan arındırılması gibi geniş bir süreçler bütününü kapsamaktadır. Bu süreçlerin tamamında pompalama, basınçlandırma, arıtma ve iletim gibi işlemler için önemli miktarda enerji tüketilmektedir. Bu nedenle su sektörü, enerji yoğun sektörler arasında yer almakta ve enerji politikalarından doğrudan etkilenmektedir (Garcia & You, 2016; Wakeel et al., 2016). Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, yalnızca su güvenliği açısından değil, aynı zamanda enerji arz güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir (Scott et al., 2011).



Şekil 1. Su ile enerji arasındaki ilişkiyi gösteren bir örnek, (U.S. Department of Energy (2006)).

2. Enerji Sektörü ve Su

Enerji ve su arasındaki karşılıklı ilişki, enerji sektöründe daha belirgin bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Enerji üretim süreçlerinde su, hem doğrudan enerji üretiminde hem de soğutma amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Suyun yoğun olarak kullanıldığı enerji üretim sistemleri arasında hidroelektrik ve buharla çalışan termik santraller başta olmak üzere; jeotermal santraller, gelgit (med-cezir) enerji santralleri, dalga enerjisi santralleri, okyanus ısıl enerji dönüşüm sistemleri (OIED), nükleer santraller, dizel santraller ve içten yanmalı motorlar yer almaktadır (Carrillo & Frei, 2009; Siddiqi & Anadon, 2011).

Bu enerji üretim sistemlerinin bir kısmında su yalnızca enerji üretiminde kullanılırken, bir kısmında ise hem enerji üretimi hem de soğutma amacıyla kullanılmaktadır. Hidroelektrik, dalga, gelgit ve jeotermal enerji santrallerinde su, doğrudan enerji üretiminin ana girdisini oluştururken; termik ve nükleer santraller ile termik makinelerin büyük çoğunluğunda su, esas olarak soğutma işlemleri için kullanılmaktadır (Başeşme, 2003; Yang & Chen, 2016).

Enerji dönüşüm sistemleri arasında yer alan buharla çalışan termik santraller, dıştan yanmalı motorlar ve nükleer santraller, suyu hem enerji üretimi hem de soğutma amacıyla kullanırken hidroelektrik ve jeotermal enerji santrallerinde su yalnızca enerji üretiminde rol oynamaktadır. Bununla beraber içten yanmalı motorlarda su esas olarak soğutma amacıyla kullanılmaktadır (Howells & Rogner, 2014).

Enerji üretim sistemleri su tüketimi açısından karşılaştırıldığında; güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı sistemlerin en az su tüketen teknolojiler olduğu, buna karşılık nükleer enerji üretim sistemlerinin en yüksek su tüketimine sahip olduğu bilinmektedir (Hightower & Pierce, 2008; Tan & Zhi, 2016). Bu durum, enerji üretim teknolojilerinin planlanması ve seçimi aşamasında, su kaynaklarının mevcudiyeti ve sürdürülebilir kullanımının mutlaka dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır (Zhang & Anadon, 2013).

Netice olarak enerji ve su arasındaki bu güçlü ve çift yönlü ilişki, her iki sektörün planlanmasında entegre bir yaklaşım benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Su kaynaklarının korunması ve enerji verimliliğinin artırılması, hem enerji arz güvenliğinin sağlanması hem de çevresel sürdürülebilirliğin teminat altına alınması açısından büyük önem taşımaktadır (Scott et al., 2011; Malik, 2002).

ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE SUYUN ÖNEMİ

1. Termik Makineler (Motorlar) ve Su

Termik makineler, ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir ve çalışma prensiplerine göre içten yanmalı ve dıştan yanmalı makineler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Çengel & Boles, 2019). İçten yanmalı motorlar, yakıtın kapalı bir hacim içerisinde yanması ve yanma sonucu oluşan yüksek basınçlı gazların pistonları hareket ettirmesi esasına dayanırken; dıştan yanmalı makinelerde yakıt sistem dışında yakılmakta ve açığa çıkan ısı enerjisi genellikle su gibi bir akışkana aktarılmaktadır (Heywood, 2018).

Günümüzde içten yanmalı motorlar kara taşıtlarında yaygın olarak kullanılmakta, dıştan yanmalı motorlar ise tarihsel olarak buharlı lokomotiflerde ve günümüzde sanayi tesislerinde yer almaktadır (Arasındaki Fark, 2023). Termik makinelerde soğutma sistemlerinin temel amacı, motor içerisinde oluşan fazla ısının uzaklaştırılması ve motorun optimum çalışma sıcaklığında tutulmasıdır. Soğutma sisteminin bulunmaması durumunda motor parçalarında ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir (Stone, 2012).

Soğutma işlemi genellikle motor bloğu ve silindir kapağı içerisinden geçirilen su veya su–antifriz karışımı yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Isınan soğutma sıvısı radyatörde fan yardımıyla soğutularak tekrar devridaime alınmaktadır (Pulkrabek, 2014). Günümüzde otomobil motorlarının büyük çoğunluğu sıvı soğutma sistemine sahiptir (SekizSilindir, 2023).

Enerji üretiminde biyokütle kullanımının artması, su tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Gleick (2014), biyoyakıt (etanol) kullanan bir aracın 1,6 km yol alabilmesi için yaklaşık 125 litre sulama suyuna ihtiyaç duyulduğunu belirtirken; Webber (2010), benzinli araçlarda bu miktarın 0,25–0,50 litre seviyesinde kaldığını ifade etmiştir. ABD'de biyoyakıt programı kapsamında 57 milyar litre etanol üretimi için yıllık yaklaşık 6 milyar m^3 su tüketildiği raporlanmıştır (DOE, 2007).

2. Termik Santrallerde Suyun Önemi

Termik santrallerin en belirgin özelliği, yüksek miktarda suya ihtiyaç duymalarıdır. Kömür, doğal gaz, güneş ve nükleer santrallerde temel prensip, ısı enerjisi yardımıyla suyun buhara dönüştürülmesi ve buhar türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisi üretilmesidir (Çengel & Boles, 2019). Bu nedenle termik santraller genellikle su kaynaklarına yakın bölgelerde kurulmaktadır.

Soğutma suyu denizden temin edilen santrallerde, su alma ve deşarj yapıları ile pompalama sistemleri kurulmakta ve su santral ekipmanlarına zarar vermemesi için arıtılmaktadır (IEA, 2016). NREL verilerine göre, kömürlü termik santraller 1 MWh elektrik üretimi başına yaklaşık 2600 litre su

tüketirken, nükleer santrallerde bu değer 2550 litre/MWh seviyesindedir. Güneş enerjisinde ise bu miktar yaklaşık 100 litre/MWh'dir (NREL, 2013).
TÜİK verilerine göre Türkiye'de 2012 yılında termik santraller tarafından kullanılan toplam su miktarı yaklaşık 6,4 milyar m^3 olup, bu değer ülke nüfusunun toplam yıllık su tüketiminin yaklaşık %6'sına karşılık gelmektedir (TÜİK, 2013). Afşin–Elbistan Termik Santrali örneğinde görüldüğü üzere, kömür yıkama, buhar üretimi ve soğutma süreçlerinde son derece yüksek miktarda su kullanılmaktadır (EÜAŞ, 2019).
ABD Jeoloji Araştırma Kurumu (USGS), ülkede çekilen toplam tatlı ve deniz suyunun yaklaşık yarısının termoelektrik santrallerde soğutma amacıyla kullanıldığını raporlamıştır (USGS, 2015). Petrol üretiminde ise bir varil petrol için 2–10 varil arasında su tüketildiği belirtilmektedir (IEA, 2012).

2.1. Nükleer Santraller ve Su

Nükleer santrallerde elektrik üretimi, fisyon reaksiyonları sonucu açığa çıkan ısının buhar çevrimi yoluyla elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Reaktörde üretilen ısının yalnızca yaklaşık %33'ü elektriğe dönüştürülebilirken, geri kalan kısmı soğutma sistemleriyle uzaklaştırılmaktadır (NETL, 2006).
ABD Enerji Bakanlığı verilerine göre, ülkedeki 103 nükleer reaktörün günlük toplam soğutma suyu kullanımı yaklaşık 182 milyar litre düzeyindedir (DOE, 2006). Açık çevrim sistemlerde 1 kWh elektrik üretimi için yaklaşık 120 litre suya ihtiyaç duyulurken, kapalı devre sistemlerde bu miktar 4 litre/kWh seviyesine düşmektedir (NETL, 2006).
Akkuyu Nükleer Güç Santrali için öngörülen deniz suyu kullanımı, seçilen soğutma sistemine bağlı olarak 4–100 litre/kWh aralığında değişmektedir (TAEK, 2018).

2.2. Jeotermal Enerji Santralleri ve Su

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu sıcak su, buhar ve gazlardan elde edilen bir enerji türüdür (Dickson & Fanelli, 2013). Kaynaklar sıcaklıklarına göre düşük, orta ve yüksek sıcaklıklı sahalar olarak sınıflandırılmaktadır.
Jeotermal enerji; elektrik üretimi, konut ve sera ısıtması, endüstriyel prosesler ve termal turizm gibi alanlarda kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklı jeotermal akışkanların, termik santrallerde kazan besleme suyunun ön ısıtılmasında kullanılması, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmaktadır (DiPippo, 2016).
Türkiye, jeotermal potansiyel bakımından dünyada önde gelen ülkeler arasında yer almakta olup, bilinen sahaların yaklaşık %95'i doğrudan kullanım ve ısıtma amaçlıdır (MTA, 2020).

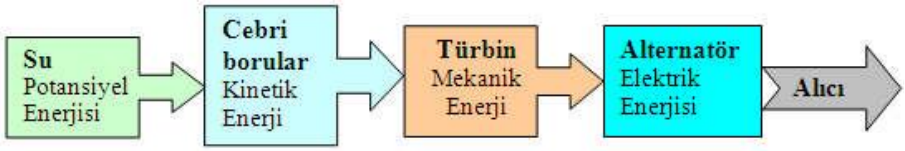
Tablo 1. Termik santrallerde enerji– su ilişkisi

Santral Türü	Suyun Rolü	Enerji Dönüşüm Mekanizması	Suyun Sistemdeki Önemi
Kömürlü termik santral	Buhar üretimi + yoğun soğutma	Kimyasal → ısı → mekanik → elektrik	Çok yüksek su çekimi ve tüketimi
Doğalgazlı buharlı güç santrali	Buhar üretimi + soğutma	Kimyasal → ısı → mekanik → elektrik	Yüksek
Doğalgaz kombine çevrim santrali	Buhar üretimi + kondenser soğutması	Brayton + Rankine çevrimi	Orta–yüksek
Fuel-oil / dizel santral	Soğutma + yardımcı sistemler	Kimyasal → ısı → mekanik → elektrik	Orta
Nükleer enerji santrali	Buhar üretimi + çok yoğun soğutma	Nükleer → ısı → mekanik → elektrik	Çok yüksek (çekim bazlı)
Jeotermal enerji santrali	Çalışma akışkanı + reenjeksiyon	Yer altı ısısı → buhar/ORC → mekanik → elektrik	Orta (kapalı çevrimlerde düşük)

Şekil 2'de görüldüğü üzere, termik santrallerde enerji dönüşümü, yakıtın kimyasal enerjisinin önce ısı enerjisine, ısı enerjisinin mekanik enerjiye ve son aşamada elektrik enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanırken; hidrolik santrallerde enerji dönüşümü, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin doğrudan mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır.



a) Termik santral enerji dönüşüm şeması



b) Hidroelektrik santral enerji dönüşüm şeması

Şekil 2. Enerji santrallerinde enerji dönüşüm şeması (www.megep.meb.gov.tr)

3. Termik Olmayan Enerji Santrallerinde Suyun Önemi

Termik olmayan enerji santralleri, elektrik üretiminde fosil yakıt yakılmasına dayalı bir ısı çevrimi kullanmayan sistemlerdir. Bu santrallerde enerji dönüşümü; suyun potansiyel, kinetik veya periyodik hareketlerinden ya da doğrudan doğal çevresel süreçlerden elde edilir. Özellikle hidroelektrik, dalga, gel-git ve okyanus akıntı enerjisi santrallerinde su, yalnızca yardımcı bir unsur değil, birincil enerji kaynağıdır (IEA, 2023; IRENA, 2020).

Tablo 2. Termik olmayan enerji santrallerinde enerji– su ilişkisi

Enerji Santrali Türü	Suyun Rolü	Enerji Dönüşüm Mekanizması	Suyun Sistemdeki Önemi
Hidroelektrik	Birincil enerji kaynağı	Potansiyel + kinetik enerji → mekanik → elektrik	Üretim tamamen suya bağlı
Dalga enerjisi	Enerji taşıyıcısı	Dalga hareketi (kinetik) → mekanik → elektrik	Dalga rejimi kritik
Gel-git enerjisi	Enerji depolayıcı ve taşıyıcı	Seviye farkı ve akıntı → türbin → elektrik	Öngörülebilir üretim
Okyanus akıntı enerjisi	Sürekli enerji ortamı	Akıntı kinetiği → su altı türbini → elektrik	Kesintisiz su hareketi
Rüzgâr enerjisi	Dolaylı / sınırlı	Hava kinetiği → mekanik → elektrik	Soğutma & temizlik
Güneş PV	Dolaylı / minimum	Işınım → elektrik (doğrudan)	Panel temizliği

3.1. Hidroelektrik Enerji Santralleri ve Su

Enerji üretiminde suyun rolünün en belirgin olduğu sistemlerin başında hidroelektrik santraller gelmektedir. Hidroelektrik santraller (HES), akan

suyun sahip olduğu potansiyel ve kinetik enerjiyi, herhangi bir termal çevrim kullanmaksızın doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren tesislerdir. Bu santrallerde elde edilebilecek enerji miktarı, suyun debisi ve düşü yüksekliği ile doğru orantılıdır (Çengel & Boles, 2019). Büyük nehirlerde yüksek enerji potansiyeline sahip olan suyun etkin biçimde değerlendirilmesi amacıyla akarsular üzerinde barajlar inşa edilmekte ve böylece suyun potansiyel enerjisi artırılmaktadır (Paish, 2002).

Baraj göllerinde depolanan su, kanal veya cebri borular aracılığıyla türbinlere yönlendirilmekte; türbinlerin dönmesiyle elde edilen mekanik enerji, jeneratörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu süreç, hidroelektrik santrallerin temel çalışma prensibini oluşturmaktadır (Güney, 2018). Hidroelektrik santrallerde su, sistemin doğrudan ve vazgeçilmez enerji kaynağı olup, üretim kapasitesi suyun debisi, düşü yüksekliği ve sürekliliği gibi hidrolik parametrelere bağlıdır (EIA, 2024).

Hidroelektrik enerji, dünya genelinde elektrik üretiminde önemli bir paya sahiptir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, küresel elektrik üretiminin yaklaşık %20'si hidroelektrik santrallerden karşılanmaktadır (IEA, 2022). Türkiye'de ise 2023 yılı elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı incelendiğinde, toplam üretimin yaklaşık %19,6'sının hidroelektrik enerjiden sağlandığı görülmektedir. Aynı yıl kömür %36,3, doğal gaz %21,4, rüzgâr %10,4, güneş %8,7, jeotermal %3,4 ve diğer kaynaklar %3,2 oranında pay almıştır (TEİAŞ, 2024).

Hidroelektrik santraller genellikle barajlar, göletler ve akarsu havzaları üzerinde kurulmakta; bu sayede suyun depolanması ve kontrollü kullanımı mümkün olmaktadır. Barajlı hidroelektrik santraller, elektrik üretiminin sürekliliğini artırarak enerji arz güvenliğine katkı sağlamakta ve Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedefleri ile enerji ithalatına olan bağımlılığın azaltılması açısından stratejik bir rol üstlenmektedir (IEA, 2022; EPDK, 2023).

3.2 Dalga Enerjisi Santralleri ve Su

Dalga enerjisi santralleri, rüzgârın deniz yüzeyinde oluşturduğu dalgaların salınım hareketinden yararlanır. Su, bu sistemlerde hem enerji taşıyıcısı hem de mekanik dönüşüm ortamıdır. Dalga yüksekliği, periyodu ve yönü enerji üretim potansiyelini belirleyen temel parametre olup dalga enerjisi sistemlerinde elektrik üretimi, deniz suyunun periyodik hareketine doğrudan bağlıdır (IRENA, 2020).

3.3 Gel-Git (Tidal) Enerji Santralleri ve Su

Gel-git enerji santrallerinde su, Ay ve Güneş'in çekim etkisiyle düzenli olarak yükselip alçalır. Bu süreçte oluşan seviye farkı ve akıntılar, türbinlerin dönmesini sağlar. Su burada hem potansiyel enerji deposu hem de kinetik enerji kaynağıdır. En önemli avantajı, üretimin yüksek öngörülebilirliğe sahip olmasına ek olarak gel-git enerji santrallerinde suyun

periyodik hareketi, sürdürülebilir ve tahmin edilebilir bir enerji kaynağı sunar (IEA, 2023).

3.4 Okyanus Akıntı Enerjisi Santralleri ve Su

Okyanus akıntı enerjisi santralleri, sürekli ve yönlü deniz akıntılarının kinetik enerjisinden yararlanır. Su altına yerleştirilen türbinler, rüzgâr türbinlerine benzer şekilde çalışır. Bu sistemlerde su, kesintisiz enerji akışı sağlayan bir ortam görevi görür. Ayrıca okyanus akıntıları, süreklilikleri sayesinde baz yük üretimine uygun termik olmayan enerji kaynakları arasında yer alabilir (PNNL, 2023).

3.5 Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Santrallerinde Su

Rüzgâr ve güneş fotovoltaik santrallerde su, enerji üretiminde birincil rol oynamaz. Ancak panel temizliği, ekipman soğutması ve toz kontrolü gibi yardımcı süreçlerde sınırlı miktarda kullanılır. Buna rağmen bu sistemlerin su ayak izi, termik santrallere kıyasla oldukça düşüktür (IRENA, 2019).

SONUÇ

Enerji üretim sistemleri ile su kaynakları arasındaki ilişki, mühendislik açısından değerlendirildiğinde karşılıklı bağımlılığa dayalı, çok boyutlu ve stratejik bir yapı sergilemektedir. Günümüzde enerji arz güvenliği, sistem verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri; enerji–su etkileşiminin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Mühendislik sistemleri açısından bakıldığında, enerji ve su ülkelerin kalkınmasında temel girdiler olup, biri olmadan diğerinin etkin ve güvenli biçimde yönetilmesi mümkün değildir. Enerji üretiminde suya duyulan ihtiyaç ile suyun temini, taşınması ve arıtılmasında enerjiye olan bağımlılık, bu iki kaynağı teknik, ekonomik ve çevresel açıdan ayrılmaz hâle getirmektedir.

Termik olmayan enerji dönüşüm sistemlerinde su, çoğu zaman doğrudan enerji kaynağı olarak sistemin merkezinde yer almaktadır. Hidroelektrik santrallerde suyun potansiyel ve kinetik enerjisi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülürken; dalga, gelgit ve okyanus akıntı santrallerinde deniz suyunun hareketi enerji üretiminin temelini oluşturmaktadır. Jeotermal santrallerde ise yer altındaki sıcak su ve buhar, doğrudan türbinleri besleyen akışkan olarak görev yapmakta; bu sistemler hem termik hem de akışkan temelli özellikler göstermektedir. Bu santral türlerinde su, herhangi bir ara

yakıt veya dolaylı çevrim olmaksızın enerji üretim sürecinin asli bileşeni konumundadır.

Termik enerji santrallerinde ise su, doğrudan enerji kaynağı olmaktan ziyade çevrimin sürekliliğini ve güvenliğini sağlayan kritik bir yardımcı akışkan olarak kullanılmaktadır. Kömür, doğal gaz, nükleer ve güneş termik santrallerde su; buhar üretimi, kondenser soğutması ve ısı transferi süreçlerinde vazgeçilmezdir. Buhar çevrimli santrallerde su, hem enerji dönüşümünün taşıyıcısı hem de sistemin soğutulmasını sağlayan temel unsurdur. Bu nedenle söz konusu santraller, mühendislik tasarımı açısından yüksek miktarda ve sürekli su temin edilebilecek bölgelerde konumlandırılmak zorundadır.

Yüksek sıcaklıklarla çalışan termik sistemlerde malzeme dayanımı, verimlilik ve işletme güvenliği büyük ölçüde etkin soğutmaya bağlıdır. İçten yanmalı motorlarda ve buhar kazanlarında oluşan aşırı sıcaklıkların kontrol altına alınabilmesi için suyla yapılan soğutma hayati öneme sahiptir. Bu durum, suyun yalnızca çevresel bir kaynak değil, aynı zamanda sistem bütünlüğünü koruyan mühendislik bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır.

Diğer taraftan su temini süreçlerinin kendisi de önemli ölçüde enerjiye bağımlıdır. İçme ve kullanma suyunun pompalanması, dağıtımı, atık suların arıtılması ve deniz suyunun tuzdan arındırılması gibi işlemler yüksek enerji tüketimi gerektirmekte; bu durum enerji–su ilişkisinin çift yönlü olduğunu açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, enerji ve su arasındaki bu güçlü teknik etkileşim, mühendislik tasarımında entegre planlama yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Termik ve termik olmayan enerji dönüşüm sistemlerinin seçiminde; su kaynaklarının mevcudiyeti, sürekliliği, çevresel etkiler ve sistem verimliliği birlikte değerlendirilmelidir. Enerji–su ilişkisinin sürdürülebilir biçimde yönetilebilmesi için su verimliliği yüksek teknolojilerin geliştirilmesi, alternatif soğutma yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve kaynakların etkin kullanımı, mühendislik uygulamalarında kritik öneme sahiptir.

REFERANSLAR

Ackerman, F., & Fisher, J. (2013). Is there a water–energy nexus in electricity generation? Long-term scenarios for the western United States. Energy Policy, 59, 235–241. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.027

AlternaTürk. (2013). Enerji ve çevre üzerine değerlendirmeler. https://www.alternaturk.org

Başeşme, H. (2003). Hidroelektrik santraller ve hidroelektrik santral tesisleri. Ankara.
Carrillo, A. M. R., & Frei, C. (2009). Water: A key resource in energy production. Energy Policy, 37(11), 4303–4312. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.050
Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). McGraw-Hill Education.
Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). Geothermal energy: Utilization and technology. Routledge.
DiPippo, R. (2016). Geothermal power plants (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
DOE. (2006). Energy demands on water resources. U.S. Department of Energy.
DOE. (2007). Biofuels and water use. U.S. Department of Energy.
Duan, C., & Chen, B. (2016). Energy–water nexus of international energy trade of China. Applied Energy. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.150
EMO (Elektrik Mühendisleri Odası). (2014). Enerji için su, su için enerji ve tarımsal sulamalar. EMO İzmir Şubesi Yayını. https://www.emo.org.tr
EPDK. (2023). Türkiye elektrik piyasası sektörel raporu. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu.
EÜAŞ. (2019). Afşin–Elbistan Termik Santrali faaliyet raporu. Ankara.
Galan-del-Castillo, E., & Velazquez, E. (2010). From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain. Energy Policy, 38(3), 1345–1352. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.016
Garcia, D. J., & You, F. (2016). The water–energy–food nexus and process systems engineering: A new focus. Computers & Chemical Engineering, 91, 49–67. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.003
Gleick, P. H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. Pacific Institute.
Güney, M. S. (2018). Hidroelektrik santrallerin çalışma prensipleri ve enerji üretimi. Nobel Akademik Yayıncılık.
Hightower, M., & Pierce, S. A. (2008). The energy challenge. Nature, 452(7185), 285–286. https://doi.org/10.1038/452285a
Howells, M., & Rogner, H. H. (2014). Water–energy nexus: Assessing integrated systems. Nature Climate Change, 4(4), 246–247. https://doi.org/10.1038/nclimate2180
IEA. (2012). Water for energy. International Energy Agency.
IEA. (2016). World energy outlook. International Energy Agency.
IEA. (2022). Hydropower special market report. International Energy Agency.
IEA. (2023). Hydropower and marine energy. International Energy Agency. https://www.iea.org
IRENA. (2019). Water use in renewable energy. International Renewable Energy Agency.
IRENA. (2020). Ocean energy: Technology brief. International Renewable Energy Agency.
Kidim. (2013). Enerji ve su ilişkisi üzerine çalışmalar. https://kidim2013.wordpress.com
Li, H., Chien, S. H., Hsieh, M. K., Dzombak, D. A., & Vidic, R. D. (2011). Escalating water demand for energy production and the potential for use of treated municipal wastewater. Environmental Science & Technology, 45(10), 4195–4200. https://doi.org/10.1021/es104723x

Lu, Y., & Chen, B. (2016). Energy–water nexus in urban industrial systems. Energy Procedia, 88, 212–217. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.042
Malik, R. (2002). Water–energy nexus in resource-poor economies: The Indian experience. Water Resources Development, 18(1), 47–58. https://doi.org/10.1080/07900620220121657
MTA. (2020). Türkiye jeotermal enerji potansiyeli raporu. Ankara.
NETL. (2006). Estimating freshwater needs to meet future thermoelectric generation requirements. National Energy Technology Laboratory.
NREL. (2013). Water consumption of energy resource extraction. National Renewable Energy Laboratory.
Paish, O. (2002). Small hydro power: Technology and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6(6), 537–556. https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0
Scott, C. A., Pierce, S. A., Pasqualetti, M. J., Jones, A. L., Montz, B. E., & Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus. Energy Policy, 39(10), 6622–6630. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.013
Tan, C., & Zhi, Q. (2016). The energy–water nexus: A literature review of the dependence of energy on water. Energy Procedia, 88, 277–284. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.151
TEİAŞ. (2024). Türkiye elektrik üretim–iletim istatistikleri 2023. Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
U.S. Department of Energy. (2006). Report to Congress on the interdependency of energy and water. U.S. Department of Energy. http://www.sandia.gov/energy-water/congress_report.htm
USGS. (2015). Estimated use of water in the United States. U.S. Geological Survey.
Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2016). Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. Applied Energy, 178, 868–885. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.114
Webber, M. E. (2010). The water–energy nexus. Scientific American, 302(4), 34–41.
Yang, J., & Chen, B. (2016). Energy–water nexus of wind power generation systems. Applied Energy, 169, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.021
Zhang, C., & Anadon, L. D. (2013). Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China. Environmental Science & Technology, 47(24), 14459–14467. https://doi.org/10.1021/es402682x
EIA. (2024). Hydropower explained. U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/
PNNL. (2023). Tidal and ocean current energy. Pacific Northwest National Laboratory. https://www.pnnl.gov

5G NR Ağlarında Gecikme Duyarlı Optimizasyon: Derin Pekiştirmeli Öğrenme Perspektifi

Asuman SAVAŞCIHABEŞ[1]

1- Doç. Dr..; Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ahabes@nny.edu.tr ORCID No: 0000-0002-7261-1906

ÖZET

Beşinci nesil yeni radyo (5G NR) ağları, ultra düşük gecikme ve yüksek veri hızı gereksinimlerini aynı anda karşılamak zorundadır. Ancak dinamik kanal koşulları, değişken trafik yükleri ve kullanıcı hareketliliği, geleneksel kural tabanlı kaynak tahsisi ve güç kontrolü mekanizmalarının performansını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, 5G NR radyo erişim ağları için derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tabanlı, gecikme duyarlı dinamik kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımı önerilmektedir.

Önerilen yöntemde, 5G NR'nin esnek zaman–frekans kaynak yapısı dikkate alınarak, kanal ölçümleri, radyo kaynak doluluk oranları ve kuyruk gecikmeleri durum uzayı olarak tanımlanmıştır. Ajanın eylem uzayı, kullanıcı bazlı kaynak tahsisi ve iletim gücü ayarlama kararlarını kapsamaktadır. Öğrenme sürecini yönlendiren ödül fonksiyonu ise throughput maksimizasyonu ve gecikme minimizasyonu hedeflerini birlikte ele alan çok amaçlı bir yapı ile modellenmiştir.

Önerilen DRL tabanlı optimizasyon çerçevesi, MATLAB ortamında geliştirilen bir 5G NR sistem modeli üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, önerilen yaklaşımın geleneksel yöntemlere kıyasla gecikme performansında anlamlı iyileşmeler sağladığını ve throughput–gecikme dengesi açısından daha etkin bir kaynak yönetimi sunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, DRL tabanlı yöntemlerin 5G NR ağlarında gecikme kritik uygulamalar için güçlü bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – 5G New Radio, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Güç Analizi, Mobil Iletişim.

GİRİŞ

Beşinci nesil yeni radyo (5G NR) sistemleri, geliştirilmiş mobil geniş bant (eMBB) ve ultra güvenilir düşük gecikmeli haberleşme (URLLC) gibi farklı servis sınıflarının eş zamanlı olarak desteklenmesini hedeflemektedir (Boutiba & Ksentini, 2023). Özellikle gecikmeye duyarlı uygulamalar için uçtan uca gecikmenin minimize edilmesi, 5G radyo erişim ağlarının (RAN) temel tasarım hedeflerinden biri hâline gelmiştir. Ancak dinamik kanal koşulları, zamana bağlı trafik dalgalanmaları ve kullanıcı hareketliliği, geleneksel kural tabanlı kaynak tahsisi ve güç kontrolü mekanizmalarının bu gereksinimleri karşılamasını zorlaştırmaktadır(Zhang, Patras, & Haddadi, 2019).

5G NR, esnek numeroloji, değişken zaman–frekans kaynak yapısı ve gelişmiş bağlantı kontrol mekanizmaları sayesinde önceki nesil sistemlere kıyasla daha uyarlanabilir bir yapı sunmaktadır(Luong et al., 2019). Buna rağmen, NR'nin sunduğu bu esnekliğin etkin biçimde kullanılabilmesi,

karmaşık ve yüksek boyutlu optimizasyon problemlerinin gerçek zamanlı olarak çözülmesini gerektirmektedir. Bu tür problemlerde klasik optimizasyon yaklaşımları, hesaplama karmaşıklığı ve ölçeklenebilirlik açısından yetersiz kalabilmektedir.

Son yıllarda, makine öğrenmesi ve özellikle derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) yöntemleri(Bennis, Debbah, & Poor, 2018), kablosuz ağ optimizasyonu için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır. DRL, çevrim içi öğrenme yeteneği sayesinde ağ ortamından elde edilen gözlemler üzerinden en uygun kaynak yönetimi politikalarını öğrenebilmektedir(Ye, Li, & Juang, 2019). Literatürde DRL tabanlı yaklaşımların kaynak tahsisi, güç kontrolü ve gecikme optimizasyonu gibi problemlerde umut verici sonuçlar sunduğu gösterilmiştir (Huang, Li, Li, Hou, & Lou, 2020). Bununla birlikte, 5G NR'ye özgü gecikme duyarlı senaryoları hedefleyen ve kaynak tahsisi ile güç kontrolünü birlikte ele alan uygulamalı çalışmalar sınırlıdır (AlQwider, Rahman, & Marojevic, 2022).

Bu çalışmada, 5G NR radyo erişim ağları için derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı gecikme duyarlı dinamik kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yöntem, 5G NR'nin zaman–frekans kaynak yapısını dikkate alan bir sistem modeli üzerinde tanımlanmış ve MATLAB ortamında geliştirilen bir simülasyon çerçevesi ile değerlendirilmiştir. Amaç, throughput ve gecikme arasındaki dengeyi iyileştirerek kritik uygulamalar için daha etkin bir kaynak yönetimi sağlamaktır.

5G New Radio (NR), eMBB ve özellikle URLLC gibi gecikme-duyarlı servisleri aynı radyo arayüzü üzerinde desteklemek zorunda olduğundan, zaman–frekans kaynaklarının (PRB/RB, slot/mini-slot) dinamik ve bağlam farkındalıklı yönetimi kritik hâle gelmiştir (Park, Samarakoon, Bennis, & Latva-aho, 2019). URLLC tarafında milisaniye seviyesinde uçtan uca gecikme ve yüksek güvenilirlik gereksinimleri, yalnızca ortalama performans metriklerine dayalı klasik planlama ve güç kontrolü yaklaşımlarının yetersiz kalmasına yol açar; bu nedenle kararların kuyruk davranışı, gecikme ihlali olasılığı ve servis sürekliliği gibi risk odaklı ölçütlerle birlikte ele alınması gerekir.

Bu bağlamda Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL), değişken kanal koşulları, trafik dalgalanmaları ve çok hedefli kısıtlar altında (throughput–gecikme–enerji/ güç–adalet) çevrim içi karar vermede güçlü bir adaydır (Mismar, Evans, & Alkhateeb, 2019). Literatürde 5G NR bağlamında DRL;

- eMBB/URLLC çoklaması ve puncturing/preemption gibi zaman-frekans düzleminde kararlar,
- NR downlink planlama,
- gecikme ve kanal farkındalıklı kaynak tahsisi gibi görevlerde anlamlı kazanımlar göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı, 5G NR ağlarında gecikme duyarlı dinamik kaynak tahsisi ve güç kontrolünü tek bir DRL çerçevesinde formüle ederek

MATLAB tabanlı, tekrar üretilebilir bir sistem-seviyesi simülasyon akışı sunmaktır. Karar uzayı (PRB tahsisi + güç ayarı), durum uzayı (CQI/SINR, kuyruk/buffer, gecikme ve yük göstergeleri) ve ödül tasarımı (throughput + gecikme cezası + güç cezası) ayrıntılandırılarak, PF/RR gibi klasik planlayıcılar ve sezgisel güç kontrolü ile karşılaştırmalı bir değerlendirme sunulmuştur.

SİSTEM MODELİ (5G NR)

Ağ ve zamanlama modeli

Tek hücreli (veya çok hücreli genişletilebilir) 5G NR gNB ve Kadet UE için zaman, slot (ve isteğe bağlı mini-slot) indeksleriyle: $t = 1,2, \ldots$ frekans alanı PRB'lere bölünür: $b = 1, \ldots, B$. Ayrıca her slotta gNB, PRB'leri UElere atar ve (opsiyonel) her UE için iletim gücünü belirler.

Kanal ve PHY soyutlama

Kullanıcı (UE) $k$için slot t'de kanal kazancı $h_k(t)$, gürültü N_0, girişim $I_k(t)$ olmak üzere işaret-gürültü oranı:

$$\mathrm{SINR}_k(t) = \frac{P_k(t) \mid h_k(t) \mid^2}{N_0 + I_k(t)} \tag{1}$$

Şeklinde ifade edilirken, PRB bazlı veri hızı (basit Shannon-vari soyutlama) ise aşağıdaki denklem ile hespalanır:

$$R_k(t) = \sum_{b \in \mathcal{B}_k(t)} W_{\mathrm{PRB}} \log_2(1 + \mathrm{SINR}_{k,b}(t)) \tag{2}$$

Trafik ve Gecikme (Kuyruk) Modeli – URLLC Odaklı Matematiksel Tanım

Bu çalışmada, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli haberleşme (URLLC) servislerini temsil eden kullanıcı trafiği, kısa paketli ve gecikme kritik veri akışları olarak modellenmiştir. Her kullanıcı $k$için, gNB tarafında aşağı yönlü iletimleri temsil eden ayrı bir kuyruk tanımlanmıştır. Zaman, 5G

NR slot yapısına uygun olarak ayrık zaman adımlarına bölünmüş ve $t \in \{1,2, \dots\}$ ile gösterilmiştir.

URLLC trafiği için paket gelişleri, düşük gecikme gereksinimini yansıtacak şekilde stokastik fakat düşük varyanslı bir süreçle modellenmiştir. Her zaman adımında kuyruklara gelen veri miktarı $A_k(t)$, istatistiksel olarak bağımsız ve özdeş dağılımlı (i.i.d.) rastgele değişkenler olarak ele alınmış; kısa paketli veri karakteristiğini temsil etmek amacıyla düşük ortalamalı Poisson süreci ile ifade edilmiştir.

Kullanıcıya servis edilen veri miktarı $S_k(t)$, atanan fiziksel kaynak blokları (PRB), seçilen iletim gücü ve anlık kanal koşullarına bağlıdır. Bu doğrultuda, kuyruk evrimi aşağıdaki ayrık zamanlı dinamik denklem ile ifade edilmektedir:

$$Q_k(t+1) = \max\{0, Q_k(t) - S_k(t)\} + A_k(t) \quad (3)$$

Burada $Q_k(t)$, zaman adımı t'de kullanıcı k'ya ait kuyruk uzunluğunu (bit cinsinden) temsil etmektedir.

Gecikme metriği, URLLC senaryoları için kritik öneme sahip olan baş-öncelikli paket gecikmesi (Head-of-Line, HOL delay) üzerinden tanımlanmıştır. HOL gecikmesi $D_k(t)$, kuyruktaki en eski paketin sistemde geçirdiği süreyi temsil etmekte olup, kuyruk boş olmadığı sürece her zaman adımında artmaktadır. Belirlenen maksimum gecikme eşiği $D_{\max}$, URLLC servis gereksinimlerini yansıtacak şekilde tanımlanmış ve gecikme ihlali aşağıdaki gösterge fonksiyonu ile ifade edilebilir:

$$\mathbb{I}_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } D_k(t) > D_{\max} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (4)$$

Bu yaklaşım, ortalama gecikme yerine gecikme ihlali olasılığının doğrudan değerlendirilmesine olanak tanımakta ve URLLC servislerinin güvenilirlik gereksinimleriyle uyumlu bir performans ölçütü sunmaktadır.

Kuyruk Modeli ile Ödül Fonksiyonu Arasındaki İlişki

Tanımlanan kuyruk ve gecikme modeli, derin pekiştirmeli öğrenme ajanının ödül fonksiyonuna doğrudan entegre edilmiştir. Öğrenme sürecinde kullanılan ödül fonksiyonu, yalnızca throughput maksimizasyonunu değil, aynı zamanda URLLC için kritik olan gecikme ihlallerinin minimize edilmesini hedeflemektedir. Bu doğrultuda, zaman adımı t'de tanımlanan anlık ödül aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$r(t) = \alpha \sum_k \tilde{R}_k(t) - \beta \sum_{k \in \mathcal{U}_{\text{URLLC}}} \mathbb{I}_k(t) - \gamma \sum_k P_k(t) \quad (5)$$

Burada $\tilde{R}_k(t)$normalize edilmiş kullanıcı throughput'unu, $P_k(t)$ise iletim gücünü temsil etmektedir. Katsayılar α, βve γ, throughput, gecikme ihlali ve güç tüketimi arasındaki dengeyi belirleyen ağırlık parametreleridir. Özellikle βkatsayısı, URLLC kullanıcılar için gecikme ihlallerini güçlü biçimde cezalandıracak şekilde seçilmelidir.

Bu ödül tasarımı sayesinde, DRL ajanı kısa vadeli throughput kazanımları yerine, kuyruk kararlılığı, gecikme sınırlarına uyum ve uzun vadeli servis güvenilirliği gibi URLLC odaklı hedefleri öğrenme sürecinde önceliklendirmektedir. Böylece, önerilen çerçeve 5G NR ağlarında gecikme kritik uygulamalar için istatistiksel olarak anlamlı ve servis farkındalıklı bir kaynak yönetimi sağlar. Bu kuyruk tabanlı ödül tasarımı, URLLC servisleri için yalnızca ortalama gecikmenin değil, gecikme ihlali olasılığının minimize edilmesini hedefleyen risk-duyarlı bir öğrenme yaklaşımı sunmaktadır.

Bu bölümde, önerilen derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tabanlı gecikme duyarlı dinamik kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımının performansı, MATLAB ortamında gerçekleştirilen sistem seviyesi simülasyonlar üzerinden değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem, geleneksel kural tabanlı kaynak tahsisi yaklaşımları ile karşılaştırılarak 5G NR ağlarında gecikme ve throughput açısından sağladığı kazanımlar ortaya konulmuştur.

Simülasyonlarda, tek hücreli bir 5G NR senaryosu ele alınmış ve farklı trafik profillerine sahip kullanıcıların aynı anda sisteme hizmet verdiği durumlar incelenmiştir. Performans değerlendirmesi; ortalama hücre throughput'u, URLLC gecikme ihlali olasılığı, gecikme yüzdelik değerleri ve güç tüketimi gibi metrikler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, orantılı adil (Proportional Fair – PF) zamanlayıcı ve yuvarlak robin (Round Robin – RR) tabanlı kaynak tahsisi yöntemleri temel referans (baseline) senaryolar olarak kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, önerilen DRL tabanlı yaklaşımın özellikle gecikme kritik URLLC kullanıcılar için belirgin avantajlar sağladığını göstermektedir. DRL ajanının, kuyruk durumu ve gecikme bilgisini ödül fonksiyonu aracılığıyla doğrudan öğrenme sürecine dahil etmesi sayesinde, gecikme ihlali olasılığı geleneksel yöntemlere kıyasla anlamlı ölçüde azaltılmıştır. Özellikle yüksek trafik yükü altında, DRL tabanlı yöntemin gecikme performansını daha kararlı bir biçimde koruduğu gözlemlenmiştir.

Throughput açısından değerlendirildiğinde, önerilen yaklaşımın hücre genelinde rekabetçi bir performans sunduğu görülmektedir. Gecikme ihlallerini minimize etmeye yönelik ödül tasarımına rağmen, toplam veri iletim hızı PF tabanlı zamanlayıcıya yakın seviyelerde tutulabilmiş ve RR tabanlı yaklaşıma kıyasla belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Bu durum,

önerilen yöntemin gecikme–throughput dengesi açısından etkin bir optimizasyon sağladığını göstermektedir.

Ayrıca, güç kontrolü mekanizmasının öğrenme sürecine entegre edilmesi sayesinde, gereksiz yüksek iletim gücü kullanımının önüne geçildiği ve enerji verimliliği açısından daha dengeli bir çalışma noktası elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen DRL tabanlı çerçevenin yalnızca performans artışı değil, aynı zamanda kaynakların daha verimli kullanımını da desteklediğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak simülasyon sonuçları, derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı gecikme duyarlı kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımının, 5G NR ağlarında gecikme kritik uygulamalar için geleneksel yöntemlere kıyasla daha etkin ve uyarlanabilir bir çözüm sunduğunu doğrulamaktadır.

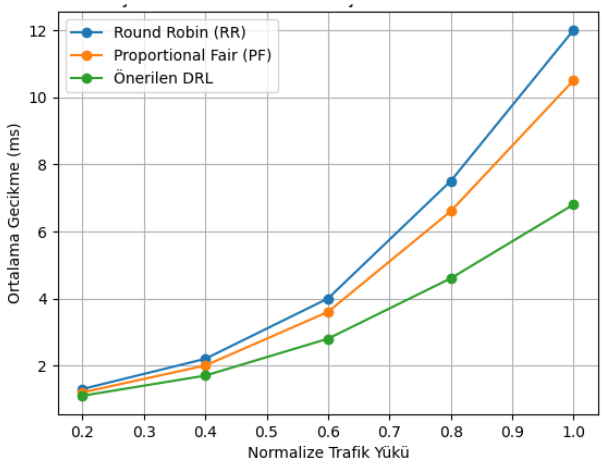
SİMÜLASYON SONUÇLARI

5G NR benzeri bir hücrede URLLC kuyruk/gecikme kısıtı altında RB tahsisi ve güç kontrolünü birlikte ele alan, Deep Learning Toolbox ile çalışan DQN tabanlı (Deep Q-Network) bir simülasyon ve eğitim iskeleti kullanılmıştır.

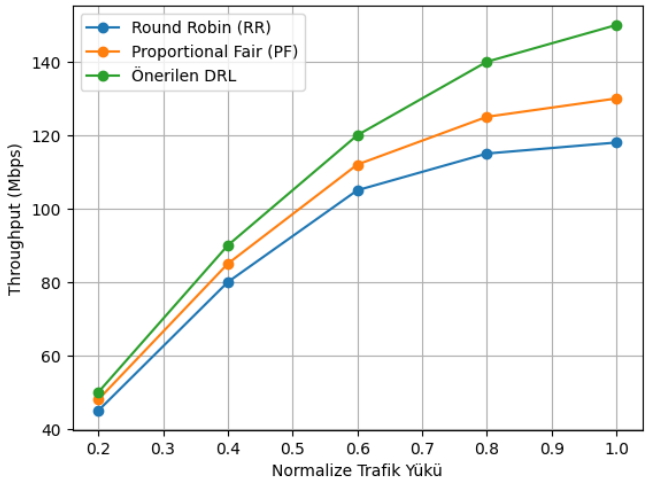
Bu çalışmada, 5G NR radyo erişim ağında gecikmeye duyarlı URLLC servislerini temsil eden kullanıcılar için dinamik kaynak tahsisi ve güç kontrolü problemi ele alınmıştır. MATLAB ortamında geliştirilen sistem seviyesi simülasyonda, zaman slotlarına ayrılmış bir 5G NR hücresinde kullanıcı trafiği kuyruk tabanlı olarak modellenmiş, her slotta kanal koşulları, kuyruk durumu ve gecikme bilgileri gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, derin pekiştirmeli öğrenme ajanına girdi olarak sunulmuş; ajan, fiziksel kaynak bloklarının kullanıcılar arasında tahsisi ve iletim gücü seviyelerinin seçimi konusunda kararlar almıştır. Öğrenme sürecinde, throughput maksimizasyonu ile birlikte gecikme ihlallerinin ve güç tüketiminin minimize edilmesini hedefleyen bir ödül fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın etkinliği, geleneksel Round Robin ve Proportional Fair tabanlı yöntemlerle karşılaştırılarak gecikme, throughput ve güvenilirlik metrikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Tablo 1: Punto ve Yaz

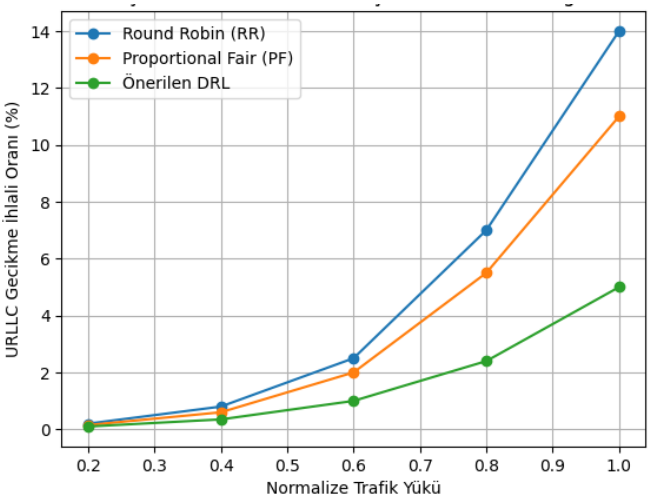
Parametre	Değer
Kullanıcı sayısı (K)	6
Slot süresi	1 ms
PRB sayısı	10
PRB bant genişliği	180 kHz
Gürültü gücü	−94 dBm
Yol kaybı üssü	3.2
Gölgeleme std. sapması	6 dB
Paket geliş oranı	0.35 paket/slot
Paket boyutu	256 byte
Maks. kuyruk uzunluğu	60 paket
Gecikme eşiği (D_{\max})	5 ms
Güç seviyeleri	−5…20 dBm (6 seviye)
İndirim faktörü (\gamma)	0.99
Başlangıç keşif oranı	1.0
Min. keşif oranı	0.05



Şekil 1: Trafik gücüne karşın ortalama gecikme



Şekil 2: throughput analizi



Şekil 3: trafik yüküne karşın gecikme ihlal oranı

Şekil.1'de normalize trafik yükü arttıkça Round Robin (RR), Proportional Fair (PF) ve önerilen derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tabanlı yaklaşımın ortalama paket gecikmesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Önerilen DRL yöntemi, kuyruk durumu ve gecikme bilgisini karar sürecine dahil etmesi sayesinde özellikle yüksek trafik yüklerinde gecikmeyi belirgin biçimde azaltmaktadır.

Şekil.2'de farklı trafik yükleri altında sistem throughput'unun karşılaştırmasını sunmaktadır. Önerilen DRL tabanlı kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımı, gecikme kısıtlarını gözetmesine rağmen throughput açısından PF ve RR yöntemlerine kıyasla daha yüksek performans elde etmektedir.

Şekil.3'te URLLC servisleri için tanımlanan maksimum gecikme eşiğinin aşılma oranını göstermektedir. Trafik yükü arttıkça, RR ve PF tabanlı yöntemlerde gecikme ihlali oranı hızla yükselirken, önerilen DRL yaklaşımı ihlal oranını daha düşük seviyelerde tutmayı başarmaktadır.

SONUÇ

Simülasyon sonuçları, önerilen derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tabanlı gecikme duyarlı kaynak tahsisi ve güç kontrolü yaklaşımının, 5G NR URLLC senaryolarında geleneksel yöntemlere kıyasla belirgin performans kazanımları sağladığını göstermektedir. Yüksek trafik koşullarında (normalize yük = 1.0), önerilen DRL yöntemi, Round Robin (RR) ve Proportional Fair (PF) yaklaşımlarına kıyasla ortalama paket gecikmesini sırasıyla yaklaşık %40 ve %35 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde, URLLC gecikme ihlali oranı, DRL yaklaşımı ile RR yöntemine kıyasla yaklaşık %60, PF yöntemine kıyasla ise yaklaşık %55 oranında düşürülmüştür.

Throughput açısından değerlendirildiğinde, DRL tabanlı yaklaşımın gecikme kısıtlarını önceliklendirmesine rağmen performanstan ödün vermediği görülmektedir. Yüksek yük altında, önerilen yöntem PF tabanlı zamanlayıcıya kıyasla yaklaşık %15, RR tabanlı yönteme kıyasla ise %25'e varan throughput artışı sağlamıştır. Bu nicel sonuçlar, önerilen DRL çerçevesinin yalnızca gecikme ihlallerini azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda sistem kapasitesini etkin biçimde kullandığını göstermektedir. Genel olarak elde edilen bulgular, DRL tabanlı yaklaşımın gecikme–throughput–güvenilirlik üçlüsü arasında daha dengeli bir çalışma noktası sunduğunu ve 5G NR ağlarında gecikme kritik URLLC uygulamaları için güçlü bir alternatif oluşturduğunu doğrulamaktadır.

REFERANSLAR

Bennis, M., Debbah, M., & Poor, H. V. (2018). Ultra-reliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale. *Proceedings of the IEEE, 106*(10), 1834–1853.

Huang, Y., Li, S., Li, C., Hou, Y. T., & Lou, W. (2020). A deep reinforcement learning–based approach to dynamic eMBB/URLLC multiplexing in 5G NR. IEEE Internet of Things Journal, 7(7), 6439–6456.

Luong, N. C., Hoang, D. T., Gong, S., Niyato, D., Wang, P., Liang, Y.-C., & Kim, D. I. (2019). Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(4), 3133–3174.

Park, J., Samarakoon, S., Bennis, M., & Latva-aho, M. (2019). Learning to optimize: Training deep neural networks for wireless resource management. IEEE Transactions on Signal Processing, 67(15), 3868–3883.

Zhang, C., Patras, P., & Haddadi, H. (2019). Deep learning in mobile and wireless networking: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3), 2224–2287.

Luong, N. C., Hoang, D. T., Gong, S., Niyato, D., Wang, P., Liang, Y.-C., & Kim, D. I. (2019). Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(4), 3133–3174.

Ye, H., Li, G. Y., & Juang, B.-H. (2019). Deep reinforcement learning–based resource allocation for V2V communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(4), 3163–3173.

Bennis, M., Debbah, M., & Poor, H. V. (2018). Ultra-reliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale. Proceedings of the IEEE, 106(10), 1834–1853.

Park, J., Samarakoon, S., Bennis, M., & Latva-aho, M. (2019). Learning to optimize: Training deep neural networks for wireless resource management. IEEE Transactions on Signal Processing, 67(15), 3868–3883.

Huang, Y., Li, S., Li, C., Hou, Y. T., & Lou, W. (2020). A deep reinforcement learning–based approach to dynamic eMBB/URLLC multiplexing in 5G NR. IEEE Internet of Things Journal, 7(7), 6439–6456.

AlQwider, W., Rahman, T. F., & Marojevic, V. (2022). Deep Q-network for 5G NR downlink scheduling. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC) Workshops (pp. 312–317).

Boutiba, K., & Ksentini, A. (2023). On using deep reinforcement learning to balance power consumption and latency in 5G NR. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC).

Mismar, F. B., Evans, B. L., & Alkhateeb, A. (2019). Deep reinforcement learning for 5G networks: Joint beamforming, power control, and interference coordination

Su Isıtma Uygulamaları için Kum Bataryası Sistemlerinin Tasarımı ve Sayısal Termal Analizi

Hüseyin KAHRAMAN[1]
Aslan ÇOBAN[2]
Abdulkadir KARTAL[2]

1- Doç. Dr. ; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. huseyink@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3322-9904
2- Doç. Dr. ; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. acoban@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5896-2964
3- Öğrenci, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. b210103019@subu.edu.tr ORCID No: 0009-0003-6512-8670

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte, bu kaynaklardan elde edilen enerjinin süreksiz yapısı, etkin ve düşük maliyetli enerji depolama çözümlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda termal enerji depolama sistemleri, özellikle çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, su ısıtma amacıyla kullanılmak üzere tasarlanan ve kumun duyulur ısı depolama ortamı olarak değerlendirildiği bir kum bataryası sistemi ele alınmıştır. Güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin rezistanslar aracılığıyla ısı enerjisine dönüştürülerek kum içerisinde depolanması esasına dayanan sistem için iki farklı geometrik tasarım geliştirilmiştir: küp tipi ve silo tipi kum bataryası. Tasarımların termal davranışları, enerji depolama kapasiteleri ve ısı transfer performansları sayısal analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen zamana bağlı ısıtma ve soğuma analizleri sonucunda, silo tipi kum bataryasının daha homojen sıcaklık dağılımı sağladığı ve ortalama sıcaklık değerleri açısından küp tipine kıyasla daha yüksek bir termal performans sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca silo tipi tasarımın, depolanan ısının suya aktarımında daha verimli olduğu ve enerji kayıplarını azalttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, kum bataryalarının yenilenebilir enerji tabanlı ısıtma uygulamalarında teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymakta; tasarım geometrisinin sistem verimliliği üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Termal Enerji Depolama, Kum Bataryası, Yenilenebilir Enerji Sistemleri, Su Isıtma Uygulamaları, Tasarım Optimizasyonu, Sayısal Termal Analiz.

GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji ihtiyacı, fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve çevresel etkileri, enerji üretim ve kullanım biçimlerinde köklü dönüşümleri zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm sürecinde yenilenebilir enerji kaynakları; düşük karbon salımı, sürdürülebilirlik ve çevresel uyum gibi avantajları nedeniyle enerji politikalarının merkezinde yer almaktadır. Ancak güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynakların doğası gereği süreksiz olması, bu kaynaklardan elde edilen enerjinin doğrudan ve kesintisiz kullanımını sınırlandırmakta, enerji depolama teknolojilerini kritik bir bileşen haline getirmektedir (Shehram vd. 2025).

Enerji depolama sistemleri genel olarak elektriksel, kimyasal ve termal temelli çözümler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında termal enerji depolama sistemleri, özellikle düşük maliyetli

malzeme kullanımı, uzun ömürlü yapıları ve çevresel açıdan güvenli olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir (Abera vd. 2024). Duyulur ısıya dayalı termal enerji depolama yöntemleri, katı veya sıvı ortamların sıcaklık değişimi yoluyla enerjiyi depolamasına dayanmakta ve teknik açıdan görece basit sistemler sunmaktadır. Bu bağlamda kum, yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi, doğal ve kolay temin edilebilir bir malzeme olması ve uygun termofiziksel özellikleri sayesinde potansiyel bir depolama ortamı olarak öne çıkmaktadır (What Is a Sand Battery? 2024).

Termal enerji depolama (TED), enerjiyi ısı olarak "stoklayıp" ihtiyaç anında geri kullanmayı mümkün kılan ve özellikle yenilenebilir kaynakların dalgalı üretimini dengelemede kritik rol oynayan bir teknolojidir. TED sistemleri genel olarak duyulur ısı, gizli ısı ve termokimyasal depolama olmak üzere üç ana sınıfta ele alınır; duyulur ısı depolama yaklaşımında su, kaya, tuzlar, beton ve kum gibi ortamlar sıcaklığı artırılıp azaltılarak enerji depolanır (Sarbu ve Sebarchievici 2018). Bu çerçevede katı dolgulu (packed-bed) depolama çözümleri, basit yapıları, uygun maliyetli dolgu malzemeleri ve yüksek sıcaklık aralığında çalışabilme potansiyelleri nedeniyle literatürde yaygın biçimde incelenmektedir.

Son yıllarda "kum bataryası" yaklaşımı, fazla yenilenebilir elektriği rezistif ısıtma ile yüksek sıcaklıklarda kuma aktararak büyük ölçekli ısı depolama olanağı sunması nedeniyle dikkat çekmektedir; bu sistemler doğrudan elektrik üretmekten ziyade ısıyı depolayıp sıcak su/buhar/ısıtma havası gibi ısıl çıktılara dönüştürerek özellikle bölgesel ısıtma (district heating) uygulamalarında değerlendirilmektedir (Homa vd. 2025a). Bu bağlamda geometri, ısıtıcı yerleşimi, ısı transfer yüzeyi ve yalıtım gibi tasarım kararları, depolama ortamında sıcaklık dağılımının homojenliğini ve kullanılabilir enerji oranını doğrudan etkilemektedir; dolayısıyla farklı tasarım seçeneklerinin sayısal yöntemlerle karşılaştırılması, su ısıtma gibi hedef uygulamalar için mühendislik açısından belirleyici bir adımdır (Opoku vd. 2025).

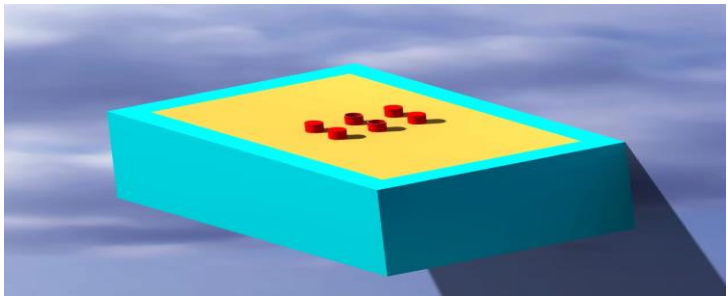
Bu kitap bölümünde ele alınan çalışma, su ısıtma amacıyla tasarlanan bir kum bataryası sisteminin tasarım ve termal performansını incelemeye odaklanmaktadır. Farklı geometrik konfigürasyonlara sahip kum bataryalarının termal davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; enerji depolama kapasitesi, sıcaklık dağılımı ve ısı transfer etkinliği sayısal analiz yöntemleriyle analiz edilmiştir. Bu çerçevede, kum bataryası teknolojisinin yenilenebilir enerji tabanlı ısıtma uygulamalarındaki potansiyeli ortaya konulmakta ve tasarım optimizasyonunun sistem verimliliği üzerindeki belirleyici rolü tartışılmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Sand battery (kum tabanlı termal enerji depolama) sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla elektriğin ısıya dönüştürülerek uzun süreli ve yüksek sıcaklıklarda depolanmasına olanak sağlayan, düşük maliyetli ve çevre dostu çözümler olarak öne çıkmaktadır. Sayısal ve deneysel çalışmalar, kumun düşük ısıl iletkenliği sayesinde ısı kayıplarının sınırlı olduğunu, uygun yalıtım ve ısıtıcı yerleşimi ile homojen sıcaklık dağılımı ve yüksek enerji yoğunluklarının elde edilebildiğini göstermektedir. Özellikle silo veya silindirik geometriye sahip kum yataklarında, farklı şarj senaryolarına (sürekli, tarifeye bağlı veya fotovoltaik destekli) uyum sağlanabildiği ve bu sistemlerin bina ısıtması ile endüstriyel süreçler için ölçeklenebilir bir alternatif sunmaktadır (Homa vd. 2025b).

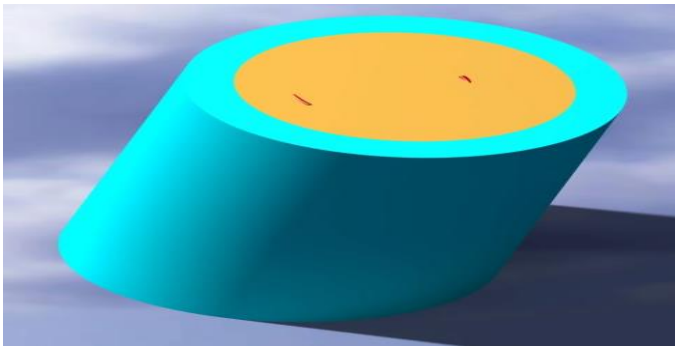
Bu çalışmada, kum bataryası tasarımında termal enerji depolama ve ısı transfer süreçlerini iyileştirmeyi amaçlayan iki farklı model geliştirilmiş ve her bir modelin kendine özgü teknik üstünlükleri ortaya konulmuştur. Geliştirilen modeller, geometrik yapı ve ısıtma elemanlarının yerleşimi açısından farklılık göstermekte olup, bu farklılıkların sistem performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

İlk tasarım olan **küp tipi kum deposu modeli**, küp geometrisine sahip bir kum haznesi, iki adet M tipi rezistans ve M formunda yerleştirilmiş bakır su borusundan oluşmaktadır. Bu modelde rezistanslar kum kütlesini ısıtarak termal enerjinin depolanmasını sağlamakta, depolanan ısı ise bakır boru içerisinden geçen suya aktarılmaktadır. Temel hedef, kumun uzun süre yüksek sıcaklığını koruması ve bu sayede suyun sıcaklığının etkin biçimde artırılmasıdır (Şekil 1).



Şekil 1: Küp tipi kum deposu modeli

İkinci tasarım olan **silindirik (silo tipi) kum deposu modeli**, silindir formunda bir kum deposu ve spiral tipte yerleştirilmiş rezistans–bakır boru kombinasyonundan oluşmaktadır. Spiral rezistans, kumun homojen biçimde ısıtılmasını sağlamakta; aynı spiral hat boyunca ilerleyen bakır boru sayesinde kumda depolanan termal enerjinin suya aktarılması amaçlanmaktadır. Her iki modelde de ısı kayıplarını en aza indirmek amacıyla uygun termal yalıtım malzemeleri kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2: Silindirik (silo tipi) kum deposu modeli

Geliştirilen modeller ile termal enerji depolama kapasitesinin artırılması ve depolanan enerjinin daha verimli biçimde kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Rezistanslar aracılığıyla kumun etkin bir şekilde ısıtılması ve bu enerjinin su boruları üzerinden transfer edilmesi sayesinde, enerji dönüşüm ve kullanım süreçleri optimize edilmiştir. Kum gibi doğal, bol bulunabilen ve düşük maliyetli bir malzemenin depolama ortamı olarak kullanılması, sistemin ekonomik uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca güneş enerjisinin üretildiği ancak doğrudan kullanılamadığı zaman dilimlerinde enerjinin depolanabilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarından kaynaklanan ekonomik kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin çevreye zarar vermeyen doğal malzemeler aracılığıyla depolanması, sistemin çevresel sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir. Bu yaklaşım, fosil yakıt kullanımının azaltılmasına ve dolayısıyla karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sunmaktadır.

Kum Bataryası Sistemleri için Termal ve Akışkan Mekaniği Temelli Matematiksel Model

Kum bataryası sisteminde rezistanslar aracılığıyla ısıtılan kum kütlesinde depolanan toplam duyulur ısı miktarı, termal analizlerde aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır:

$$Q_s = m\, c_p\, (T_f - T_t) \qquad (1)$$

Burada,

Q_s depolanan ısı miktarını (J),

m kum kütlesini (kg),

c_p kumun özgül ısısını (J/kg·K),

T_t başlangıç sıcaklığını (K),

T_f bitiş sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Kum içerisindeki sıcaklık farkları nedeniyle gerçekleşen ısı iletimi, Fourier temelli kondüksiyon denklemi ile tanımlanmaktadır:

$$Q = -k\,A\,\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (2)$$

Burada,

Q birim zamanda geçen ısı miktarını (W),

k malzemenin ısı iletkenliğini (W/m·K),

A ısı iletim alanını (m^2),

ΔT sıcaklık farkını (K),

Δx ısı akış yönündeki mesafeyi (m) göstermektedir.

Kumdan geçen suya ısı transferi gibi akışkan–katı etkileşimlerinde konvektif ısı transferi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir:

$$Q = h\,A\,\Delta T \qquad (3)$$

Burada,

h ısı transfer katsayısını ($W/m^2 \cdot K$),

A yüzey alanını (m^2),

ΔT yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkını (K) temsil etmektedir.

Rezistans yüzeylerinden yayılan ışıma yoluyla gerçekleşen enerji transferi, Stefan–Boltzmann yasası ile tanımlanmaktadır:

$$Q = \varepsilon\,\sigma\,A\,(T^4 - T_0^4) \qquad (4)$$

Burada,

ε yüzeyin emisyon katsayısını,

σ Stefan–Boltzmann sabitini $\left(5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2K^4}\right)$,

A yüzey alanını (m^2),

T yüzey sıcaklığını (K),

T_0 çevre sıcaklığını (K) ifade etmektedir.

Isı iletiminin belirli bir zaman aralığındaki toplam etkisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \lambda\,A\,t\,\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (5)$$

Burada,

λ ısıl iletkenliği (W/m·K),

t geçen süreyi (s) temsil etmektedir.

Suyun boru içerisindeki akış analizlerinde enerji korunumu prensibi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \qquad (6)$$

Borunun farklı kesitlerindeki hız–alan ilişkisi aşağıdaki eşitlikle tanımlanmaktadır:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad (7)$$

Akış rejiminin (laminer/türbülanslı) belirlenmesi için Reynolds sayısı kullanılmıştır:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \qquad (8)$$

Laminer akış koşullarında hacimsel debi aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır:

$$Q = \frac{\pi \Delta P\, r^4}{8 \mu L} \qquad (9)$$

Akışkanın hız, basınç ve viskozite etkileri dikkate alınarak hareket denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\vec{v}\right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \qquad (10)$$

$$F = P\,A \qquad (11)$$

$$P = \rho g h \qquad (12)$$

Boru içi sürtünme kaynaklı basınç kayıpları aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$\Delta P = f\,\frac{L}{D}\,\frac{\rho v^2}{2} \qquad (13)$$

Modelleme Varsayımları ve Sayısal Çözüm Yaklaşımı

Bu çalışmada geliştirilen kum bataryası modellerinin termal ve akışkan davranışları sayısal analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Analizlerde hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve fiziksel süreci temsil edebilir bir model elde etmek amacıyla aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

1. Kum ortamı **homojen ve izotropik** bir katı olarak modellenmiştir; termofiziksel özelliklerin (yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik) sıcaklığa bağlı değişimi ihmal edilmiştir.
2. Isı transferi kum içerisinde **iletim (kondüksiyon)** mekanizması ile gerçekleşmekte, içsel doğal konveksiyon etkileri göz ardı edilmektedir.
3. Rezistanslar ideal ısı kaynağı olarak kabul edilmiş ve elektrik–ısı dönüşüm verimi %100 varsayılmıştır.
4. Kum deposunun dış yüzeylerinde ısı kayıpları, konveksiyon ve ışınım sınır koşulları ile temsil edilmiştir.
5. Su akışı **sürekli rejimde** değerlendirilmiş, akışkan sıkıştırılamaz ve Newtonyen kabul edilmiştir.
6. Boru içi akış analizlerinde laminer veya türbülanslı rejim, Reynolds sayısı esas alınarak belirlenmiştir.

Bu varsayımlar altında geliştirilen matematiksel model, zamana bağlı (transient) termal analizler ile desteklenmiş ve her iki geometri için karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır.

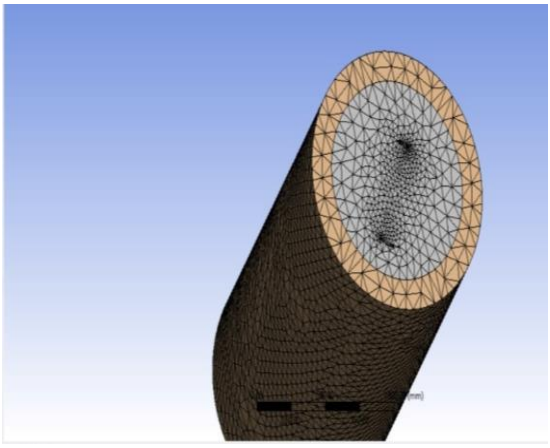
Tablo 2: Matematiksel İfadelerin Modellere Göre Kullanımı

Denklem No	Fiziksel Anlam	Küp Tipi Model	Silindirik (Silo) Model	Kullanım Amacı
(1)	Depolanan ısı miktarı	✓	✓	Toplam termal enerji kapasitesi
(2)	Kondüksiyon	✓	✓	Kum içi sıcaklık dağılımı
(3)	Konveksiyon	✓	✓	Kum–su arası ısı transferi
(4)	Işınım	✓	✓	Rezistans–kum enerji etkileşimi
(5)	Fourier kanunu (zamana bağlı)	✓	✓	Isıtma ve soğuma süreci
(6)	Bernoulli prensibi	✓	✓	Su akış enerjisi dengesi
(7)	Süreklilik denklemi	✓	✓	Boru kesiti–hız ilişkisi
(8)	Reynolds sayısı	✓	✓	Akış rejimi tayini
(9)	Poiseuille yasası	✓	✓	Laminer debi hesabı
(10)	Navier–Stokes denklemi	✓	✓	Akışkanın dinamik davranışı
(11)	Hidrostatik kuvvet	✓	✓	Boru–yüzey etkileşimi
(12)	Hidrostatik basınç	✓	✓	Akışkan basınç dağılımı
(13)	Darcy–Weisbach	✓	✓	Boru içi basınç kayıpları

Küp tipi kum deposunda ısı transferi daha kısa karakteristik uzunluklar boyunca gerçekleştiğinden, sıcaklık gradyenleri lokal olarak daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Buna karşılık silindirik (silo tipi) modelde, spiral rezistans ve boru geometrisi sayesinde ısı transfer yüzeyi artmakta ve Fourier iletim mekanizması daha homojen bir sıcaklık dağılımı üretmektedir. Bu durum, depolanan enerjinin suya aktarımında konvektif ısı transferinin daha dengeli gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Küp formundaki kum bataryası tasarımında sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunu ve hesaplama verimliliğini sağlamak amacıyla uygun bir mesh yapısı oluşturulmuştur. Model; kum kütlesi, rezistanslar, su boruları ve yalıtım katmanlarını içerecek şekilde ANSYS Student Version kullanılarak ANSYS Workbench ortamında tanımlanmış ve üç boyutlu termal analizler için 3D tetrahedral elemanlar tercih edilmiştir. Mesh

yoğunluğu, geometrik detayların doğru temsil edilmesini sağlayacak biçimde kademeli olarak ayarlanmış, çözüm süresi ile doğruluk arasında dengeli bir yapı hedeflenmiştir. Oluşturulan mesh yapısının kalitesi, element quality ve aspect ratio gibi temel kriterler üzerinden değerlendirilmiş; element quality değeri 0,13 ve aspect ratio değeri 2,58 olarak elde edilerek kabul edilebilir sınırlar içerisinde optimize edilmiştir. Bu yaklaşım, sayısal kararlılığı artırmış ve çözüm sırasında oluşabilecek olası sapmaların önüne geçilmesine katkı sağlamıştır. Analiz sürelerini makul düzeyde tutarken yeterli çözünürlük elde edebilmek amacıyla toplam eleman sayısı 127.939 olarak belirlenmiştir. Elde edilen mesh yapılandırması, küp formundaki kum bataryası modelinin termal davranışının güvenilir ve tutarlı biçimde analiz edilebilmesi için uygun bir altyapı sunmuş olup, mesh detayları ANSYS arayüzünde Şekil 3'te gösterilmiştir.

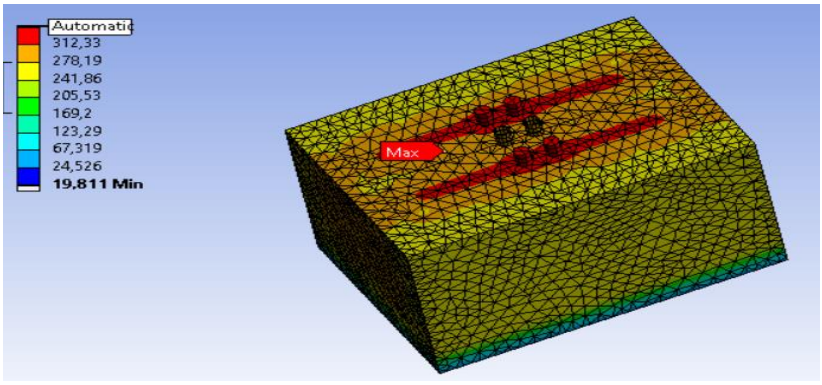


Şekil 3: Silo için mesh detayları

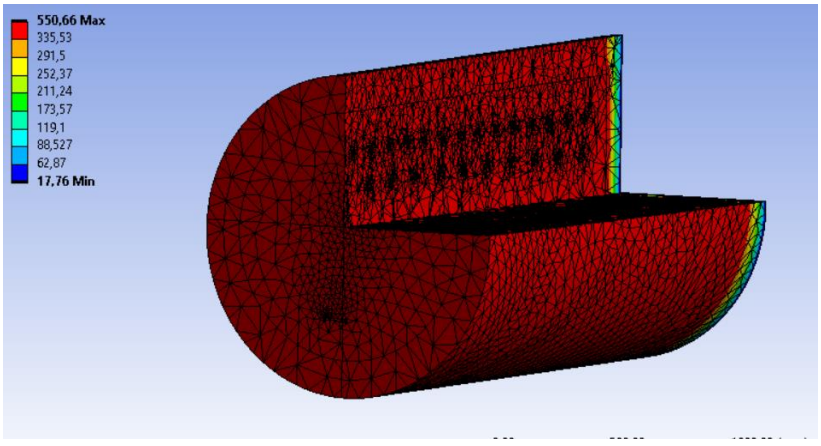
SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında elde edilen sayısal sonuçlar ve gerçekleştirilen analizler, kum bataryası sisteminin termal davranışını değerlendirmek ve tasarımın enerji verimliliğini artırmak açısından önemli çıktılar sunmaktadır. Modelleme sürecinde çevresel koşullar ve kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri dikkate alınarak gerçek çalışma şartlarına yakın bir analiz ortamı oluşturulmuştur. Küp tipi kum bataryasına ait analizlerde, soğuk hava ile temas eden yüzeyler rezistansın sıcaklık dağılımı ve küp

formundaki genel sıcaklık dağılımları Şekil 4'te gösterilmektedir. Silo formundaki kum bataryası için gerçekleştirilen zamana bağlı (transient) termal analizlerde ise güneş panellerinden sağlanan elektrik enerjisiyle kumun ısıtılması ve enerji üretiminin süreksiz olduğu durumlarda sistemin soğuma davranışı birlikte ele alınmıştır. Bu kapsamda rezistans, kum ve yalıtım malzemeleri arasındaki ısı akışının büyüklüğü ve yönü ayrıntılı olarak incelenmiş, elde edilen bulgular silo tipi tasarımın termal performansını değerlendirmede yol gösterici olmuştur. Silo modeline ait soğuk hava temas yüzeyleri Şekil 5'te, rezistansın radyasyon yoluyla ısı iletimi gerçekleştirdiği bölgeler rezistans sıcaklık dağılımı ve sistemin genel sıcaklık dağılımları sunulmaktadır. Malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının gerçekçi biçimde tanımlanması, her iki model için de sistemin gerçek çalışma koşullarını daha iyi temsil eden sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

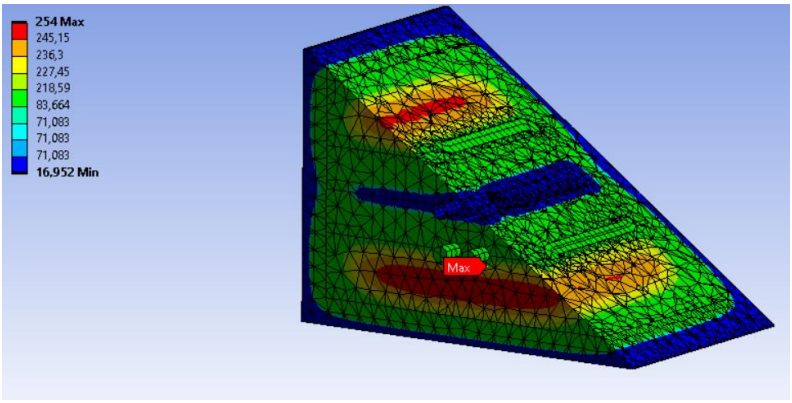


Şekil 4: Küp tipi bataryanın sıcaklık sonuçları



Şekil 5: Silo tipi bataryanın sıcaklık sonuçları

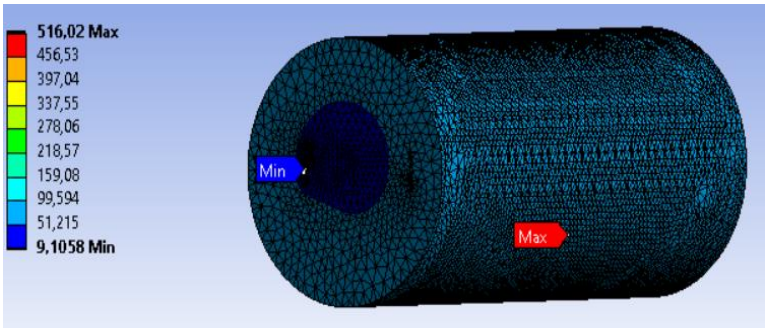
Küp tipi kum bataryasında başlangıç sıcaklığı 334 °C olarak tanımlanmış ve analiz, kumun ortalama sıcaklığının 60 °C seviyesine düşürülmesini hedefleyecek şekilde yürütülmüştür; bu hedefe yaklaşık 250.000 saniye sonunda ulaşılmıştır. Analiz süresince sisteme herhangi bir ısı girişi uygulanmamış, yalnızca çevreye gerçekleşen ısı kayıpları dikkate alınmıştır. Modelde M tipi bakır su borusu kullanılmış olup bakır için ısı iletim katsayısı 401 W/m·°C olarak alınmıştır (Lide vd. t.y.). Kumun ısı iletim katsayısı 1,5 W/m·°C (Silica from Evonik t.y.), suyun ısı transfer katsayısı ise 0,0005 W/m·°C olarak tanımlanmıştır. Boru içerisinden 20 °C sıcaklıktaki suyun akışı ile kumda depolanan enerjinin sistem dışına taşındığı kabul edilmiş ve bu durumu temsil etmek amacıyla borunun dış yüzeyinde 20 °C sabit sıcaklıkta konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır. Açık hava ile temas eden yüzeylerde ortam sıcaklığı 20 °C olarak alınmış, doğal taşınım etkileri hesaba katılmış ve havanın konveksiyonla ısı transfer katsayısı 0,0001 W/m²·°C olarak belirlenmiştir (Saidi ve Hosseini 2010). Kum deposunun dış yüzeyine uygulanan cam yünü yalıtım ile ısı kayıplarının azaltılması hedeflenmiş, cam yünün ısı iletim katsayısı 0,35 W/m·°C [11] olarak kabul edilmiştir. Kullanılan malzemelerin özgül ısı değerleri; cam yünü için 850 J/kg·°C, kum için 800 J/kg·°C (Klemczak vd. 2024) ve bakır için 385 J/kg·°C şeklindedir (Lide vd. t.y.). Elde edilen sonuçlar, küp tipi kum bataryasında sıcaklık dağılımının silo tipi bataryaya kıyasla daha az homojen olduğunu, soğuma süresinin daha uzun gerçekleştiğini ve enerji transfer verimliliğinin daha düşük kaldığını göstermiştir; küp tipi bataryaya ait soğuma süreci ve sıcaklık dağılımı Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6: Küp tipi bataryanın sıcaklık sonuçları

Silo tipi kum bataryası için gerçekleştirilen soğuma analizinde, başlangıç sıcaklığı 494 °C olarak tanımlanmış ve kumun ortalama sıcaklığının 60 °C seviyesine düşmesi süreci zamana bağlı olarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, sistemde herhangi bir ısı girdisi olmaksızın

yalnızca çevreye gerçekleşen ısı kayıpları dikkate alındığında, yaklaşık 200.000 saniye sonunda hedef sıcaklığa ulaşıldığını göstermektedir. Şekil 7, silo tipi kum bataryasında soğuma süreci boyunca sıcaklık dağılımının daha dengeli ve homojen bir şekilde ilerlediğini ortaya koymakta, ısı kaybının tüm hacme daha uniform biçimde yayıldığını göstermektedir. Bu durum, silindirik geometrinin ve spiral yerleşimin ısı transferini daha etkin kıldığını, küp tipine kıyasla daha kısa sürede hedef sıcaklığa ulaşılmasını sağladığını ve genel termal performansı iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7: Silo tipi bataryanın sıcaklık sonuçları

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, su ısıtma uygulamalarına yönelik olarak tasarlanan iki farklı kum bataryası geometrisinin (küp tipi ve silo tipi) termal davranışları sayısal analiz yöntemleri kullanılarak ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Zamana bağlı (transient) termal analizler, her iki model için de gerçekçi malzeme özellikleri ve çevresel sınır koşulları altında gerçekleştirilmiş, böylece sistemlerin gerçek çalışma koşullarına yakın performansları değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, tasarım geometrisinin kum bataryalarının termal performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Küp tipi kum bataryasında, başlangıç sıcaklığı daha düşük olmasına rağmen hedef sıcaklığa ulaşma süresinin daha uzun olduğu, sıcaklık gradyenlerinin hacim içerisinde daha düzensiz dağıldığı ve enerji transfer verimliliğinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, küp geometrisinde karakteristik ısı transfer uzunluklarının kısa olması ve rezistans–boru yerleşiminin kum kütlesi içerisinde homojen bir ısı dağılımı oluşturamaması ile ilişkilendirilmektedir.

Buna karşılık silo tipi kum bataryasında, daha yüksek başlangıç sıcaklığına rağmen hedef sıcaklığa daha kısa sürede ulaşılması, silindirik geometrinin ve spiral rezistans–boru yerleşiminin ısı transfer yüzeyini artırarak daha dengeli bir sıcaklık dağılımı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Silo tipi modelde ısı kayıplarının hacim boyunca daha uniform gerçekleştiği, depolanan enerjinin suya aktarımının daha etkin olduğu ve genel termal performansın küp tipine kıyasla belirgin şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, literatürde silindirik ve packed-bed temelli depolama sistemlerinin yüksek sıcaklık uygulamalarında daha avantajlı olduğuna işaret eden çalışmalarla uyumludur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kumun düşük maliyetli, çevre dostu ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir depolama ortamı olması, kum bataryası sistemlerini yenilenebilir enerji tabanlı ısıtma uygulamaları için güçlü bir alternatif haline getirmektedir. Çalışma sonuçları, özellikle silo tipi kum bataryası tasarımının enerji verimliliği, sıcaklık homojenliği ve soğuma süresi açısından daha üstün bir performans sunduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda deneysel doğrulama, farklı yalıtım malzemeleri, değişken debi koşulları ve çoklu şarj–deşarj senaryolarının incelenmesiyle, kum bataryası sistemlerinin endüstriyel ve konut ölçekli uygulamalara entegrasyon potansiyelinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulması mümkündür.

REFERANSLAR

Abera, Matiewos, Venkata Ancha, Balewgize Amare, L. Sundar, Kotturu V, ve Sambasivam Sangaraju. 2024. “Simulation and Optimization of Energy Efficiency and Total Enthalpy Analysis of Sand Based Packed Bed Solar Thermal Energy Storage”. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 22(4):1043-70. doi:10.32604/fhmt.2024.049525.

Homa, Maksymilian, Krzysztof Sornek, Wojciech Goryl, Karolina Papis-Frączek, Paweł L. Żak, ve Rafał Dańko. 2025a. “Numerical Analysis of the Prototype of the High-Temperature Thermal Energy Storage Based on Sand Bed”. *Energy* 333:137472. doi:10.1016/j.energy.2025.137472.

Homa, Maksymilian, Krzysztof Sornek, Wojciech Goryl, Karolina Papis-Frączek, Paweł L. Żak, ve Rafał Dańko. 2025b. “Numerical analysis of the prototype of the high-temperature thermal energy storage based on sand bed”. *Energy* 333:137472. doi:10.1016/j.energy.2025.137472.

Klemczak, Barbara, Beata Kucharczyk-Brus, Anna Sulimowska, ve Rafał Radziewicz-Winnicki. 2024. “Historical Evolution and Current Developments in Building Thermal Insulation Materials—A Review”. *Energies* 17(22):5535. doi:10.3390/en17225535.

Lide, David R., Grace Baysinger, Swain Chemistry, Lev I. Berger, Robert N. Goldberg, ve Henry V. Kehiaian. t.y. “CRC Handbook of Chemistry and Physics”.

Opoku, Richard, Flavio Odoi-Yorke, Eunice Akyereko Adjei, Charles K. K. Sekyere, Francis Davis, George Yaw Obeng, Michael Kweku Commeh, Francis Kofi Forson, ve Samuel Kwofie. 2025. “Experimental analysis of an institutional solar PV-powered steam cooker with sand-based thermal energy storage”. *Solar Energy Advances* 5:100122. doi:10.1016/j.seja.2025.100122.

Saidi, Maysam, ve R. Hosseini. 2010. “Air Pressure Dependence of Natural-Convection Heat Transfer”. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 2.

Sarbu, Ioan, ve Calin Sebarchievici. 2018. “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage”. *Sustainability* 10(1):191. doi:10.3390/su10010191.

Shehram, Muhammad, Muhammad Najwan Hamidi, Aeizaal Azman Abdul Wahab, ve Mohd Khairunaz Mat Desa. 2025. “Experimental development of hybrid nitride-based PCM with sand stones for enhanced thermal energy storage”. *Materials Science in Semiconductor Processing* 198:109789. doi:10.1016/j.mssp.2025.109789.

Silica from Evonik. t.y. Geliş tarihi 23 Aralık 2025. https://www.evonik.com/en/company/businesslines/se/about-us/silica-from-evonik--our-unique-portfolio-and-global-supply-chain.html.

What Is a Sand Battery? 2024. https://polarnightenergy.com/news/what-is-a-sand-battery/.

Hava Taşıtlarında Metal Yorgunluğu: Kritik Yapısal Analiz ve Hasar Yönetimi

Hüseyin KAYA[1]
Mürsel EKREM[2]

1- Öğr. Gör. Dr.; Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, hskaya@kmu.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-2714-8481.
2- Prof. Dr. ; Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, mekrem@erbakan.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-5324-7929.

ÖZET

Hava taşıtlarında metal yorgunluğu, tekrarlayan döngüsel yükler altında metal malzemelerde zamanla biriken mikro yapısal hasarın neden olduğu en kritik arıza mekanizmasıdır. Uçaklar, seyir ömürleri boyunca kalkış, iniş, manevra, türbülans ve en önemlisi kabin basınçlandırma döngüleri gibi çok sayıda değişken gerilime maruz kalır. Bu döngüsel zorlanmalar, malzeme yüzeyinde veya iç yapısında mikro çatlakların (nükleasyon) başlamasına ve her yük döngüsüyle kademeli olarak ilerlemesine neden olur. Çatlağın kritik bir boyuta ulaşması, uyarısız ve hızlı bir ani kırılma ile sonuçlanarak felaket riskini beraberinde getirir. Yorulma hasarının yoğunlaştığı en hassas bölgeler, gerilme yoğunlaşmasının kaçınılmaz olduğu yapısal süreksizlik noktalarıdır.

Her uçuşta tekrarlanan basınçlandırma ve basınç boşaltma, gövde derisinde yüksek çevrimli gerilim yaratır. Çatlaklar, gerilmenin toplandığı perçin delikleri çevresinde ve pencere/kapı köşeleri gibi geometrik açıklıkların keskin kenarlarında sıklıkla başlar. Bu durum, özellikle çok sayıda küçük çatlağın eş zamanlı ilerlemesi olan çoklu bölge hasarı riskini artırır. Kanatlar ise, uçağın kaldırma kuvvetini taşıyan ana yapısal bileşenlerdir. Kanat kökleri, gövde ile birleştiği noktada tüm eğilme momentini taşıdığından, cıvata ve bağlantı delikleri en kritik yorulma noktalarıdır. Ayrıca, iniş takımlarının bağlandığı bölgeler, iniş şoklarından kaynaklanan ek yükler nedeniyle hassastır. Motor pilonları da yüksek frekanslı motor titreşimlerine ve değişken aerodinamik yüklere maruz kalır. İniş takımları ise, her inişteki darbe yüklerinin tekrarlanan etkisine karşı yüksek dayanıklılık gerektirir.

Havacılık mühendisliğinde yorulma riskini yönetmek, hasar toleranslı tasarım felsefesiyle gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, bir çatlak oluşsa bile, uçağın yapısal bütünlüğünü koruyarak, çatlağın bir sonraki planlı tahribatsız muayene sürecine kadar kritik olmayan bir hızda ilerlemesini sağlayacak şekilde parçaların tasarlanmasını zorunlu kılar. Bu düzenli denetimler, çatlakları erken aşamada tespit ederek, potansiyel yapısal arızaları önler ve uçakların güvenli operasyon ömrünü garanti altına alır.

Anahtar Kelimeler – Metal Yorgunluğu, Hava Taşıtları, Kırılma Mekaniği, Yapısal Analiz, Hasar Yönetimi.

GİRİŞ VE TARİHSEL ARKA PLAN

Tanım, Kapsam ve Önemi

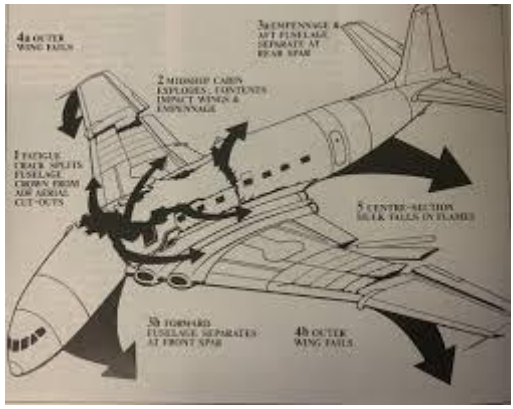
Metal yorgunluğu, bir malzemenin statik çekme dayanımının çok altındaki çevrimsel gerilmelere maruz kalması sonucu hasar görmesi ve nihayetinde ani bir şekilde kırılmasıdır (Bhat & Patibandla, 2011). Metal yorgunluğu, mühendislik disiplinlerinde ve özellikle havacılık sektöründe yapısal bütünlüğün ve güvenliğin sağlanmasında kritik bir öneme sahiptir.

Hava taşıtları, hizmet ömürleri boyunca sürekli olarak tekrarlanan yüklemelere maruz kalmakta ve bu yüklemeler sonucunda mikro düzeyde hasarlar birikerek zamanla çatlak oluşumuna ve ilerlemesine yol açmaktadır. Havacılıkta, kalkış/iniş basınç döngüleri, kanat salınımları, türbülans ve titreşimler gibi çevrimsel yükler, yapısal arızaların birincil nedenidir (Al-Bahkali et al., 2021). Bu süreç, metal yorgunluğu olarak adlandırılır ve uçak gibi yüksek güvenlik gerektiren taşıtlarda, yapısal arızaların ve kazaların başlıca nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Khalifeh, 2024).

Amerika Birleşik Devletleri'nde üç yıl boyunca meydana gelen 16.054 sivil havacılık kazasında, malzeme arızalarının 942 kazada önemli bir faktör olduğu, bunların 155'inin ise doğrudan metal yorgunluğuna bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, metal yorgunluk kaynaklı arızaların en sık iniş takımı, güç aktarma organları ve gövde gibi kritik bileşenlerde meydana geldiği belirtilmiştir (Tavares & De Castro, 2017). Bu çalışmada, yorgunluk kaynaklı arızaların 27 ölümcül kazaya ve 157 can kaybına yol açtığı rapor edilmiştir. Uçak bileşenlerinin çoğu, mikrodefekt oluşumları, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma ile sonuçlanan döngüsel yüklere maruz kalır ve istatistiksel olarak uçak bileşenlerinde meydana gelen hizmet arızalarının %60'ından fazlası yorgunluk kaynaklıdır. Metal yorgunluğunun anlaşılması, önlenmesi ve yönetilmesi, hava taşıtlarının güvenli ve ekonomik bir şekilde işletilmesi için vazgeçilmezdir (Molent, 2024).

Havacılıkta Metal Yorgunluğunun Tarihi ve Dönüm Noktaları

Metal yorgunluğunun yıkıcı etkileri, 19. yüzyılda demiryolu akslarının kırılmasıyla (Wöhler, 1870) keşfedilmiş olsa da havacılıktaki önemi 1950'lerde ortaya çıkmıştır. Dünyanın ilk ticari jet yolcu uçağı olan De Havilland Comet'in 1950'li yılların ortalarında özellikle 1954'te yaşadığı kaza (Şekil 1), metal yorgunluğunun havacılıkta yol açabileceği felaketlerin ilk ve en önemli kanıtı oldu. Kazaların nedeni, kare şeklindeki pencere köşelerinden başlayan ve kabinin yüksek irtifada tekrar eden basınçlanma/basınç boşaltma döngüleri sonucu ilerleyen çatlaklardı. Kare köşeler, gerilim konsantrasyonunu artırarak çatlak oluşumunu hızlandırmıştı.



Şekil 1: 1954'te kaza yapan De Havilland Comet uçağı (Simons, 2020)

28 Nisan 1988'de, Aloha Airlines Uçuş 243 Kazası (Saraçyakupoğlu, 2020) Boeing 737-200 uçağının gövdesinin üst kısmının büyük bir bölümü (yaklaşık 5.5 metre) uçuş sırasında koptu (Şekil 2). Uçağın gövdesinde biriken çok sayıda küçük yorgunluk çatlağı, perçinli bağlantı noktalarında korozyonla birleşerek birleşmiş ve kritik bir yapısal arızaya yol açmıştı. Uçağın yüksek uçuş sayısı (25.496 uçuş saatine karşın yaklaşık 89.680 iniş-kalkış) yorgunluğun temel sebebini oluşturuyordu (Malumatfuruş, 2024).


Şekil 2: Aloha Airlines Uçuş 243 Kazası (Saraçyakupoğlu, 2020)

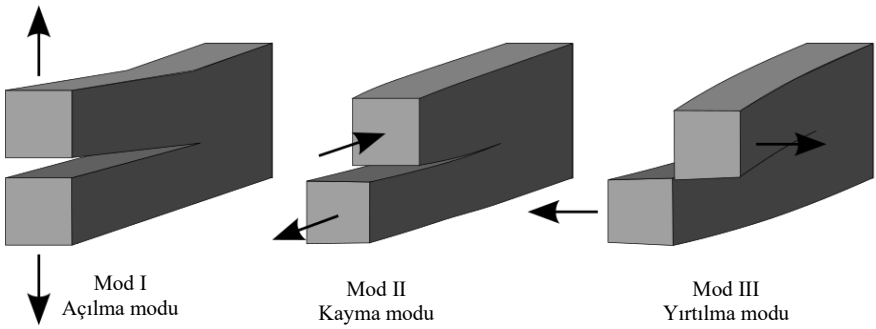
Bu kazalar, havacılık mühendisliğini Güvenli Ömür felsefesinden, çatlak varlığını kabul eden Hasar Toleranslı tasarım felsefesine geçmeye zorlayan en büyük tetikleyici olmuştur (Hampden, 1955).

Kırılma mekaniği, çatlaklı bir malzemenin taşıyabileceği güvenli yükü belirlemek, çatlağın hangi şartlarda ilerleyeceğini öngörmek, ani ve gevrek kırılmaları önlemek ve yapıların (uçak, basınçlı kap, köprü vb.) emniyetli ömür tahminini yapmaktır.

Yorgunluk Analizine Kırılma Mekaniği Perspektifi

Kırılma Mekaniği, malzemede oluşan veya oluşacak olan bir çatlağın nasıl davranacağını ve ne kadar hızlı büyüyeceğini inceler. Geleneksel yorgunluk analizi, malzemenin çatlak oluşana kadar kaç döngüye dayanacağını tahmin eden Gerilim-Döngü sayısı üzerine kurulmuştur. Bu yaklaşım, Hasar Toleranslı Tasarımın temelini oluşturur. Çatlağın başlamasından ziyade, mevcut bir çatlağın çevrimsel yükler altında nasıl ilerleyeceğini ve ne zaman kritik boyuta ulaşacağını tahmin etmeye odaklanır (Hu et al., 2022).

Kırılma mekaniği, I. Dünya Savaşı sırasında İngiliz havacılık mühendisi AA Griffith tarafından geliştirilmiştir (Griffith, 1921). Griffith çatlağı terimi, gevrek malzemelerin kırılmasını açıklamak için geliştirilmiştir. Çatlağın ucundaki plastik bölge, çatlak uzunluğuna göre küçük olduğunda, çatlak ucundaki stres durumu, malzeme içindeki elastik kuvvetlerin sonucudur ve lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) olarak adlandırılır ve LEKM, gerilme şiddeti faktörü (K) ve gerinim enerji boşalma hızı (G) kullanılarak karakterize edilebilir. Şekil 3.'te görüldüğü gibi kırılma mekaniğinde 3 tip zorlama şekli vardır.



Şekil 3: Zorlama durumları

Kırılma mekaniği kullanımıyla, gevrek malzemeler için çatlak uçlarındaki eşik gerilme şiddet faktörü veya gerinim enerji boşalma hızı ile kırılma tokluğu hesabıyla çatlağın ilerleme hızını ve ani kopma kuvvetini tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirilmekte, sünek malzemelerde ise çatlak ucundaki davranışı karakterize etmek için J-integral, çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Griffith, deneylerde gözlemlenen düşük kırılma mukavemetinin yanı sıra mukavemetin boyuta bağımlılığının, dökme malzemedeki mikroskobik kusurların varlığından kaynaklandığını öne sürdü. Gevrek bir malzemede bir çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıdır. Buna göre;

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2.\gamma.E}{\pi.a}} \qquad (1)$$

Denklem 1'e göre; σf, kırılma gerilmesi, γ, yüzey enerjisi, E, elastiklik modülü ve a, çatlak boyunun yarısını ifade eder. Daha sonra Irwin (1997), sünek malzemelerde (ve hatta kırılgan gibi görünen malzemelerde bile), çatlağın ucunda bir plastik bölge oluşur. Uygulanan yük arttıkça, çatlak büyüyene ve çatlak ucunun arkasındaki elastik olarak gerilen malzeme boşalana kadar plastik bölgenin boyutu artar. Çatlak ucunun yakınındaki plastik yükleme ve boşaltma döngüsü, enerjinin ısı olarak dağılmasına yol açar. Bu nedenle, kırılgan malzemeler için Griffith tarafından geliştirilen enerji dengesini temsil eden bir formülasyon eklemiştir. Buna göre gerinim enerji boşalma hızı (G) Denklem 2 ile hesaplanır.

$$G = \frac{\pi.a.\sigma^2}{E} \tag{2}$$

Kırılma mekaniğinde düzlem gerilme için, yorgunluk analizi için çatlak büyüme hızını belirleyen en temel parametre ***Gerilme Şiddet Faktörü*** olup ***K*** ile sembolize edilir. Bu parametre, döngüsel yükleme altında çatlak ucundaki gerilme alanının ne kadar değiştiğini ifade eder. Çatlak büyüme hızı ile bu parametre arasındaki ilişki genellikle literatürde Paris Kanunu (veya Paris-Erdoğan Denklemi) olarak bilinen bağıntı ile açıklanır (Paris & Erdogan, 1963).

Yorgunluk çatlak büyüme hızı (da/dN), yani her bir yükleme çevriminde (dN) çatlak boyundaki artış (da), matematiksel olarak şu formülle ifade edilir:

$$\frac{da}{dN} = C.\Delta K^m \tag{3}$$

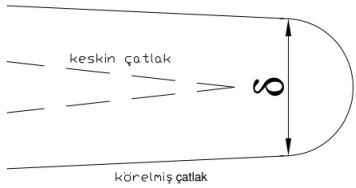
Denklem 3.'te da/dN, çatlak büyüme hızı, ΔK, gerilme şiddet faktörü ve C ve m, malzemeye, numune geometrisine ve yükleme koşullarına bağlıdır. Bu nedenle her malzeme için farklıdırlar ve deneysel olarak elde edilmelidirler. Paris-Erdogan yasası, geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilir ve geniş bir gerilim oranı aralığında çatlak yayılma davranışlarını nispeten doğru bir şekilde tanımlar. K parametresi, sadece uygulanan gerilmeye değil, aynı zamanda mevcut çatlağın boyuna ve parçanın geometrisine de bağlıdır.

$$K = Y.\sigma.\sqrt{\pi.a} \tag{4}$$

Denklem 4.'te K, gerilme şiddeti faktörü (MPa√m), Y, geometri faktörü (boyutsuz), σ, uygulanan nominal gerilme (MPa), a, çatlak yarı uzunluğu (m) ifade etmektedir.

Lineer elastik kırılma mekaniğinde akma dayanımında düşük gerilme değerleri ve düzlem şekil değiştirme halleri esastır. Çatlak dibinde plastik deformasyon bölgesi büyükse lineer elastik kırılma şartları geçerliliğini yitirir

ve elastik-plastik kırılma mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM'de J-integrali veya çatlak ucu açıklığının deplasmanı (CTOD) gibi yöntemler kullanılır. CTOD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışı verir.



Şekil 4: Çatlak ucu açılma miktarı (CTOD)

Kırılan test numunelerine bakıldığında, çatlak yüzeyinin kırılma öncesinde hareket ettiğini plastik deformasyonun keskin çatlağı körelttiğini Şekil 4.'te görebiliriz. Bu gözlem sonucunda Wells (1963) çatlak ucu açılma miktarını (δ) kırılma tokluğunun ölçüsünü yapmıştır. Buna göre;

$$\delta = \frac{4}{\pi}\frac{K_I^2}{E\sigma_{ys}} \tag{5}$$

Wells, 4/π katsayısının enerji dengesi yaklaşımıyla uyumsuz olduğunu ortaya koymuş ve bu nedenle söz konusu katsayıyı daha sonra ifadeden çıkarmıştır. CTOD kırılma kriteri, kırılmanın, numune konfigürasyonunda ölçülen kritik bir δ_c değerine ulaşıldığında ya da bu değerin aşıldığı durumda gerçekleştiğini varsayar; başka bir ifadeyle, yapısal uygulama için $\delta \geq \delta_c$ koşulu esas alınır. Denklem 4'te görüldüğü üzere, bu yer değiştirme temelli kırılma kriteri, lineer elastik bir çatlak için gerilme şiddeti faktörü (K) kriteri ile eşdeğerdir.

J integrali lineer olmayan malzemeler için kırılmayı karakteri eden parametre olarak kullanılır. Elastik-plastik deformasyon, lineer olmayan elastik olarak idealize edilir. Rice (1968) LEKM limitlerinin doğrulandığı sınırlarda bu konunun temellenmesini sağlamıştır. J integrali elastik-plastik malzemede, çatlak ucundaki gerilme-gerinim alanının şiddetini belirleyen bir parametredir. K'nın oynadığı role benzer şekilde kırılma olayını kontrol eden bir parametre olmaktadır. J integral kavramı da enerji dengesinin kurulması esasına dayanmaktadır.

$$J = -\frac{dU_p}{Bda} \tag{6}$$

Denklem 6'da Up, çatlağın ilerlemesi için mevcut enerji, a, çatlak uzunluğu ve B ise kalınlıktır.

METAL YORGUNLUĞUNUN TEMEL MEKANİZMALARI VE MODELLERİ

Yorulma Sürecinin Aşamaları

Yorgunluk, genellikle mikroskobik düzeyde başlayan ardışık üç aşamada gerçekleşen yapısal bir süreçtir.

Çatlak Başlaması

Çatlak başlangıcı, malzemenin yüzeyinde veya yüzey altındaki tanecik sınırları, inklüzyonlar, yüzey çizikleri gibi mikro yapısal düzensizliklerde meydana gelir. Tekrarlanan döngüsel yükleme, yüzey yakınındaki tanelerde plastik deformasyon oluşturur. Bu deformasyon, mikroskobik düzeyde kayma bantları meydana getirir. Bu bantlar, yüzeyde minik çıkıntılar (ekstrüzyon) ve girintiler (intrüzyon) şeklinde belirir. Ekstrüzyon/intrüzyon çiftleri, yüzeyde gerilim konsantrasyon noktaları oluşturarak yorulma çatlağının tohumunu (mikro çatlak) oluşturur. Bu çatlak, tipik olarak ilk tanecik boyunca ilerler (Krupp, 2007).

Çatlak İlerlemesi

Başlangıç çatlağı genellikle birkaç tanecik boyutundan sonra kritik bir boyuta ulaştığında, çatlak ilerleme aşamasına geçer.

Faz I İlerlemesi: Çatlak, genellikle ana yükleme yönüne 45^{o} açıyla maksimum kayma gerilmesi düzleminde ilerler. Bu aşama yavaştır ve genellikle tanecik sınırları boyunca veya zayıf kayma düzlemlerinde gerçekleşir.

Faz II İlerlemesi: Çatlak yön değiştirir ve uygulanan gerilme yönüne dik olarak ilerlemeye başlar (Anderson, 2017). Bu, en uzun süren ve en öngörülebilir aşamadır. Çatlak ilerlemesi sırasında, yorulma kırılmasının ayırt edici özelliği olan yorgunluk çizgileri oluşur. Her bir çizgi, teorik olarak bir yükleme döngüsüne karşılık gelir.

Kırılma

Çatlak, malzemenin kırılma tokluğu $K_{ıc}$'yi aşan bir gerilme şiddeti faktörüne ulaştığında parça ani ve kontrolsüz bir şekilde kırılarak kopar. Bu bölge, genellikle hızlı bir şekilde yayılan kaba, mat bir kırılma yüzeyine sahiptir ve yorgunluk çizgileri içermez (Dowling, 2018).

Yorgunluk Yaşam Süresi Modelleri

Mühendislik uygulamalarında, yorgunluk ömrünü tahmin etmek için üç ana model kullanılır.

Gerilme-Ömür (S-N) Eğrileri Yöntemi

Yorgunluk verileri, Gerilme Genliği (S)- Çevrim Sayısı (N) eğrileri (Wöhler eğrileri) kullanılarak toplanır (Wöhler, 1860). Bu eğriler, genellikle N>104 yüksek çevrimli yorgunluk bölgesinde yaygın olarak kullanılır.

Gerinim-Ömür (Ɛ-N) Yöntemi

Düşük çevrimli yorgunluk ($N<10^4$) bölgesinde, gerilme yerine birim şekil değiştirme **Ɛ** kullanılır. Plastik birim şekil değiştirme genliği ile ömür çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi kurar ve motor bileşenlerinin termal ve mekanik zorlanmasını analiz etmek için kritiktir (Manson, 1953; Coffin, 1954; Suresh, 1998).

Kırılma Mekaniği Yöntemi

Çatlak başlangıcını değil, çatlak varlığını kabul eder. Gerilim Yoğunluğu Faktörü (ΔK) ve Paris-Erdogan Yasası kullanılarak çatlak büyüme hızı (da/dN) hesaplanır.

Ortalama Gerilme Etkisi ve Yük Sıralaması

Ortalama gerilme (σ_m), bir yükleme döngüsünün maksimum ve minimum gerilmelerinin ortalamasıdır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks}+\sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

Burada σ_{maks} ve σ_{min} sırasıyla maksimum ve minimum gerilme değerleridir. Gerilme genliği σ_a sabit kalsa bile, ortalama gerilmenin değeri yorgunluk ömrünü önemli ölçüde değiştirir. Yükleme çevriminin ortalama gerilmesi σ_m, yorgunluk ömrünü önemli ölçüde etkiler. Yüksek çekme ortalama gerilmeleri, yorgunluk ömrünü kısaltır (Dowling, 2018). Havacılıkta karmaşık yükleme şartları, ortalama gerilme ilişkileri kullanılarak tek bir eşdeğer gerilme genliğine indirgenir (Stephens et al., 2001). Ayrıca, uçuş sırasındaki yüksek yük zirveleri gibi yüklerin sırası, çatlak büyüme hızını etkileyen gecikme veya hızlanma gibi etkiler yaratabilir (Anderson, 2017; Suresh, 1998).

HAVA TAŞITLARINDA YORULMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Hava taşıtlarının yapısal yorulma ömrü, sadece kullanılan malzemenin özelliklerine değil, aynı zamanda çalışma ortamına ve maruz kaldığı yüklere bağlı olarak karmaşık birçok faktör tarafından belirlenir (Handojo, 2022).

Yükleme Şartlarına Bağlı Faktörler

Bunlar, uçağın uçuş görevinden kaynaklanan ve yapıya uygulanan mekanik zorlanmalardır. Yükleme Genliği σa, en temel yorgunluk faktörüdür; genlik arttıkça ömür hızla azalır. Türbülans, askeri uçuşlardaki yüksek G manevraları gibi (Handojo, 2022). Yükleme Döngüsü Sayısı (N), uçağın maruz kaldığı iniş-kalkış (basınç döngüsü) ve titreşim sayısıdır. Yüksek frekanslı, kısa menzilli uçuşlar (Comet kazaları örneği) ömrü kısaltır (Voß & Klimmek, 2023). Ortalama Gerilme σ_m, yük döngüsünün ortalaması olup, basınçlı kabinin gövdede oluşturduğu kalıcı çekme gerilmesi gibi pozitif ortalama gerilme ömrü kısaltır (Ismaiel, 2023). Yük Sıralaması Etkisi ise rastgele yükleme sırasındaki yüksek yük zirveleri, takip eden çatlak büyümesini yavaşlatabilir. Bir kalkış-iniş döngüsünü takiben yaşanan sert bir türbülans yüklemesi de örnek olarak verilebilir (Al-Bahkali et al., 2021; Tian et al., 2024).

Yapısal ve Geometrik Faktörler

Bu faktörler, parçanın tasarımı ve imalat kalitesiyle ilgilidir.

Gerilme Konsantrasyonu: Keskin köşeler, delikler, pencereler, perçin delikleri gibi geometrik süreksizlikler, uygulanan nominal gerilmeden çok daha yüksek lokal gerilmeler yaratır ve çatlak başlangıcını hızlandırır. Havacılıkta bu, genellikle bağlantı noktaları ve gövde penetrasyonlarında kritiktir (Nikitin et al., 2022).

Yüzey Bitişi: Yüzey ne kadar pürüzsüzse, çatlak başlangıcı o kadar zorlaşır. Kaba yüzeyler veya imalat sırasında oluşan çizikler mikro çatlak başlangıç noktası olarak işlev görür (Chen et al., 2025).

Artık Gerilmeler

Basma Artık Gerilmeleri: Yüzeye uygulanan bilyalı dövme gibi işlemlerle yüzeyde basma gerilmesi oluşturulur. Bu, çatlak kapanmasına neden olarak yorgunluk ömrünü uzatır.

Çekme Artık Gerilmeleri: Kaynak veya sert işleme süreçlerinden kaynaklanırsa, yorgunluk ömrünü kısaltır.

Delik Kalitesi ve Toleransı: Perçin ve cıvata deliklerinin açılma yöntemi (delme, zımbalama, raybalama) ve delik çevresindeki yüzey bütünlüğü, yorgunluk ömrü için kritiktir. Yüksek kaliteli delik açma teknikleri, gerilim konsantrasyonunu ve çatlak başlangıcını azaltır (Pichon et al., 2023).

YAPISAL BÜTÜNLÜK VE YORGUNLUK YÖNETİMİ FELSEFELERİ

Güvenli Ömür Yaklaşımından Geçiş

Tarihsel olarak kullanılan güvenli ömür yaklaşımı, bir parçanın arıza olasılığının belirli bir limitin altında olduğu, hesaplanan çevrim veya saat sayısından sonra, herhangi bir görünür hasar olmasa bile değiştirilmesini gerektirir. Bu yaklaşım, basitliği nedeniyle motor parçaları gibi sınırlı erişim alanları için hala geçerli olsa da bu felsefenin üretimden kaynaklanan kusurları ve çatlak başlangıcındaki doğal değişkenliği yönetmede yetersiz kaldığını göstermiştir (Kedir & Lemu, 2023). Modern sivil havacılık yapıları için bu felsefe terk edilmiştir.

Hasara Toleranslı Tasarım Felsefesi

Modern havacılık hasara toleranslı felsefeyi benimser. Bu felsefe, yapıların, kritik bir çatlak boyutuyla bile yeterli artık mukavemete sahip olmasını ve çatlağın, bir sonraki denetim aralığından önce kritik boyuta ulaşmayacak kadar yavaş büyümesini sağlamayı amaçlar (Caglar et al., 2025). Hasara tolerans analizi, sürekli olarak Paris Kanunu ve ilgili kırılma mekaniği modellerini kullanır.

İkili Yük Yollu Yapılar

İkili yük yollu yapılar, birincil hedefi, uçağın ana yük taşıyıcı elemanlarından birinde yorgunluk çatlağı veya kaza sonucu hasar gibi bir arıza meydana geldiğinde bile, yapının ani ve yıkıcı bir şekilde başarısız olmasını önlemek olan bir tasarım felsefesidir. Bu felsefenin temelinde, yükün birden fazla bağımsız yol veya eleman üzerinden aktarılması yatar (Caglar et al., 2025; Chen, 2024).

Çoklu Bölge Hasarı

Çoklu bölge hasarı, genellikle basınçlı uçak gövdesinin perçinli ek yerleri, kanat bağlantıları veya diğer bağlantı hatları boyunca, birbirine yakın ve aynı anda gelişen çok sayıda küçük yorgunluk çatlağının varlığını ifade eder. Yaşlanan uçaklarda, birbirine yakın perçin deliklerinde aynı anda birden fazla küçük çatlağın oluşması en büyük tehdittir. Bu küçük çatlaklar, birleşerek hızla kritik bir büyük çatlak oluşturabilir. Çoklu bölge hasar yöntemi, yaşlanan uçak programlarının temel odak noktasıdır (Topal et al., 2023).

Yapısal Sağlık İzleme

Bu yöntem bir mühendislik yapısının tüm operasyonel ömrü boyunca, yapıya entegre edilmiş sensörler aracılığıyla hasarın varlığını, yerini, tipini ve boyutunu gerçek zamanlı veya yakın gerçek zamanlı olarak tespit etmeyi ve karakterize etmeyi amaçlayan ileri bir teknolojidir (Broer et al., 2022). Temel olarak geleneksel tahribatsız muayene yöntemlerinin periyodik doğasına bir

alternatif sunar ve bakım felsefesini planlı yaklaşımdan durum bazlı yaklaşıma dönüştürme potansiyeli taşır, geleneksel periyodik denetimlerine olan bağımlılığı azaltarak, bakımın durum bazlı yapılmasına imkân tanır (Wang et al., 2022).

DENETİM VE BAKIM STRATEJİLERİ

Havacılıkta yapısal bütünlüğün sürdürülmesi, sadece iyi tasarıma değil, aynı zamanda operasyonel ömür boyunca uygulanan etkili denetim ve bakım stratejilerine de bağlıdır. Hasara Toleranslı tasarım felsefesinin başarısı, çatlakların kritik boyuta ulaşmadan güvenilir bir şekilde tespit edilmesine dayanır.

Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene yöntemleri, malzemeye zarar vermeden veya malzemenin işlevselliğini bozmadan, yüzey ve yüzey altı kusurların, çatlakların ve yapısal hasarların tespit edilmesini sağlayan kritik bir süreçtir.

Yüzey Çatlak Tespiti

Girdap Akımları: Elektrik iletkeni malzemelere uygulanan indüklenmiş bir manyetik alan kullanır. Yüzeyde veya yüzeye yakın bir çatlak varsa, bu çatlak girdap akımlarının akışını bozar ve sensör bu değişimi algılar. Perçin delikleri etrafındaki çatlakların tespiti için en hassas ve yaygın kullanılan yöntemdir.

Sıvı Penetrant Testi: Sadece yüzeyi açık olan çatlaklar için kullanılır. Çatlak içine nüfuz eden boya veya floresan madde kullanılır ve ardından yüzey temizlenerek çatlak içindeki madde dışarı çekilir, çatlak görünür hale gelir. Hızlı ve düşük maliyetlidir.

Manyetik Parçacık Testi: Yalnızca ferromanyetik malzemeler için uygundur (çoğu havacılık Alüminyum alaşımı için uygun değildir, ancak çelik iniş takımları için kritiktir). Parça manyetize edilir ve yüzeye uygulanan manyetik parçacıklar, çatlağın yarattığı kaçak manyetik akı bölgesinde toplanır.

Hacimsel Kusur Tespiti

Ultrasonik Test: Yüksek frekanslı ses dalgaları malzemeye gönderilir. İç kusurlar (çatlaklar, boşluklar, kalıntı inklüzyonlar) ses dalgalarını yansıtır ve yansıyan sinyalin zamanı ve şiddeti analiz edilerek kusurun yeri ve boyutu belirlenir. Kalın kesitli parçalarda ve kompozit yapılardaki katman ayrılması tespitinde vazgeçilmezdir.

Radyografi (RT): X veya Gama ışınları kullanılarak malzemenin iç yapısının görüntülenmesidir. Özellikle iç kusurları, montaj hatalarını, korozyon hasarını ve malzeme yoğunluğundaki değişimleri tespit etmede etkilidir.

Yaşlanan Uçak Programları

Yüksek çevrim sayısına ulaşmış uçak filolarının bütünlüğünü korumak amacıyla, düzenleyici kurumlar (FAA, EASA), yaşlanan uçak programlarını zorunlu kılmıştır. Bu programlar, uçuş saati ve çevrim sayısına bağlı olarak kritik alanlarda daha sıkı ve tekrarlayıcı denetim aralıkları ve gövde derisi kalınlığının ölçülmesi, bağlayıcı elemanların sökülerek denetimi gibi yöntemleri gerektirir. Bu programlar, çoklu bölge hasarı ve geniş alan korozyonu riskini kontrol altında tutmayı amaçlar (Rouchon & Bos, 2009).

Yorgunluk Onarımı ve Güçlendirme Teknikleri

Yapısal denetimler sonucunda yorgunluk çatlağı tespit edilen veya hasar görmüş bileşenlerin işlevsel bütünlüğünü eski haline getirmek ve servis ömrünü uzatmak için bir dizi özel onarım ve güçlendirme stratejisi uygulanır.

Hasar Kontrolü ve Geçici Onarım

Onarım sürecinin ilk adımı genellikle çatlağın yayılmasını kontrol altına almaktır. Küçük bir çatlağın ilerlemesini geçici olarak durdurmak ve kritik onarım yapılana kadar güvenli bir süre kazanmak amacıyla, çatlak ucuna küçük bir delik açılır. Delik açılması, çatlak ucundaki teorik olarak sonsuz olan gerilme yoğunluğunu, daha kabul edilebilir bir değere sahip olan dairesel bir geometriye dağıtarak çatlak ilerleme mekanizmasını bozar. Ancak bu, kalıcı bir çözüm olmayıp, en kısa sürede kalıcı onarım gerektirir.

Kalıcı Onarım

Kalıcı onarım, hasarlı elemanın yük taşıma yeteneğini geri kazanmayı amaçlar:

Yama Plakaları: Hasar görmüş bölgenin üzerine, yükü çatlaklı bölgeden sağlam malzemeye etkili bir şekilde aktaracak ek bir plaka (yama) bağlanır. Bu plakalar, ya cıvatalı/perçinli bağlantı ya da yapıştırmalı kimyasal bağlantı yöntemleri ile sabitlenir.

Yapıştırmalı Yamalar: Özellikle kompozit yama plakaları kullanılarak yapılan bu yöntem, yükü daha geniş bir alana yaydığı için gerilme yoğunlaşmasını minimuma indirir ve yorgunluk performansını mekanik bağlantılara göre daha iyi korur. Bu teknoloji, özellikle Alüminyum gövde panellerinin onarımında yaygınlaşmıştır.

Kullanılmış Bağlayıcı Elemanların Değişimi: Çatlak başlangıcının kaynağı çoğunlukla perçin veya cıvata delikleri olduğundan, onarım sırasında eski, yorgunluğa maruz kalmış bağlantı elemanları, titanyum veya çelik gibi yeni ve daha yüksek dayanımlı bağlantı elemanları ile değiştirilir.

Yorgunluk Ömrünü Uzatma Yöntemleri

Yorgunluk hasarını sadece onarmak yerine, kritik bölgelerin gelecekteki yorgunluk direncini artırmak için uygulanan yöntemlerdir:

Soğuk Genişletme: Bu, özellikle kritik deliklerde (perçin, cıvata) uygulanan bir güçlendirme yöntemidir. Delik içinden, delik çapından biraz daha büyük ve sert bir mil geçirilir. Bu işlem, deliğin etrafındaki malzemeyi plastik olarak deforme eder ve deliğin yüzeyine yakın bölgede kalıcı, yüksek basma kalıntı gerilmeleri oluşturur. Bu basma gerilmeleri, çekme yorgunluk gerilmelerinin etkisini nötralize ederek çatlak başlatma ömrünü önemli ölçüde uzatır.

Bilye Püskürtme: Yüzeyin sert ve küçük parçacıklarla (saçmalarla) bombardıman edilmesiyle yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluşturulur. Bu, özellikle iniş takımları ve motor şaftları gibi parçaların yüzey yorulma direncini artırmak için kritik bir ön işlemdir (Attolico, 2023).

YORULMA MODELLEMESİ, ANALİZİ VE GELECEK EĞİLİMLERİ

Yorgunluk, karmaşık ve doğal olarak değişken bir süreç olduğundan, gelecekteki yapısal bütünlüğü sağlamak için sürekli olarak daha sofistike modelleme, analiz ve tahmin yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelişmiş Yorgunluk Tahmin Modelleri

Havacılıkta yükleme çevrimleri genellikle rastgele ve karmaşıktır. Bu karmaşık yüklemelerin etkisini tek bir eşdeğer yüklemeye indirgemek için hasar biriktirme kuralları yaygın olarak kullanılır, ancak bu kural yük sırası etkilerini göz ardı etmesi nedeniyle sınırlıdır. Bu eksiklikleri gidermek için modern yaklaşımlar:

Olasılıksal Yorgunluk Modellemesi

Modern havacılık analizi, sadece deterministik modellere değil, aynı zamanda yükleme, malzeme özellikleri ve tahribatsız malzeme testleri tespit olasılığı gibi değişkenlerdeki doğal değişkenliği hesaba katan olasılıksal yorgunluk modellerine odaklanmaktadır (Wirsching et al., 2006). Olasılıksal modeller, bir parçanın belirli bir uçuş saatinde arızalanma olasılığını tahmin ederek, bakım ve denetim programlarının risk seviyesine göre optimize edilmesini sağlar. Güvenilirlik eğrileri, yapının zaman içinde güvenilirlik seviyesini gösteren eğriler üretir.

Lineer Hasar Birikimi ve Sınırlamaları

Geleneksel olarak, karmaşık, değişken genlikli yükleme çevrimlerinin etkisini tek bir eşdeğer yüklemeye indirgemek için hasar birikimi kuralları kullanılır. Bu kural, basitçe her yük çevriminin bağımsız olarak hasar yarattığını ve bu hasarların toplamının kritik değere (D=1) ulaştığında kırılmanın gerçekleşeceğini varsayar:

$$D = \sum \frac{ni}{Ni} = 1 \quad (8)$$

Burada n_i, gerilme seviyesindeki çevrim sayısı, N_i ise malzemenin bu seviyede dayanabileceği çevrim sayısıdır. Ancak bu kural, yüksek bir yük zirvesinin ardından çatlak büyüme hızının yavaşlaması gibi yük sırası etkilerini dikkate almada yetersiz kalır.

Eklemeli Üretimin Zorlukları

Eklemeli Üretim, havacılık sektörüne karmaşık geometrilerde hafif parçalar üretme, tedarik zincirini kısaltma ve parça konsolidasyonu (birden fazla parçayı tek bir parçaya indirme) gibi büyük avantajlar sunsa da bu parçaların yorgunluk performansı açısından önemli zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar genellikle üretim yönteminin doğasından kaynaklanır. Eklemeli üretim ile üretilen Titanyum ve Nikel parçalar, üretim yöntemine özgü: gözeneklilik iç kusurları, yüzey pürüzlülüğü, termal gradyanlardan kaynaklanan yüksek kalıntı gerilmeler gibi faktörler nedeniyle düşük yorgunluk performansı sergileyebilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için sıcak izostatik presleme gibi ikincil işlemler zorunludur.

Dijital İkiz ve Veri Bilimi

Geleceğin yorgunluk analizi ve bakım yönetimi, fiziksel ve sanal dünyalar arasındaki entegrasyona, yani dijital ikiz konseptine doğru ilerlemektedir. Dijital İkiz, uçak gibi karmaşık bir fiziksel varlığın veya motor türbin diski gibi kritik bir bileşeninin tüm ömrü boyunca gerçek zamanlı verilerle beslenen sanal bir kopyasını oluşturur. Bakım ve yorgunluk yönetimi, uçuş saatleri, manevra yükleri, çevresel sıcaklıklar gibi, yapının gerçek zamanlı performans verilerini toplar ve bu verileri yapısal modellerle birleştirir. Bu, parçanın kalan ömrünü çok daha kesin bir şekilde tahmin etmeyi ve bakım programlarını dinamik olarak optimize etmeyi sağlar.

SONUÇ

Metal Yorgunluğu, hava taşıtlarının operasyonel ömrü boyunca karşılaştığı en temel yapısal bütünlük sorunu ve mühendislik zorunluluğu olmaya devam etmektedir. Bu bölümde detaylandırıldığı gibi, yorgunluk fenomeni; mikro düzeyde çatlak başlatma, çevrimsel ilerleme ve nihayetinde ani kırılma olmak üzere üç aşamalı, dinamik bir süreçtir. Havacılık endüstrisinin, 1950'lerdeki yıkıcı De Havilland Comet kazalarından elde ettiği acı dersler, Güvenli Ömür felsefesinden, çatlakların varlığını kabul eden Hasara Toleranslı tasarım felsefesine geçişi zorunlu kılmıştır.

Hasara toleranslı tasarım felsefesi, yapının bir çatlak oluşumu durumunda dahi yeterli artık mukavemetine sahip olmasını ve çatlağın bir sonraki denetim aralığından önce kritik boyuta ulaşmayacak kadar yavaş büyümesini sağlamayı amaçlar. Bu yaklaşımın başarısı, büyük ölçüde titiz tahribatsız muayene yöntemlerine ve yaşlanan uçak programlarının disiplinli bir şekilde uygulanmasına bağlıdır. Özellikle çoklu bölge hasarı gibi karmaşık tehditler, bakım programlarının sürekli revizyonunu ve daha hassas, olasılıksal analiz yöntemlerinin benimsenmesini gerektirmektedir.

Havacılık güvenliğinin geleceği, teknolojik entegrasyonda yatmaktadır. Yapısal sağlık İzleme teknolojileri, çatlak tespitini periyodik denetim döngülerinden çıkarıp gerçek zamanlı durum bazlı bakıma taşıma potansiyeli sunmaktadır. Bu sensör verilerinin, Dijital ikiz konsepti içinde yapay zeka algoritmalarıyla birleştirilmesi, her bir uçağın veya kritik bileşenin kalan faydalı ömrünün benzersiz operasyonel geçmişine göre çok daha kesin tahmin edilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, yorgunlukla mücadele artık sadece ileri alaşımlar gibi sağlam malzeme seçimi veya akıllı tasarım meselesi olmaktan çıkmış; malzeme bilimi, tasarım mühendisliği, veri bilimi ve tahminsel bakımın kesişim noktasında yer alan sürekli bir çaba haline gelmiştir. Eklemeli Üretim gibi yenilikçi teknolojiler bile, sıcak izostatik presleme gibi ikincil işlemlerle yorgunluk kusurları giderildiğinde havacılık standartlarına ulaşabilmektedir. Havacılık endüstrisi, bu bütünleşik yaklaşımla yorgunluk riskini yönetmeye ve böylece gelecekteki hava taşıtlarının güvenliğini ve ekonomik ömrünü maksimize etmeye devam edecektir.

REFERANSLAR

Al-Bahkali, E. A., Elkenani, H., & Souli, M. (2021). Failure and fatigue life due to random vibration in aircraft applications. In *Multiphysics Simulations in Automotive and Aerospace Applications* (pp. 131-154). Elsevier.

Attolico, M. A. (2023). The role of surface treatments on fatigue design of aircraft components.

Bhat, S., & Patibandla, R. (2011). Metal fatigue and basic theoretical models: a review. *Alloy steel-properties and use*, *22*, 203-238.

Broer, A. A., Benedictus, R., & Zarouchas, D. (2022). The need for multi-sensor data fusion in structural health monitoring of composite aircraft structures. *Aerospace*, *9*(4), 183.

Caglar, H., Ayre, D., Mills, A., Xu, Y., & Skote, M. (2025). A review of polymer composites and adhesives for aircraft landing gear applications.

Chen, X. (2024). *Scheduled maintenance optimization for aircraft composite structures considering uncertainty and structural health monitoring* RMIT University].

Chen, X., Hu, W., Zeng, Y., Li, J., Zhang, D., Zhan, Z., & Meng, Q. (2025). A damage mechanics-based fatigue life prediction method for TC4 components considering combined influence of scratch defects and structural geometric features. *International Journal of Fatigue*, 109319.

Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, *221*(582-593), 163-198.

Hampden, F. (1955). The Organisation of the Ministry of Transport and Civil Aviation. *Public Administration*, *33*(1), 95-95.

Handojo, V. (2022). Investigation of load alleviation in aircraft pre-design and its influence on structural mass and fatigue. *Aerospace Science and Technology*, *122*, 107405.

Hu, K., Yang, P., & Xia, T. (2022). Ultimate strength prediction of cracked panels under extreme cyclic loads considering crack propagation. *Ocean Engineering*, *266*, 112948.

Irwin, G. R. (1997). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.

Ismaiel, A. (2023). Wind turbine blade dynamics simulation under the effect of atmospheric turbulence. *Emerging Science Journal*, *7*(1), 162-176.

Kedir, Y. A., & Lemu, H. G. (2023). Prediction of fatigue crack initiation under variable amplitude loading: literature review. *Metals*, *13*(3), 487.

Khalifeh, A. (2024). Fatigue Failure in Aircraft Materials. In *Failure in Aircraft Materials* (pp. 63-79). Springer.

Molent, L. (2024). *Aircraft fatigue management*. Springer.

Nikitin, I., Burago, N., & Nikitin, A. (2022). Damage and fatigue fracture of structural elements in various cyclic loading modes. *Mechanics of Solids*, *57*(7), 1793-1803.

Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of basic engineering*, *85*(4), 528-533.

Pichon, G., Daidié, A., Paroissien, E., & Benaben, A. (2023). Quasi-static strength and fatigue life of aerospace hole-to-hole bolted joints. *Engineering Failure Analysis*, *143*, 106860.

Rice, J. R. (1968). *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*.

Rouchon, J., & Bos, M. (2009). Fatigue and damage tolerance evaluation of structures: the composite materials response.

Saraçyakupoğlu, T. (2020). Fatigue Studies in Aviation in Light of the 1988 Aloha Airlines Incident.

Simons, G. M. (2020). *Comet!: The World's First Jet Airliner*. Pen and Sword.

Tavares, S., & De Castro, P. (2017). An overview of fatigue in aircraft structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *40*(10), 1510-1529.

Tian, L., Wang, J., Zhang, C., Guo, Y., & Chang, L. (2024). Random Vibration Fatigue Life Analysis of Aeroengine Bolts Using the Frequency-Domain Method. *Fatigue of Aircraft Structures*.

Topal, S., Al-Nadhari, A., Yildirim, C., Beylergil, B., Kan, C., Unal, S., & Yildiz, M. (2023). Multiscale nano-integration in the scarf-bonded patches for enhancing the performance of the repaired secondary load-bearing aircraft composite structures. *Carbon*, *204*, 112-125.

Voß, A., & Klimmek, T. (2023). Parametric aeroelastic modeling, maneuver loads analysis using CFD methods and structural design of a fighter aircraft. *Aerospace Science and Technology*, *136*, 108231.

Wang, Y., Hu, S., Xiong, T., Huang, Y., & Qiu, L. (2022). Recent progress in aircraft smart skin for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, *21*(5), 2453-2480.

Wells, A. (1963). Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. *British Welding Journal*, *10*.

Wöhler, A. (1870). *Über die festigkeitsversuche mit eisen und stahl*. Ernst & Korn.

Dijital İkizler: Temel Kavramlar ve Disiplinler arası Uygulamalar

Sema YILDIRIM[1]

1- Dr.; Selcuk University, Faculty of Fine Arts, Graphic, semayildirim@selcuk.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0807-8550

ÖZET

Sayısal İkiz (Digital Twin – DT) teknolojisi, fiziksel varlıkların, süreçlerin ve sistemlerin dijital temsillerinin oluşturulmasını ve bu temsillerin gerçek zamanlı verilerle ilişkilendirilerek dinamik biçimde güncellenmesini sağlayan kapsamlı bir mühendislik yaklaşımıdır. Fiziksel ve dijital dünya arasındaki çift yönlü veri akışına dayanan bu teknoloji, sistem davranışlarının simülasyonu, performans analizi ve durum izleme gibi işlevleri mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, ileriye dönük bakım stratejileri ile modern endüstriyel operasyonların etkinliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Endüstri 4.0'ın temel bileşenlerinden biri olan DT, veri odaklı yönetim stratejilerini desteklerken otomasyon, sistem entegrasyonu ve yapay zekâ (AI) tabanlı karar destek mekanizmalarıyla etkileşimli bir yapı oluşturmaktadır.

DT uygulamaları, karmaşık sistemlerin yönetildiği havacılık, inşaat, imalat ve endüstriyel mühendislik gibi alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu uygulamalar, operasyonel verimliliğin artırılmasına, risklerin azaltılmasına ve süreç performansının sürekli iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. DT'in gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yetenekleri sayesinde olası arızalar önceden tahmin edilebilmekte, bakım faaliyetleri optimize edilebilmekte ve üretim kesintileri en aza indirilebilmektedir. Bu durum, özellikle yüksek maliyetli ve kesintiye duyarlı sektörlerde önemli bir rekabet avantajı sağlar. DT modelleri, mühendislik, bilişim teknolojileri, veri bilimi ve operasyon yönetimi gibi disiplinleri bir araya getirerek, sezgisel yaklaşımlardan analitik ve sistematik yönetim anlayışına geçişi desteklemektedir. Gerçek zamanlı izleme, senaryo analizi ve AI destekli öngörüler sayesinde DT, zaman, maliyet ve kaynak kullanımında iyileşmeler sağlayarak sürdürülebilirlik ve rekabetçilik hedeflerine katkı sunan yüksek dönüşüm potansiyeline sahip bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – Sayısal İkiz, Drone, Gerçek Zamanlı İzleme, İnşaat Yönetimi, IoT, Risk Yönetimi, Sensör, Yapay Zekâ.

GİRİŞ

Bilginin etkin üretilmesi, yönetilmesi ve doğru zamanda paylaşılması, günümüzün karmaşık ve hızla değişen sistemlerinde başarı için kritik bir öneme sahiptir. Dijitalleşme, veri odaklı yönetim anlayışları ve AI tabanlı analizler, bilginin yalnızca operasyonel bir girdi değil; stratejik bir kaynak ve rekabet avantajı sağlayan temel bir bileşen olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm, süreçlerin daha şeffaf, izlenebilir ve öngörülebilir şekilde yönetilmesini mümkün kılmakta ve organizasyonların hızlı karar alma yeteneklerini güçlendirmektedir. Bu bağlamda DT teknolojisi, fiziksel sistemlerin gerçek zamanlı verilerle desteklenen dijital temsillerini

oluşturarak bilgi yönetimine bütüncül ve dinamik bir yaklaşım sunmaktadır. DT, çoklu veri kaynaklarının entegrasyonu sayesinde süreçlerin izlenmesi, analiz edilmesi, performanslarının değerlendirilmesi ve geleceğe yönelik senaryoların oluşturulmasında güçlü bir altyapı sağlar. Ayrıca, veri mühendisliği, zaman serisi analizi, bilgisayarla görme ve derin öğrenme gibi ileri analitik ve AI yöntemleri ile desteklenen DT, sezgisel ve geleneksel yaklaşımların ötesine geçerek nesnel, veri temelli ve proaktif karar verme süreçlerini mümkün kılmaktadır. Bu sayede organizasyonlar hem operasyonel verimliliği artırmak hem de stratejik planlama ve risk yönetimi süreçlerinde daha güvenilir ve esnek bir yapı kurmak için DT'den yararlanabilmektedir.

Dijital İkiz Kavramına Genel Bakış

Birçok sektörde operasyonel süreçler çoğunlukla geleneksel ve sınırlı bütünleşik yöntemlerle yönetilmektedir. Bu durum, karmaşık sistemlerde verimliliğin artırılmasını, risklerin erken tespitini ve disiplinler arası koordinasyonu zorlaştırmaktadır. DT ve AI tabanlı teknolojiler, gerçek zamanlı veri toplama, entegrasyon ve otomatik analiz yetenekleriyle bu kısıtları aşmaya yönelik etkili çözümler sunar. DT, sensörler, kameralar, tarayıcılar ve dijital modellerden elde edilen çok boyutlu verilerle fiziksel sistemlerin dinamik bir dijital temsilini oluşturur. Bu yapı, süreçlerin sürekli izlenmesini, performansın nesnel değerlendirilmesini ve risklerin erken aşamada belirlenmesini olanak sağlamaktadır. Veri toplama altyapısının doğru ve optimize biçimde tasarlanması, maliyet etkinliği ve veri doğruluğu açısından DT sistemlerinin başarısında kritik öneme sahiptir.

AI destekli DT uygulamaları, süreç optimizasyonu, kaynak ve iş gücü yönetimi, kalite güvencesi, güvenlik ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda önemli faydalar sunmaktadır. Gerçek zamanlı analizler ve öngörücü modeller, sistemlerin mevcut durumu izlemesinin yanı sıra geleceğe yönelik senaryolar üreterek karar süreçlerini güçlendirir ve veriye dayalı yönetim anlayışına geçişi sağlar. Ölçeklenebilir ve bulut tabanlı altyapılar, farklı büyüklükteki organizasyonlara esnek çözümler sunarken, üç boyutlu nokta bulutları, zaman serili sensör verileri ve görsel bilgiler AI algoritmalarıyla birleştirilerek sapmaların ve riskli alanların erken tespitine olanak tanır. Performansın çoklu kriterlerle sayısal değerlendirilmesi ve dinamik risk haritalarının oluşturulması, stratejik iyileştirme ve optimizasyon çalışmalarına sağlam bir temel sağlar.

Dijital İkizlerin önemi

DT teknolojisi, karmaşık ve çok boyutlu süreçlerde performansın artırılmasına, risklerin erken aşamada tespit edilmesine ve karar alma süreçlerinin veri temelli bir yaklaşımla yürütülmesine olanak sağlamaktadır (Sharma et al., 2022). Başlangıçta dijital modelleme ve simülasyon amacıyla geliştirilen DT, sensörler, IoT, büyük veri ve yapay zekâ (AI) entegrasyonu

sayesinde sürekli veri akışıyla güncellenen dinamik bir sisteme dönüşmüştür. Bu dönüşüm, fiziksel varlıkların durum izleme, bakım planlama, arıza tahmini ve performans analizi gibi işlevlerinin artık statik değil, dinamik ve sürekli biçimde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda DT, gerçek zamanlı veri ile beslenerek sistemlerin değişen koşullara hızlı uyum göstermesine ve olası sorunları önceden tahmin ederek proaktif müdahaleler yapılmasına olanak tanır. Bu sayede üretim, enerji, sağlık ve ulaşım gibi çok sayıda sektörde operasyonel verimlilik artmakta, kaynak kullanımı optimize edilmekte ve karar alma süreçleri daha güvenilir ve etkin hâle gelmektedir (Thelen et al., 2022).

DT sistemleri, fiziksel ve dijital dünyalar arasında kesintisiz bir veri akışı sağlayarak durum izleme, geçmiş verilerin analizi, simülasyon, tahmin ve karar destek süreçlerini tek bir entegre yapı altında birleştirmektedir (Wang et al., 2023). Bu bütüncül yapı; belirsizliklerin azaltılması, süreçlerin optimize edilmesi, kaynakların etkin kullanımı ve risklerin önceden belirlenerek önleyici tedbirlerin alınması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu sayede operasyonel verimlilik, sistem güvenilirliği, sürdürülebilirlik ve süreç şeffaflığı önemli ölçüde artmaktadır. Sensör verileri, 3D modeller, mekânsal veriler ve geçmiş performans kayıtlarından oluşan çok katmanlı veri setleri, ortak bir dijital platform altında bütüncül biçimde analiz edilerek karar alma süreçlerinin somut ve güvenilir verilere dayanmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım, sezgiye ve deneyime dayalı yönetim anlayışlarının yerine, veri odaklı, öngörüye dayalı ve optimize edilmiş yönetim stratejilerinin uygulanmasına imkân tanımaktadır (Karabulut et al., 2024). DT teknolojisi, sahip olduğu esnek ve bütüncül yapı sayesinde farklı sektörlerde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Üretimden sağlık hizmetlerine, şehir yönetiminden afet yönetimine, altyapı izleme ve bakım faaliyetlerinden şehir planlamasına kadar pek çok alanda kullanımı, DT'in evrensel bir teknoloji olarak öne çıkmasını sağlamaktadır (El-Warrak et al., 2025; Özat & Akçadağ, 2023). DT tabanlı yaklaşımlar, belirsizliklerin nicel olarak analiz edilmesine, simülasyonlar aracılığıyla geleceğe yönelik senaryoların test edilmesine ve hem kısa vadeli operasyonel hem de uzun vadeli stratejik karar süreçlerinin etkin biçimde desteklenmesine olanak tanımaktadır (Thelen et al., 2022).

LİTERATÜR TARAMASI

DT, Endüstri 4.0 çerçevesinde siber-fiziksel sistemlerin gelişimiyle birlikte önem kazanmış ve üretimden sağlığa, enerji yönetiminden akıllı şehirlere kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede sistemlerin izlenmesi, simülasyonu ve optimize edilmesi mümkün hale gelmiş, veri odaklı karar alma süreçleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Tao et al., 2019). Literatürde DT, izleme, simülasyon, tahmin ve optimizasyon yetenekleri sayesinde karmaşık sistemlerin daha etkin ve verimli yönetilmesini sağlayan temel bir paradigma olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, hem operasyonel süreçlerin iyileştirilmesine hem de karar alma mekanizmalarının daha hızlı ve doğru bir şekilde çalışmasına olanak tanır (Cimino et al., 2019). Mevcut çalışmalar, DT'in mimari yapısını genellikle çok katmanlı bir model üzerinden ele almaktadır. Bu mimari, fiziksel varlıklar, algılama ve veri toplama katmanı, dijital modelleme ve simülasyon katmanı ile uygulama ve karar destek katmanlarından oluşmaktadır. Mevcut çalışmalar, DT'in mimari yapısını genellikle çok katmanlı bir model üzerinden ele almaktadır. Bu mimari başlıca dört katmandan oluşmaktadır:

- *Fiziksel Varlıklar*: Sensörler, makineler ve diğer fiziksel bileşenleri kapsar; sistemin gerçek dünyadaki durumunu temsil eder.
- *Algılama ve Veri Toplama Katmanı*: Fiziksel varlıklardan gelen verilerin toplanması, ön işlenmesi ve dijital sisteme aktarılmasını sağlar.
- *Dijital Modelleme ve Simülasyon Katmanı*: Toplanan veriler üzerinden dijital modeller oluşturulur, simülasyonlar yapılır ve sistem davranışları analiz edilir.
- *Uygulama ve Karar Destek Katmanı*: Analiz ve simülasyon sonuçları, operasyonel karar alma süreçlerinde kullanılır ve stratejik planlama ile optimizasyon için destek sağlar (Fuller et al., 2020).

AI ve makine öğrenimi (Machine Learning – ML) yöntemleri, DT'in literatürde giderek daha fazla vurgulanan ve kritik bileşenleri arasındadır. Açık erişimli çalışmalarda, veri güdümlü modellerin DT'e entegre edilmesi sayesinde arıza tahmini, bakım planlaması ve süreç optimizasyonu gibi alanlarda önemli performans artışları elde edildiği bildirilmektedir. Bu entegrasyon, sistemlerin geçmiş verilerden öğrenerek gelecekteki davranışları tahmin etmesine, kaynak kullanımını optimize etmesine ve operasyonel verimliliği artırmasına olanak tanır, böylece DT tabanlı uygulamaların etkinliği ve güvenilirliği önemli ölçüde güçlenmektedir (Cimino et al., 2019). Bu bağlamda DT, statik simülasyon araçlarından ziyade öğrenen ve uyarlanabilir sistemler olarak ele alınmaktadır.

Uygulama alanları açısından yapılan çalışmalar, akıllı üretim sistemleri, enerji ve altyapı yönetimi, akıllı şehirler ve sağlık gibi disiplinler arası kullanım senaryolarına odaklanmaktadır. Bu çalışmalar, DT teknolojisinin farklı sektörlerdeki süreçleri izleme, simülasyon ve

optimizasyon kapasitelerini ortaya koymakta; ayrıca veri odaklı karar alma, kaynak yönetimi ve sistem performansının artırılması gibi alanlarda sağladığı katkıları detaylı bir şekilde incelemektedir. Böylece DT, hem endüstriyel hem de toplumsal uygulamalarda çok yönlü fayda sağlayan bir araç olarak öne çıkmaktadır (Tao et al., 2019). Özellikle üretim ve endüstriyel sistemlerde DT'in verimlilik artışı ve maliyet azaltımı sağladığına dair güçlü kanıtlar elde edilmiştir. Dijital ikizler sayesinde üretim süreçleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte, darboğazlar ve hatalar erken aşamada tespit edilebilmekte ve bakım planlamaları daha etkin şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede hem operasyonel verimlilik artmakta hem de kaynak kullanımı ve enerji maliyetleri azalmakta, üretim süreçlerinin esnekliği ve güvenilirliği önemli ölçüde iyileştirilmektedir (Cimino et al., 2019). Yapılan çalışmalar, genel olarak DT'in gelecekte karmaşık sistemlerin modellenmesi ve yönetiminde temel bir rol oynayacağını ortaya koymaktadır.

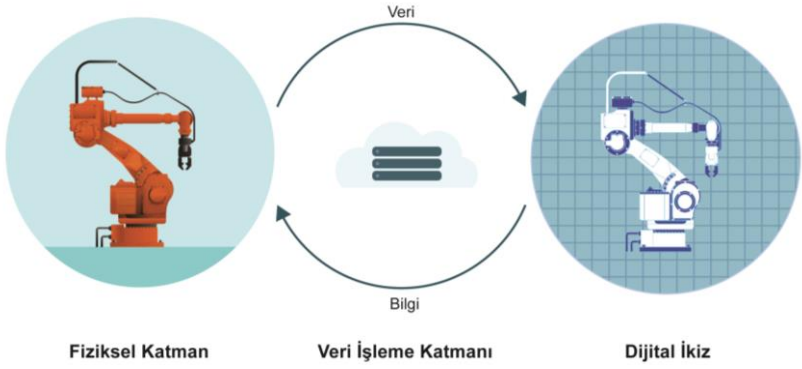
KAVRAMSAL TEMELLER

Dijital İkiz mimarisi

DT mimarisi, fiziksel sistem ile onun dijital temsili arasında kesintisiz bir bağ kurarak iki taraf arasında sürekli veri akışı sağlar. Bu sayede fiziksel sistemde meydana gelen değişiklikler anlık olarak dijital modele yansıtılır ve model üzerinden alınan geri bildirimler fiziksel sisteme uygulanabilir. DT mimarisi genel olarak fiziksel katman, veri işleme katmanı ve dijital model katmanı gibi üç temel katmandan oluşmaktadır (Şekil 1). Fiziksel katman, sensörler, cihazlar ve diğer veri toplama araçları aracılığıyla sistemden gerçek zamanlı verilerin elde edilmesini sağlar. Veri işleme katmanı, toplanan ham verilerin analiz için temizlenmesi, dönüştürülmesi ve uygun formatta organize edilmesini sağlar; böylece veriler modelleme, simülasyon ve karar destek sistemleri için hazır hâle gelir. Dijital model katmanında ise veriler sanal ortamda işlenir, sistemin davranışları ve performansı simüle edilir, olası senaryolar test edilir ve gerçek zamanlı durum analizleri yapılır. Bu katmanlar arasındaki sürekli etkileşim, DT'nin karmaşık sistemlerin optimizasyonu, bakım planlaması ve performans izleme gibi süreçlerde etkin şekilde kullanılmasını mümkün kılar (Wu et al., 2023; Yao et al., 2023).

Birçok araştırma, DT mimarilerini modüler ve genişletilebilir bileşenler ile tanımlar. Bu bileşenler ayrı işlevler sunar ve birbirleriyle birlikte çalışacak şekilde tasarlandığında mimarinin ölçeklenebilirliği artar.

Örneğin veri yönetimi, modelleme, simülasyon ve görselleştirme gibi bileşenler ayrı modüllerle ele alınarak farklı uygulama senaryolarına uyum sağlar. Bu modüler yaklaşım, mimarinin sadece belirli bir uygulama alanına bağlı kalmadan farklı disiplinlerde de kullanılabilmesine olanak tanır (Cespedes-Cubides & Jradi, 2024; Qiu et al., 2025).



Şekil 1: DT'nin temel yapısı ve ana katmanları.

DT mimarilerinde iki yönlü veri entegrasyonu, fiziksel sistemlerle dijital modeller arasında sürekli ve güvenilir bilgi alışverişini sağlar. Bu işleyiş, veri akışı ve geri bildirim mekanizmaları ile gerçekleşir.

- *Fiziksel sistemden dijital modele veri akışı*: Sensörler ve IoT cihazları aracılığıyla fiziksel sistemden sürekli veri toplanır ve dijital modele aktarılır.
- *Dijital modelden fiziksel sisteme geri bildirim*: Dijital model üzerinde yapılan analizler ve öngörüler, fiziksel sisteme geri aktarılır ve operasyonel kararları destekler.

Bu iki yönlü veri akışı sayesinde dijital ikiz, yalnızca pasif bir veri deposu olmaktan çıkar ve gerçek zamanlı etkileşimli bir sistem olarak çalışabilir. Ayrıca bulut altyapısı, büyük veri işleme ve IoT entegrasyonu, veri akışının kesintisiz ve verimli bir şekilde gerçekleşmesini sağlayarak mimarinin temel bileşenlerini oluşturur (Wu et al., 2023; Yao et al., 2023). Açık standartlar ve protokoller, farklı veri kaynaklarının sorunsuz entegrasyonunu sağlar ve ortak veri modelleri, DT'in karmaşık sistemler için ölçeklenebilir çözümler üretmesini destekler (Faliagka et al., 2024; Nele et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Veri Yapısı ve Organizasyonu

DT'in etkin çalışabilmesi, büyük ölçüde fiziksel varlıktan gelen verilerin doğru şekilde toplanması ve bu verilerin dijital model ile entegrasyonuna bağlıdır. Veri ve model entegrasyonu, yalnızca verinin tek taraflı toplanması değil aynı zamanda bu verinin dijital model içinde anlamlı bir şekilde işlenmesi, analiz edilmesi ve fiziksel varlığın davranışının gerçek

zamanlı olarak yansıtılması sürecidir. Bu süreç, çok sayıda sensör, IoT aygıtı ve sürekli veri akışı gerektirir. Böylelikle DT, fiziksel sisteme ait davranışları yüksek doğrulukla temsil edebilir (Wu et al., 2023; Zenza et al., 2025). Bu entegrasyon, modelin yalnızca statik bir temsili olarak kalmasını önler. Modellenen sistem, çevresel değişiklikler ve operasyonel koşullara uyum göstererek performans ve süreç verimliliğini artırabilir (Schmidt et al., 2025).

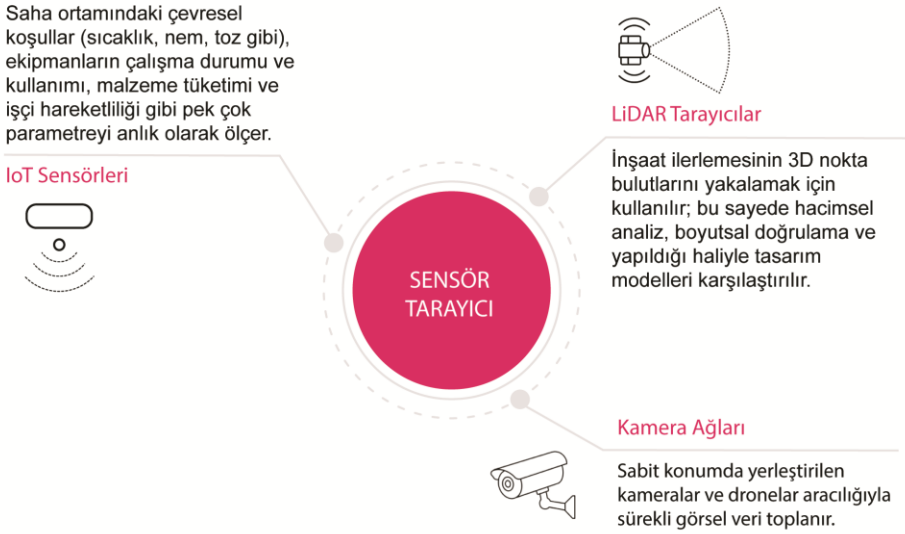
Veri entegrasyonu, farklı kaynaklardan gelen heterojen verilerin standart bir formatta birleştirilmesini kapsar. Özellikle endüstriyel ortamlarda, üretim hattı sensörlerinden gelen gerçek zamanlı veriler, geçmiş performans verileri ve dış veri kaynakları bir araya getirilir. Bu tür birleştirilmiş veri tabanı, modelin hem tarihsel hem de dinamik davranışı öğrenmesini ve tahmin etmesini mümkün kılar (Zenza et al., 2025). Model entegrasyonu ise bu verilerin DT mimarisi içinde anlamlı bir bütün haline getirilmesini ifade eder. Sağlıklı bir entegrasyon, dijital modelin hem sembolik hem de sayısal bileşenler içererek kapsamlı bir temsil oluşturmasını gerektirir (Schmidt et al., 2025). "Yani model, sadece geçmiş verilerle değil, gerçek zamanlı girdilerle de beslendiğinde sistemin davranışını daha doğru ve dinamik bir şekilde simüle edebilir. Özellikle standartlaştırılmış bilgi modelleri ve bilgi kümeleri, bu entegrasyonu kolaylaştırarak farklı ve heterojen sistemlerin ortak bir dilde iletişim kurmasını sağlar ve veri paylaşımı ile koordinasyonu optimize eder (Schmidt et al., 2025; Zenza et al., 2025). Böylece veri ve model arasındaki uyum, dijital ikizin yaşam döngüsü boyunca güncel ve güvenilir bir şekilde izlenebilmesini mümkün kılar

YÖNTEMLER VE TEKNOLOJİLER

Algılama, Sensör ve IoT Tabanlı Sistemler

DT sistemlerinin etkinliği, doğru ve çeşitli verilerin toplanmasına bağlıdır. Farklı sensörler, ölçüm cihazları, IoT sistemleri ve görüntüleme teknolojileri aracılığıyla elde edilen çok boyutlu veriler, fiziksel varlıkların ve süreçlerin sanal modeller üzerinde doğru şekilde temsil edilmesini sağlar. Bu veriler durum izleme, performans analizi, risk tespiti, süreç optimizasyonu ve karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi gibi işlevlerin yürütülmesine olanak tanır. Veri toplama yöntemlerinin planlı ve sistematik olması, DT modelinin doğruluğunu artırır ve analizlerin güvenilirliğini

destekler. Ayrıca, veri entegrasyonu ve işlenmesi süreçleri, sanal modelin sürekli güncellenmesini ve gerçek zamanlı simülasyonların gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Bu bağlamda, veri toplama ve işleme stratejileri, DT tabanlı sistemlerin kapsamlı ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmalıdır. Veri toplamada kullanılan bazı araçlar Şekil 2'de verilmiştir:



Şekil 2: DT veri toplamada kullanılan sensör ve tarayıcılar.

DT modellerinin doğruluğu ve etkinliği, fiziksel sistemlerden gelen verilerin kapsamlı, doğru ve güvenilir bir şekilde toplanmasına bağlıdır. Bu veriler, farklı türde algılayıcılar aracılığıyla elde edilerek dijital modele aktarılır ve sistemin gerçek zamanlı durumu ile performansının doğru bir şekilde yansıtılmasını sağlar. Aşağıda, DT'de veri akışını sağlayan başlıca algılayıcı türleri ve bunların işlevleri detaylı olarak verilmiştir:

IoT Sensörleri: IoT sensörleri, sahadaki sıcaklık, nem, titreşim ve çevresel değişimler gibi kritik parametreleri düşük gecikmeyle ölçer ve bu verileri dijital modele aktarır. Bu sayede DT, fiziksel sistemin mevcut durumunu doğru şekilde yansıtabilir. Sensör tabanlı veri toplama, performans değişikliklerinin dijital ortama aktarılmasını ve gerçek zamanlı izleme ile model güncellemesini mümkün kılar (Jedermann et al., 2023).

LiDAR (Light Detection and Ranging): LiDAR tarayıcılar, fiziksel çevrenin yüksek çözünürlüklü üç boyutlu geometrik verilerini elde ederek dijital ikizin mekânsal doğruluğunu artırır. Elde edilen nokta bulutları, varlıkların gerçek dünya konum ve şekillerini sayısal olarak temsil eden temel bir modelin oluşturulmasında kritik rol oynar. LiDAR verisi, geniş ölçekli ortamların topografik veya yapısal detaylarının modellenmesinde vazgeçilmezdir (Algadi et al., 2025).

Kamera Ağları: Kamera ağları, dijital modellere görsel veri sağlar ve ortamdaki değişimlerin algılanmasında önemli bir bileşendir. Farklı açılardan alınan yüksek çözünürlüklü görüntüler, dijital modele görsel bağlam ekler ve fiziksel süreçlerin dinamiklerini yakalar. Çoklu kamera verisi, 3D nokta bulutları ve LiDAR verisi ile birleştirildiğinde DT'nin doğruluğu ve analiz edilebilirliği önemli ölçüde artar (Ullah et al., 2025; Yu et al., 2023).

Simülasyon ve Yapay Zekâ Uygulamaları

Simülasyon, DT teknolojisinin temel bileşenlerinden olup, fiziksel sistemlerin davranışını sanal ortamda yeniden üretir. AI bu süreçlere öğrenme ve adaptasyon yetenekleri ekleyerek sistem performansının tahmini, optimizasyonu ve karar destek süreçlerinde daha esnek modeller oluşturulmasını sağlar (Kabir et al., 2023). DT, üretim, lojistik ve bakım gibi alanlarda geçmiş performans verilerini ve AI tekniklerini kullanarak gelecekteki davranışları modelleyebilir. AI simülasyonu, sanal eğitim ortamları oluşturarak fiziksel ortama zarar vermeden öğrenme ve test süreçlerini mümkün kılar. Ayrıca, deneysel verilerle beslenen AI destekli DT, karar alma süreçlerini güçlendirir ve IoT entegrasyonu ile performans iyileştirmelerine katkı sağlar (Liu & David, 2025). "AI ile güçlendirilmiş simülasyonlar geliştirilmeye devam etmekte olup, bu simülasyonların doğruluğu, işlenen veri hacmi ve kullanılan algoritmaların güvenilirliği gibi zorluklar, DT sistemlerinin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu durum, özellikle karmaşık ve büyük ölçekli sistemlerde, gelecekte yapılacak araştırmaların yönünü belirleyerek yeni yöntem ve teknolojilerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Kreuzer et al., 2024).

DT, fiziksel bir varlık veya sürecin, verinin toplanması, işlenmesi ve sunulmasında üç temel teknolojiye dayanan dinamik ve sürekli güncellenen sanal yansımasıdır. Bulut bilişim, büyük veri ve görselleştirmeden oluşan bu üçlü yapı, fiziksel dünyadan gelen ham veriyi, stratejik karar mekanizmalarını besleyen anlamlı bir öngörüye dönüştürür.

- *Bulut Bilişim (Cloud Computing)*: Bulut bilişim, DT ekosisteminin merkezi sinir sistemi ve ana depolama alanı olarak işlev görür. IoT sensörleri tarafından üretilen devasa veri akışı, düşük gecikmeli ve yüksek bant genişliğine sahip bulut altyapıları üzerinden aktarılır (Fuller et al., 2020). DT, karmaşık süreçlerin simülasyonu için yoğun CPU ve GPU gücü gerektirir. Bulut platformları ise bu yükü hafifleterek ölçeklenebilir çözümler ve eş zamanlı iş birliği imkânı sunar. Bu durum, disiplinler arası iş birliğini teşvik ederek tasarım ve operasyon süreçlerini optimize eder (Melesse et al., 2020).
- *Büyük Veri*: DT teknolojisinin performansı, fiziksel dünyadan gelen verinin hacmi, hızı ve çeşitliliği ile doğrudan ilişkilidir. Büyük veri analitiği, bu veriler içindeki gizli örüntüleri ortaya çıkararak sistemin geçmişteki davranışlarından gelecekteki olası durumları tahmin

etmesini sağlar (Qi & Tao, 2018). Büyük veri algoritmaları, fiziksel varlıktan gelen anlık verileri tarihsel veri setleriyle kıyaslayarak anomalileri tespit eder. Bu sayede, bir makinenin arızalanmadan ne kadar süre daha çalışabileceği yüksek doğrulukla hesaplanabilir. Gerçek zamanlı veri akışı ve büyük veri teknikleri, dijital modelin fiziksel aslına sadakatini artırarak simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini sağlar (Kritzinger et al., 2018).

- *Görselleştirme*: DT'nin karmaşık analizleri, insan-makine etkileşimiyle görselleştirme katmanında anlam kazanır. Görselleştirme, veriyi somut bir kavrayışa dönüştüren bir köprüdür (Tao et al., 2022). Yüksek çözünürlüklü 3D modelleme, fotogrametri ve oyun motoru teknolojileri, fiziksel varlığın dijital görsel temsilini oluşturur. AR ve VR entegrasyonu, operatörlerin sistemleri simüle etmesine olanak tanır ve özellikle montaj ile kriz yönetiminde hata payını azaltır (Melesse et al., 2020). Büyük veriden elde edilen sonuçlar, yönetici ve mühendislerin hızlı karar verebilmesi için ısı haritaları, trend grafikleri ve uyarı sistemleri ile görselleştirilerek süreçlerin şeffaflığı sağlanır.

UYGULAMA ALANLARI

DT teknolojisi, fiziksel varlıkların ve süreçlerin dijital ortamlarda modellenip izlenmesini sağlayarak farklı sektörlerde veri odaklı karar alma süreçlerini destekler. Üretimden enerji ve altyapıya, havacılıktan sağlık hizmetlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan DT, operasyonel verimliliği artırmak, riskleri minimize etmek ve sürdürülebilir yönetim stratejilerini geliştirmek için kritik bir araç olarak öne çıkar. Bu bağlamda, DT'nin çeşitli sektörlerdeki uygulama alanları, teknolojinin çok boyutlu potansiyelini ve endüstriyel süreçlerdeki stratejik önemini göstermektedir. Bu uygulama alanlarından bazıları Şekil 3'te özetlenmiştir.



Şekil 3: DT'in başlıca endüstriyel ve teknolojik uygulama alanları

1. *Üretim ve akıllı fabrika uygulamaları:* DT teknolojisi, modern üretimde verimlilik, esneklik ve kaliteyi artıran önemli bir araçtır. Fiziksel üretim hattının gerçek zamanlı sanal modeliyle performans izleme, simülasyon ve karar destek süreçlerini geliştirir (D'Amico et al., 2023). DT, prediktif bakım ve üretim sürekliliğinin sağlanmasında da önemlidir. Kritik makinelerin verileri izlenerek olası arızalar tespit edilir ve bakım süreçleri planlanır. Böylece beklenmedik kesintiler azalır ve verimlilik artar (Khan et al., 2025). Sanal simülasyonlarla iş akışları optimize edilir, hatalar azalır. DT, üretimde verimliliği ve esnekliği artırır (D'Amico et al., 2023; Soori et al., 2023).
2. *Enerji ve altyapı yönetimi:* Enerji ve altyapı yönetimi, DT'nin sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından önemli bir uygulama alanıdır. Gerçek zamanlı izleme ve modelleme ile enerji sistemlerinin performansı anlaşılır ve iyileştirilir. Böylece enerji verimliliği ve talep tahmini daha etkin yönetilir (Aghazadeh Ardebili et al., 2024). AI destekli modeller, sensör verileriyle kısa ve uzun vadeli planlamayı destekler; şebeke kayıpları azalır ve yenilenebilir kaynak verimi artar (Ogunmolu, 2025). DT, mikro şebekeler ve dağılmış enerji kaynaklarında sistem dayanıklılığı ve maliyet etkinliğini artırır (Gueniat & Kushal, 2025). Ayrıca, yük dengeleme ve talep yanıt mekanizmalarının otomasyonu, değişen tüketim profilleri ve üretim dinamiklerinin DT aracılığıyla daha etkin yönetilmesini sağlar; bu da enerji

kayıplarını ve maliyetleri azaltarak sürdürülebilir hedeflere katkı sağlar (Aghazadeh Ardebili et al., 2024).

3. *Sağlık ve biyomedikal mühendislik:* DT teknolojisi, sağlık alanında kişiselleştirilmiş tedavi ve klinik simülasyon için yaygınlaşmaktadır. Hasta verileri dijital modellere aktarılarak tedaviler önceden simüle edilir ve olası yan etkiler tahmin edilir (Elgammal et al., 2025). Bu yöntem hasta güvenliğini ve tedavi etkinliğini artırır, özellikle karmaşık hastalıklarda klinik kararları destekler. Ayrıca biyomedikal cihazların dijital modelleriyle bakım, kalibrasyon ve arıza tespiti daha etkin yapılır (Adibi et al., 2024). Ayrıca, DT, ilaç geliştirme ve klinik denemelerde simülasyon aracı olarak kullanılarak yeni tedavi yöntemlerinin güvenli ve hızlı bir şekilde test edilmesini sağlar. Toplum sağlığı ve epidemiyoloji alanında ise hastalık yayılımı tahmini, sağlık politikalarının planlanması ve önleyici stratejiler için güçlü bir araçtır (Elgammal et al., 2025). Sanal modellerle sağlık verilerinin analizi, krizlerde kaynak yönetimini ve müdahaleleri optimize eder. DT, veri odaklı ve hasta merkezli sağlık hizmetlerini geliştirir.
4. *Akıllı şehirler ve ulaşım sistemleri:* DT, akıllı şehirlerde altyapı yönetimi, trafik optimizasyonu ve sürdürülebilir planlamayı destekler. Fiziksel sistemlerin sanal modelleri sayesinde gerçek zamanlı izleme ve veri odaklı kararlar alınabilir. Ulaşımda trafik akışı modellenir, senaryolar simüle edilerek sıkışıklık azaltılır ve toplu taşıma planlaması geliştirilir (Korada, 2022). Özellikle büyük şehirlerde, bu tür dijital modeller, ulaşım altyapısının verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için önemli bir araçtır. Ayrıca DT, afet yönetimi, enerji dağıtımı ve çevresel izleme gibi alanlarda şehirlerin dayanıklılığını artırır. Örneğin sel, deprem veya hava kirliliği gibi durumların etkisi DT aracılığıyla modellenebilir ve önleyici tedbirler planlanabilir (Korkmaz et al., 2025). Bu uygulamalar şehirlerin sürdürülebilir ve yaşam kalitesi yüksek yönetilmesini sağlar. DT, akıllı şehirlerde veri odaklı ve öngörülebilir yönetimi mümkün kılar.

GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE TRENDLER

DT teknolojisi, artık sadece fiziksel sistemlerin sanal temsillerini oluşturmakla kalmayıp, bağlantılı ve otonom karar mekanizmalarıyla yeni operasyonel seviyelere ulaşmaktadır. Bu gelişmelerin temelinde veri analitiği, AI, IoT, bulut ve kenar bilişim gibi teknolojilerin entegrasyonu bulunmaktadır. DT, geçmiş veriye dayalı tahminlerin ötesinde, süreç optimizasyonu, bakım planlaması ve gerçek zamanlı karar destek sistemleri sunabilmektedir (Wang et al., 2023). Bu sayede üretimden ulaşıma, sağlık hizmetlerinden akıllı şehir uygulamalarına kadar çok sayıda alanda proaktif olarak kullanımı mümkün olmaktadır.

Yeni teknolojiler, DT'nin modüler ve birlikte çalışabilir mimarilerle uygulanmasını desteklemektedir. Bu sayede farklı sektörlerdeki dijital ikiz bileşenleri daha uyumlu şekilde entegre edilebilir ve birbirleriyle etkili veri alışverişi yapabilir. Standardizasyon ve veri protokollerinin iyileştirilmesi, DT bileşenlerinin birlikte çalışmasını kolaylaştırarak çok disiplinli uygulamalarda entegrasyonu mümkün kılar. Böylece DT, tek bir sistemin ötesinde, birden fazla sistem ve altyapı arasında etkileşimli bir ekosistem olarak işlev görebilir. Özellikle akıllı şehirlerde, bu yaklaşım şehir altyapısı, enerji yönetimi, ulaşım sistemleri ve çevresel izleme gibi farklı alanlarda sistemler arası koordinasyonu güçlendirir ve sürdürülebilir kaynak kullanımını optimize ederek hizmet kalitesini artırma fırsatları sunar (Iranshahi et al., 2025). Gelecekte DT, AI tabanlı otonom karar alma, veri güvenliği, yüksek doğruluklu simülasyonlar ve 6G ile kuantum bilişim gibi altyapı teknolojileriyle entegrasyon alanlarında gelişme göstereceği öngörülmektedir. Bu sayede DT modelleri, karmaşık sistemlerin daha kapsamlı temsilini sağlayarak geleceğin dijital altyapı tasarımını şekillendirebilecektir (Iranshahi et al., 2025).

KAYNAKÇA

Adibi, S., Rajabifard, A., Shojaei, D., & Wickramasinghe, N. (2024). Enhancing Healthcare through Sensor-Enabled Digital Twins in Smart Environments: A Comprehensive Analysis. *Sensors*, *24*(9). https://doi.org/10.3390/s24092793

Aghazadeh Ardebili, A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H. A., Longo, A., & Ficarella, A. (2024). Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. *Energy Informatics*, *7*(1). https://doi.org/10.1186/s42162-024-00385-5

Algadi, A., Uluutku, B., Cano, J. A., Walters, L., Alqurashi, I., Luleci, F., & Catbas,

F. N. (2025). Digital twin-oriented generation of structural data and models with LiDAR scan point clouds. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, *6*(1). https://doi.org/10.1186/s43065-025-00140-4

Cespedes-Cubides, A. S., & Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, *7*(1). https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7

Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, *113*, 103130. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130

D'Amico, R. D., Addepalli, S., & Erkoyuncu, J. A. (2023). Industrial Insights on Digital Twins in Manufacturing: Application Landscape, Current Practices, and Future Needs. *Big Data and Cognitive Computing*, *7*(3). https://doi.org/10.3390/bdcc7030126

El-Warrak, L. de O., Miceli de Farias, C., & De Azevedo Costa, V. H. D. M. (2025). Simulation-based assessment of digital twin systems for immunisation. *Frontiers in Digital Health*, *7*(August), 1–14. https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1603550

Elgammal, Z., Albrijawi, M. T., & Alhajj, R. (2025). Digital twins in healthcare: a review of AI-powered practical applications across health domains. *Journal of Big Data*, *12*(1). https://doi.org/10.1186/s40537-025-01280-w

Faliagka, E., Christopoulou, E., Ringas, D., Politi, T., Kostis, N., Leonardos, D., Tranoris, C., Antonopoulos, C. P., Denazis, S., & Voros, N. (2024). Trends in Digital Twin Framework Architectures for Smart Cities: A Case Study in Smart Mobility. *Sensors*, *24*(5), 1–22. https://doi.org/10.3390/s24051665

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, *8*, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Gueniat, F., & Kushal, K. A. (2025). AI-Enhanced IoT Systems for Predictive Maintenance and Affordability Optimization in Smart Microgrids: A Digital Twin Approach. *ArXiv Preprint ArXiv:2511.12175*.

Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T., & Müller, U. C. (2025). Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, *26*(April), 200516. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516

Jedermann, R., Singh, K., Lang, W., & Mahajan, P. (2023). Digital twin concepts for linking live sensor data with real-time models. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, *12*(1), 111–121. https://doi.org/10.5194/jsss-12-111-2023

Kabir, M. H., Chowdhury, J. A., Fahim, I. M., Hasan, M. N., Hasnat, A., & Mahdi, A. J. (2023). Design and Simulation of AI-Enabled Digital Twin Model for Smart Industry 4.0. *Engineering Proceedings*, *58*(1). https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16235

Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., & Degeler, V. (2024). Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems*, *153*(July 2023), 442–456. https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013

Khan, M. Q., Alvi, M. A. H., Nawaz, H. H., & Umar, M. (2025). Impact of Digital Twins on Real Practices in Manufacturing Industries. *Inventions*, *10*(6), 106. https://doi.org/10.3390/inventions10060106

Korada, L. (2022). Using Digital Twins of a Smart City for Disaster Management. *Journal of Computational Analysis and Applications (JoCAAA)*, *30*(1), 199–

207. https://eudoxuspress.com/index.php/pub/article/view/1521
Korkmaz, M., Akyildiz, Y. E., Demirkesen, S., Toprak, S., Nowak, P., & Ciftci, B. (2025). A Digital Twin Approach to Sustainable Disaster Management: Case of Cayirova. *Sustainability (Switzerland)*, *17*(21), 1–24. https://doi.org/10.3390/su17219626
Kreuzer, T., Papapetrou, P., & Zdravkovic, J. (2024). Artificial intelligence in digital twins—A systematic literature review. *Data and Knowledge Engineering*, *151*(March), 102304. https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304
Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474
Liu, X., & David, I. (2025). AI simulation by digital twins: systematic survey, reference framework, and mapping to a standardized architecture. *Software and Systems Modeling*. https://doi.org/10.1007/s10270-025-01306-0
Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2020). Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review. *Procedia Manufacturing*, *42*(2019), 267–272. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.084
Nele, L., Mattera, G., Yap, E. W., Vozza, M., & Vespoli, S. (2024). Towards the application of machine learning in digital twin technology : a multi - scale review. *Discover Applied Sciences*, *6*(502). https://doi.org/10.1007/s42452-024-06206-4
Ogunmolu, A. M. (2025). Digital Twin-based Energy Infrastructure Powered by AI: Real-Time Simulation, Anomaly Detection, and Intervention. *Journal of Energy Research and Reviews*, *17*(7), 65–85. https://doi.org/10.9734/jenrr/2025/v17i7434
Özat, R., & Akçadağ, M. (2023). Systematic Literature Review of Publications on Digital Twin Topics in Certain Research Areas. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, *12*(4), 2388–2410. https://doi.org/10.15869/itobiad.1344962
Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, *6*, 3585–3593. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265
Qiu, S., Zaheer, Q., Ali, F., Wajid, S., Chen, H., Ai, C., & Wang, J. (2025). Exploring the Impact of Digital Twin Technology in Infrastructure Management: a Comprehensive Review. *Journal of Civil Engineering and Management*, *31*(4), 395–417. https://doi.org/10.3846/jcem.2025.23718
Schmidt, C., Volz, F., Stojanovic, L., & Kett, H. (2025). Integration Approaches for Digital Twins in Dataspaces. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(21), 1–21. https://doi.org/10.3390/app152111623
Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, *30*. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383
Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Digital twin for smart manufacturing, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, *2*(May), 100017. https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017
Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, *64*(January), 372–389.

https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015
Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(4), 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C., & Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies. In *Structural and Multidisciplinary Optimization* (Vol. 65, Issue 12). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4
Ullah, A., Younas, M., & Saharudin, M. S. (2025). Digital Twin Framework Using Real-Time Asset Tracking for Smart Flexible Manufacturing System. *Machines*, *13*(1), 1–39. https://doi.org/10.3390/machines13010037
Wang, Y., Su, Z., Guo, S., Dai, M., Luan, T. H., & Liu, Y. (2023). A Survey on Digital Twins: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Future Prospects. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(17), 14965–14987. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3263909
Wu, H., Ji, P., & Xing, L. (2023). A Comprehensive Review of Digital Twin from the Perspective of Total Process: Data, Models, Networks and Applications. *Sensors*, *23*(8306). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23198306
Yao, J. F., Yang, Y., Wang, X. C., & Zhang, X. P. (2023). Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, *6*(1). https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4
Yu, R., Yang, X., & Cheng, K. (2023). Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines. *Frontiers in Energy Research*, *11*(October), 1–17. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1265111
Zenza, F., Ferreira, L. P., Gonçalves, C., Ribeiro, R., & Ramos, A. L. (2025). Exploratory Integration of a Digital Twin with a Data Space: Case Study with the Asset Administration Shell. *Machines*, *13*, 1–25. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/machines13090751
Zhang, Z., Wei, Z., Court, S., Yang, L., Wang, S., Thirunavukarasu, A., & Zhao, Y. (2024). A Review of Digital Twin Technologies for Enhanced Sustainability in the Construction Industry. *Buildings*, *14*(4), 1–23. https://doi.org/10.3390/buildings14041113

Güneş Havuzu Destekli Parabolik Oluklu Güneş Kollektörleri ile Elektrik ve Hidrojen Üretimi

Serdal DAMARSEÇKİN[1,2]

1- Dr Öğr. Üyesi.; Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü. serdalseckin@hotmail.com ORCID No: 0000-0003-4427-6220
2- Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

ÖZET

Güneş enerjisinin çoklu enerji üretiminde değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji sistemleri açısından önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Güneş havuzları, düşük maliyetli ısı depolama özellikleri sayesinde sürekli bir termal enerji kaynağı sunarken, yoğunlaştırıcı güneş kollektörleri daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, güneş havuzu ile parabolik oluklu güneş kollektörlerinin birlikte kullanıldığı entegre bir sistemin elektrik ve hidrojen üretim potansiyeli ele alınmıştır.

Sistem; farklı yüzey alanlarına sahip bir güneş havuzu, parabolik oluklu güneş kollektörleri, n-bütan çalışma akışkanlı bir organik Rankine çevrimi, proton değişim membranlı bir elektrolizör ve atık ısının değerlendirildiği yardımcı bir ısıtma ünitesinden oluşmaktadır. Güneş havuzunda ön ısıtılan akışkan, parabolik oluklu kollektörlerde sıcaklığı yükseltilerek organik Rankine çevrimine yönlendirilmiş; elde edilen elektrik enerjisi hidrojen üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca çevrimden çıkan düşük dereceli ısının değerlendirilmesiyle sistemin toplam enerji kullanım etkinliği artırılmıştır.

Farklı kütlesel debilerde ve gün içi değişen güneşlenme koşullarında yapılan analizler sonucunda, sistem performansının özellikle öğle saatlerinde belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Düşük kütlesel debilerde elektrik ve hidrojen üretiminin daha yüksek değerlere ulaştığı, günlük hidrojen üretiminin yaklaşık 480–560 g aralığında değiştiği belirlenmiştir. Toplam enerji ve ekserji verimlerinin sırasıyla %12–15 ve %5–7 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, güneş havuzu destekli hibrit sistemlerin elektrik ve hidrojenin birlikte üretimi açısından güçlü bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Güneş Havuzu, Parabolik Oluklu Güneş Kollektörleri, Organik Rankine Çevrimi, Hidrojen Üretimi, Enerjik Ve Ekserjetik Performans.

GİRİŞ

Artan küresel enerji talebi, fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve çevresel etkiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesini zorunlu hâle getirmiştir. Bu bağlamda güneş enerjisi; yaygın erişilebilirliği, çevre dostu yapısı ve farklı enerji dönüşüm teknolojileriyle entegre edilebilme potansiyeli sayesinde ön plana çıkmaktadır [Duffie ve Beckman, 2013, Kalogirou, 2004:30].

Güneş enerjisinin termal olarak değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan güneş havuzları, özellikle düşük ve orta sıcaklık seviyelerinde sürekli ve kararlı bir ısı kaynağı sunmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Isı depolama yetenekleri sayesinde güneşlenmenin düşük

olduğu saatlerde dahi enerji sağlamaları, güneş havuzlarını çok amaçlı enerji sistemleri açısından cazip hâle getirmektedir [El-Sebaii ve El-Bialy, 2011:15, Tiwari ve Sahota, 2017]. Bununla birlikte, güneş havuzlarından elde edilen sıcaklık seviyeleri, doğrudan yüksek verimli elektrik üretimi için çoğu zaman yeterli olmamaktadır.

Bu sınırlamanın aşılabilmesi amacıyla, yoğunlaştırıcı güneş termal sistemleri güneş havuzları ile birlikte kullanılmaktadır. Parabolik oluklu güneş kollektörleri, güneş havuzunda ön ısıtılan akışkanın sıcaklığını yükselterek güç çevrimleri için daha uygun termodinamik koşullar sağlamaktadır [Kalogirou, 2004:30, Quoilin vd, 2013:22]. Bu tür entegrasyonlar, özellikle düşük sıcaklık kaynaklarıyla çalışabilen organik Rankine çevrimlerinin performansını artırma potansiyeline sahiptir [Quoilin vd, 2013:22, Hung, Shai ve Wang, 1997:22].

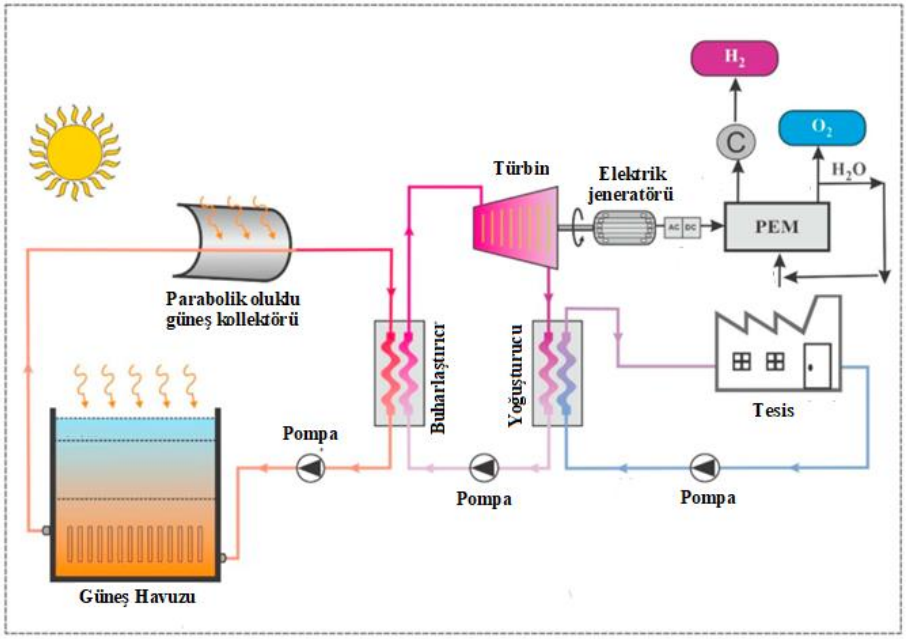
Organik Rankine çevrimleri, düşük kaynama noktasına sahip organik akışkanlar kullanarak düşük ve orta sıcaklık seviyelerindeki ısı kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Bu çevrimler, güneş enerjisi tabanlı sistemlerde yaygın olarak tercih edilmekte ve farklı çalışma akışkanlarıyla sistem performansının optimize edilmesine imkân sağlamaktadır [Quoilin vd, 2013:22, Hung, Shai ve Wang, 1997:22].

Elektrik üretiminin yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretimi, temiz enerji taşıyıcısı olarak hidrojenin artan önemi nedeniyle dikkat çekmektedir. Proton değişim membranlı (PEM) elektrolizörler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi ile yüksek saflıkta hidrojen üretimi sağlayarak entegre enerji sistemlerinde önemli bir rol üstlenmektedir [Barbir, 2005:78, Turner, 2004:305]. Elektrik ve hidrojenin aynı sistem içinde birlikte üretilmesi, enerji dönüşüm süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Buna ek olarak, entegre sistemlerde ortaya çıkan atık ısının değerlendirilmesi, toplam sistem verimliliğinin artırılmasında kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Düşük dereceli ısının tarımsal veya endüstriyel yardımcı uygulamalarda kullanılması, enerji kayıplarını azaltmakta ve sistemlerin sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir [Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996]. Bu nedenle, çoklu enerji üretimi ve atık ısı geri kazanımını birlikte ele alan hibrit sistemler, son yıllarda enerji sistemleri araştırmalarında artan bir ilgi görmektedir.

SİSTEM TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

İncelenen entegre enerji sistemi, güneş enerjisinin termal ve elektriksel olarak değerlendirilmesine dayalı çok bileşenli bir yapıdan oluşmaktadır. Sistem, güneş havuzu ve parabolik oluklu güneş kollektörlerinin birlikte kullanıldığı bir güneş termal alt sistemine, elektrik üretimi için bir organik Rankine çevrimine (ORÇ), hidrojen üretimi için proton değişim membranlı (PEM) bir elektrolizöre ve düşük dereceli atık ısının değerlendirildiği yardımcı bir ısıtma ünitesine sahiptir. Sistemin genel şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Güneş havuzu ve parabolik oluklu güneş kollektörleri ile entegre edilmiş elektrik ve hidrojen üretim sisteminin şematik diyagramı

1. Güneş Havuzu

Güneş havuzu, güneş enerjisinin toplanması ve depolanması amacıyla kullanılan, tuzluluk gradyanına dayalı bir ısıl depolama sistemidir. Havuz, üst konvektif bölge, tuzluluk gradyanlı ara bölge ve alt konvektif bölge olmak üzere üç ana tabakadan oluşmaktadır. Alt konvektif bölgede depolanan ısı enerjisi, gün boyunca kararlı bir şekilde muhafaza edilerek sistem için sürekli bir termal kaynak sağlamaktadır [El-Sebaii ve El-Bialy, 2011:15, Tiwari ve Sahota, 2017].

Güneş havuzunda depolanan ısı, bir ısı değiştirici yardımıyla çalışma akışkanına aktarılmaktadır. Bu aşamada akışkan ön ısıtma işlemine tabi tutulmakta ve parabolik oluklu güneş kollektörlerine yönlendirilmektedir.

Güneş havuzu, özellikle güneşlenmenin düşük olduğu saatlerde sistemin sürekliliğini sağlayan temel bileşenlerden biri olarak görev yapmaktadır.

2. Parabolik Oluklu Güneş Kollektörleri

Parabolik oluklu güneş kollektörleri, güneş ışınımını odaklayarak çalışma akışkanının sıcaklığını yükselten yoğunlaştırıcı güneş termal sistemleridir. Bu sistemde, güneş havuzundan gelen ön ısıtılmış akışkan, parabolik oluklu kollektörler içerisinde dolaştırılarak daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaştırılmaktadır [Kalogirou, 2004:30, Quoilin vd, 2013:22].

Ön ısıtma ve yoğunlaştırıcı kollektör entegrasyonu sayesinde, kollektör alanı ihtiyacı azaltılmakta ve daha kararlı bir sıcaklık profili elde edilmektedir. Elde edilen yüksek sıcaklıktaki akışkan, organik Rankine çevrimine beslenerek elektrik üretim sürecinde kullanılmaktadır.

3. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ)

Organik Rankine çevrimi, düşük ve orta sıcaklıktaki ısı kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesi amacıyla kullanılan bir güç çevrimidir. Sistem içerisinde ORÇ, düşük kaynama noktasına sahip organik bir akışkan ile çalışmakta ve bu sayede güneş enerjisinden elde edilen ısının etkin bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmaktadır [Quoilin vd, 2013:22, Hung, Shai ve Wang, 1997:22].

Yüksek sıcaklıktaki akışkan, ORÇ buharlaştırıcısında organik akışkanın buharlaşmasını sağlamakta; oluşan buhar türbinde genişleyerek mekanik enerjiye ve ardından elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Yoğuşturucudan çıkan düşük dereceli ısı ise yardımcı ısıtma ünitesine yönlendirilerek sistemin genel verimliliği artırılmaktadır.

4. Proton Değişim Membranlı Elektrolizör

ORÇ'den elde edilen elektrik enerjisi, hidrojen üretimi amacıyla PEM elektrolizöre aktarılmaktadır. PEM elektrolizörler, yüksek akım yoğunluğu, hızlı dinamik tepki ve yüksek saflıkta hidrojen üretme yetenekleri nedeniyle yenilenebilir enerji tabanlı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [Barbir, 2005:78, Turner, 2004:305].

Elektrik üretim performansındaki artış, doğrudan hidrojen üretim miktarına yansımakta ve sistemin çoklu enerji üretim kabiliyeti güçlenmektedir. Bu yapı sayesinde elektrik enerjisi yalnızca nihai bir çıktı olarak değil, aynı zamanda hidrojen üretimi için bir ara enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir.

5. Atık Isı Geri Kazanımı ve Yardımcı Ünite

Organik Rankine çevriminden çıkan düşük dereceli ısı, yardımcı bir üretim veya ısıtma ünitesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu atık ısının tarımsal bir üretim biriminin ısıtılmasında değerlendirilmesi öngörülmüştür.

Atık ısı geri kazanımı, sistemin toplam enerji kullanım etkinliğini artırmakta ve enerji kayıplarını azaltmaktadır [Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996].

Bu bütünleşik yapı sayesinde sistem; sıcak su, elektrik ve hidrojen üretimini aynı anda gerçekleştirebilen çok amaçlı bir enerji dönüşüm sistemi hâline gelmektedir.

TERMODİNAMİK MODELLEME VE VARSAYIMLAR

Entegre enerji sisteminin performans değerlendirmesi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Sistem bileşenlerinin her biri ayrı bir kontrol hacmi olarak ele alınmış; kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri bu kontrol hacimleri için tanımlanmıştır. Analizler, sistemin kararlı rejimde çalıştığı kabulü altında yürütülmüştür.

1. Genel Varsayımlar

Termodinamik modelleme sırasında aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

• Sistem, kararlı durum koşullarında çalışmaktadır.

• Tüm akışkanlar kontrol hacimlerine düzgün (uniform) özelliklerle girmekte ve çıkmaktadır.

• Borularda ve bağlantı elemanlarında oluşan basınç kayıpları ihmal edilmiştir.

• Isı ve kütle transferi yalnızca tanımlanan kontrol hacimleri üzerinden gerçekleşmektedir.

• Çevre koşulları sabit kabul edilmiş olup çevre sıcaklığı 298 K olarak alınmıştır.

• Güneş radyasyonu zamana bağlı olarak değişmekle birlikte, anlık analizlerde sabit kabul edilmiştir.

Bu varsayımlar, güneş enerjisi tabanlı entegre sistemlerin termodinamik analizlerinde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlarla uyumludur [Duffie, ve Beckman, 2013, Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996].

2. Kütle ve Enerji Denge Denklemleri

Her bir kontrol hacmi için kütlenin korunumu aşağıdaki genel ifade ile tanımlanmıştır:

$$\sum \dot{m}_{\text{giriş}} = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} \qquad (1)$$

Enerji dengesi ise aşağıdaki şekilde yazılmıştır:

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_{giriş} h_{giriş} = \sum \dot{m}_{çıkış} h_{çıkış} \quad (2)$$

Burada $\dot{Q}$ ısı transfer hızını, $\dot{W}$ iş transfer hızını ve h özgül entalpiyi ifade etmektedir. Bu denklemler, güneş havuzu, parabolik oluklu kollektörler, organik Rankine çevrimi bileşenleri ve PEM elektrolizör için ayrı ayrı uygulanmıştır [Quoilin vd, 2013:22, Hung, Shai ve Wang, 1997:22].

3. Ekserji Analizi

Sistemin ikinci kanun temelli değerlendirilmesi amacıyla ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Akışkan ekserjisi aşağıdaki ifade ile hesaplanmıştır:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

Burada T_0, h_0 ve s_0 sırasıyla çevre koşullarındaki sıcaklık, özgül entalpi ve özgül entropi değerlerini temsil etmektedir.

Bir kontrol hacmi için genel ekserji dengesi şu şekilde yazılmıştır:

$$\sum \dot{E}x_{giriş} - \sum \dot{E}x_{çıkış} - \dot{E}x_{yıkım} \quad (4)$$

Ekserji yıkımı, sistemdeki tersinmezliklerin bir göstergesi olup her bir bileşen için ayrı ayrı hesaplanmıştır [Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996].

4. Bileşen Bazlı Modelleme

Güneş havuzu için enerji ve ekserji analizleri, havuza gelen güneş radyasyonu ile depolanan ısı enerjisi dikkate alınarak yapılmıştır. Isı kayıpları, havuz yüzeyi ve yan duvarlardan çevreye olan ısı transferi üzerinden değerlendirilmiştir [El-Sebaii ve El-Bialy, 2011:15, Tiwari ve Sahota, 2017].

Parabolik oluklu güneş kollektörlerinde, odaklanan güneş ışınımı ile çalışma akışkanına aktarılan faydalı ısı hesaplanmış ve kollektör verimi belirlenmiştir [Kalogirou, 2004:30, Quoilin vd, 2013:22].

Organik Rankine çevriminde, buharlaştırıcı, türbin, yoğuşturucu ve pompa ayrı kontrol hacimleri olarak ele alınmış; her bir bileşen için enerji ve ekserji dengeleri oluşturulmuştur. Türbin ve pompa için izentropik verimler tanımlanarak gerçek çalışma koşulları modellenmiştir [Quoilin vd, 2013:22 Hung, Shai ve Wang, 1997:22].

PEM elektrolizörde, elektrik enerjisi girdisi ile üretilen hidrojen miktarı arasındaki ilişki Faraday yasası temel alınarak belirlenmiştir. Elektrolizör verimi, elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşüm etkinliği üzerinden değerlendirilmiştir [Barbir, 2005:78, Turner, 2004:305].

5. Performans Göstergeleri

Sistemin performansını değerlendirmek amacıyla aşağıdaki göstergeler tanımlanmıştır:

- Toplam elektrik üretimi
- Günlük hidrojen üretim miktarı
- Enerji verimi
- Ekserji verimi

Toplam sistem enerji verimi şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\eta_{enerji} = \frac{\dot{W}_{elektrik} + \dot{E}_{H_2}}{\dot{Q}_{güneş}} \quad (5)$$

Benzer şekilde, sistemin ekserji verimi ise faydalı ekserji çıktılarının toplam ekserji girdisine oranı olarak tanımlanmıştır [Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996, Damarseckin, Atiz ve Karakilcik, 2024:52].

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Entegre sistem bileşenlerinin teknik özelliklerinin verildiği Tablo 1'de entegre güneş enerjisi sisteminin performansı, farklı kütlesel debiler ve gün içi değişen güneşlenme koşulları altında değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen elektrik üretimi, hidrojen üretim miktarı ile enerji ve ekserji verimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hesaplamalar, sistemin tüm bileşenleri için oluşturulan termodinamik model üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Entegre sistem bileşenlerinin teknik özellikleri

Bileşen	**Özellik**	**Değer**
Güneş havuzu	Yüzey alanı	120–200 m²
PTC	Optik verim	0.72
ORC	Çalışma akışkanı	n-bütan
PEM	Hücre verimi	%65

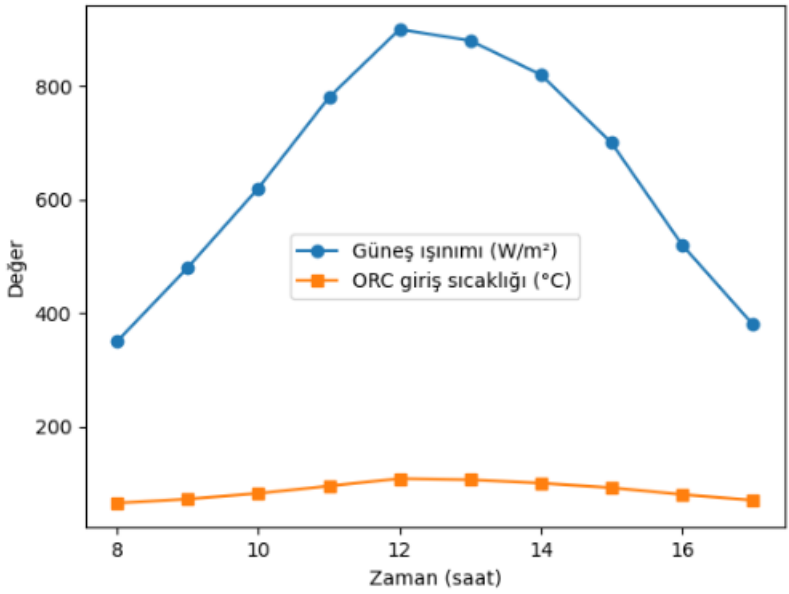
1. Gün İçi Performans Değişimi

Sistemin gün içi elektrik ve hidrojen üretim profilleri Şekil 2'de sunulmaktadır. Güneş ışınımının artmasıyla birlikte, güneş havuzu ve

parabolik oluklu güneş kollektörlerinden elde edilen ısı miktarının öğle saatlerine doğru belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Bu durum, organik Rankine çevrimine aktarılan ısıl enerjinin artmasına ve dolayısıyla elektrik üretiminin maksimum seviyelere ulaşmasına neden olmuştur.
Öğle saatlerinde elde edilen yüksek elektrik üretimi, PEM elektrolizörün daha etkin çalışmasını sağlamış ve hidrojen üretim hızında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Sabah ve akşam saatlerinde ise güneş ışınımındaki düşüşe bağlı olarak sistem performansının azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, benzer güneş enerjisi tabanlı entegre sistemler üzerine yapılan çalışmalarla uyumludur [Kalogirou, 2004:30, Quoilin vd, 2013:22].

Şekil 2, güneş havuzu ve parabolik oluklu kollektör entegrasyonunun, gün içi dalgalanmalara rağmen ORC giriş sıcaklığını kararlı bir şekilde artırabildiğini göstermektedir.

Güneş ışınımı sabah saatlerinden öğleye doğru artmakta, maksimum değerini 12:00–13:00 saatleri civarında almaktadır ORC giriş sıcaklığı güneş ışınımını gecikmeli ama paralel şekilde takip etmektedir. Ayrıca öğleden sonra her iki büyüklükte de düşüş gözlenmektedir.



Şekil 2. Gün içi güneş ışınımı ve ORC giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi

2. Kütlesel Debinin Sistem Performansına Etkisi

Tablo 2 de verilen farklı kütlesel debiler için elde edilen temel performans göstergeleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Sonuçlar, kütlesel debinin sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Düşük kütlesel debilerde, çalışma akışkanının güneş

kollektörleri ve güneş havuzu içerisinde daha uzun süre kalması, daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşılmasını sağlamıştır.

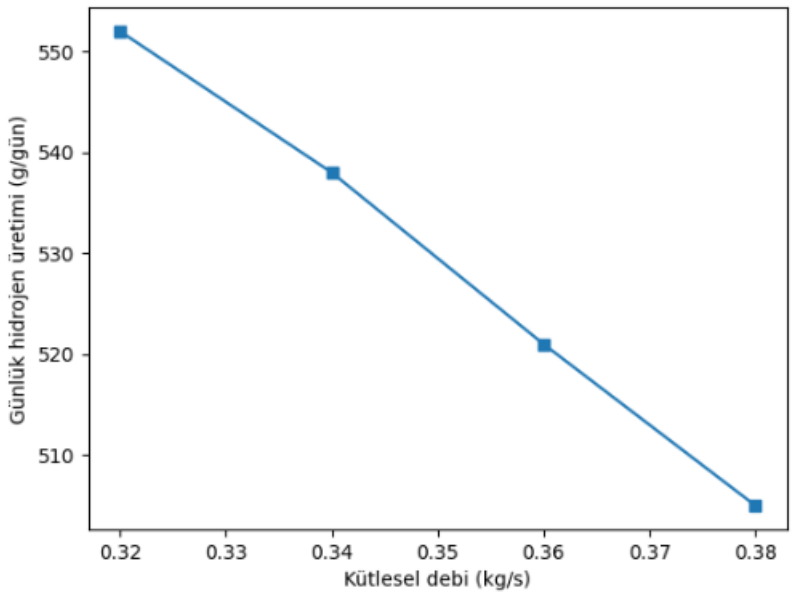
Bu durum, organik rankine çevriminde daha yüksek özgül iş üretimine yol açmış ve elektrik üretimini artırmıştır. Buna bağlı olarak PEM elektrolizörde üretilen hidrojen miktarının da düşük kütlesel debilerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 3'te, kütlesel debi ile günlük hidrojen üretimi arasındaki ilişki açıkça görülmektedir.

Tablo 2. Sistem analizinde kullanılan kütlesel debiler

Durum	Kütlesel debi (kg/s)
m_1	0.32
m_2	0.34
m_3	0.36
m_4	0.38

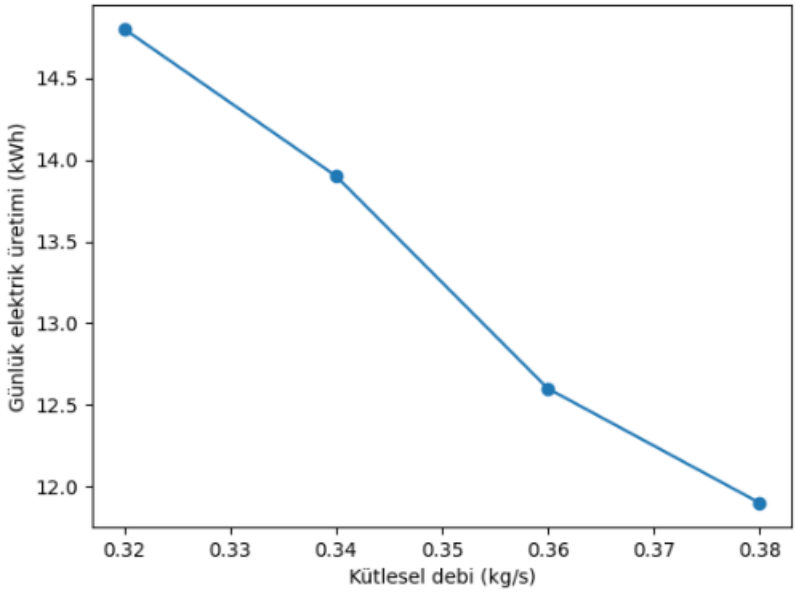
Tablo 3. Farklı kütlesel debiler için elektrik ve hidrojen üretim miktarları

Debi	Elektrik (kWh/gün)	Hidrojen (g/gün)
m_1	14.2	552
m_2	13.5	538
m_3	12.8	521



Şekil 3. Kütlesel debinin günlük hidrojen üretimine etkisi

Şekil 3, hidrojen üretiminin kütlesel debi ile ters orantılı olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 4. Kütlesel debinin günlük elektrik üretimine etkisi

Şekil 4'te görüldüğü üzere, kütlesel debinin azalmasıyla birlikte günlük elektrik üretiminde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca daha düşük debiler ORC performansını artırmaktadır.

3. Elektrik ve Hidrojen Üretim Karşılaştırması

Elektrik ve hidrojen üretim miktarlarının kütlesel debiye bağlı değişimi Tablo 3, Şekil 3 ve şekil 4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. En düşük kütlesel debi için günlük elektrik üretiminin yaklaşık %8–12 oranında daha yüksek olduğu, buna paralel olarak hidrojen üretiminin de artış gösterdiği tespit edilmiştir.

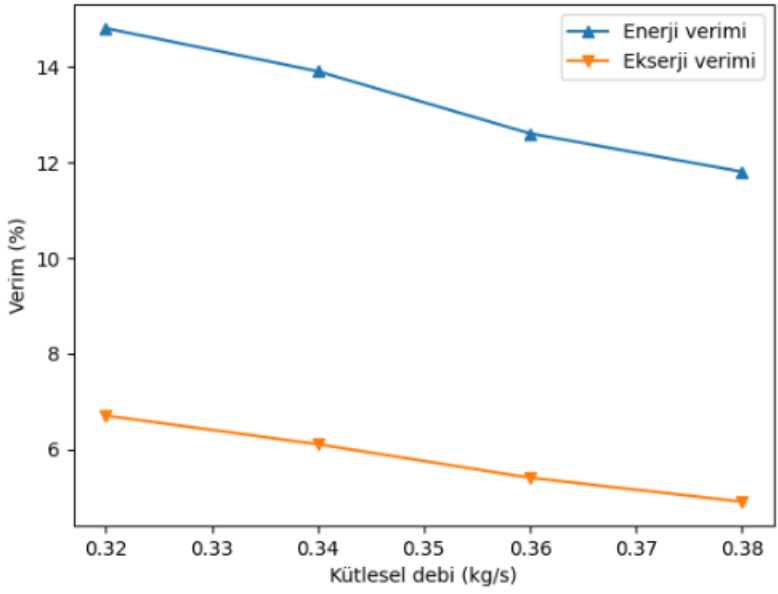
Günlük hidrojen üretim miktarının, düşük kütlesel debi koşullarında yaklaşık 550 g seviyelerine ulaştığı, yüksek kütlesel debilerde ise bu değerin 500 g civarına gerilediği görülmektedir. Bu sonuçlar, sistem tasarımında optimum kütlesel debinin belirlenmesinin önemini ortaya koymaktadır [Barbir, 2005:78, Turner, 2004:305, Damarseckin, Atiz ve Karakilcik, 2024:52].

4. Enerji ve Ekserji Verimleri

Sistemin enerji ve ekserji verimleri farklı kütlesel debiler için hesaplanmış ve Tablo 4'te sunulmuştur. Enerji veriminin %12–15 aralığında değiştiği, ekserji veriminin ise %5–7 seviyelerinde kaldığı belirlenmiştir. En yüksek enerji ve ekserji verimleri, düşük kütlesel debi koşullarında elde edilmiştir. Elde edilen enerji ve ekserji verim sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Entegre sistemin enerji ve ekserji verimleri

Debi	Enerji verimi (%)	Ekserji verimi (%)
m_1	14.8	6.7
m_2	13.9	6.1
m_3	12.6	5.4



Şekil 5. Enerji ve ekserji verimlerinin kütlesel debiye bağlı değişimi

Şekil 5'te sunulan sonuçlar, sistemdeki tersinmezliklerin ekserji verimini sınırlandırdığını göstermektedir.
Ekserji analiz sonuçları, sistemdeki en yüksek ekserji yıkımının güneş enerjisinin termal enerjiye dönüştürüldüğü bileşenlerde gerçekleştiğini göstermektedir. Parabolik oluklu güneş kollektörleri ve organik Rankine çevrimi, toplam ekserji yıkımının büyük bir kısmından sorumludur. Bu bulgu, güneş enerjisi tabanlı sistemlerde yoğunlaştırıcı kollektörlerin ve güç çevrimlerinin optimizasyonunun kritik önem taşıdığını göstermektedir [Dincer ve Rosen, 2013, Bejan, 1996].

5. Genel Değerlendirme

Elde edilen sonuçlar, güneş havuzu ve parabolik oluklu güneş kollektörlerinin birlikte kullanıldığı entegre sistemlerin elektrik ve hidrojen üretimi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Atık ısının yardımcı bir üretim biriminde değerlendirilmesi, sistemin toplam

enerji kullanım etkinliğini artırarak çok amaçlı bir enerji dönüşüm yapısı sağlamıştır.

Sonuç olarak, uygun kütlesel debi seçimi ve sistem bileşenlerinin entegrasyonu sayesinde, güneş enerjisine dayalı hibrit sistemlerin hem elektrik hem de hidrojen üretimi için verimli bir alternatif olabileceği görülmektedir

GENEL SONUÇLAR

Güneş havuzu ve parabolik oluklu güneş kolektörlerinin entegre edildiği çok bileşenli sistemin elektrik ve hidrojen üretim potansiyeli, farklı çalışma koşulları altında ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Gün içi analizler, sistem performansının güneş ışınımına güçlü biçimde bağlı olduğunu ve maksimum elektrik ile hidrojen üretiminin öğle saatlerinde elde edildiğini göstermiştir.

Kütlesel debinin sistem davranışı üzerindeki etkisi incelendiğinde, düşük debilerde çalışma akışkanının ısı toplama ünitelerinde daha uzun süre kalması sayesinde daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu durum, organik Rankine çevriminde üretilen elektrik miktarını artırmış ve buna bağlı olarak PEM elektrolizörün hidrojen üretim performansını olumlu yönde etkilemiştir. Günlük hidrojen üretiminin düşük kütlesel debilerde yaklaşık 550 g seviyelerine ulaştığı, debi arttıkça bu değerin azaldığı tespit edilmiştir.

Enerji ve ekserji analizleri, sistemin termodinamik açıdan tutarlı bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Enerji veriminin %12–15 aralığında, ekserji veriminin ise %5–7 seviyelerinde gerçekleştiği belirlenmiştir. Ekserji veriminin enerji verimine kıyasla daha düşük olması, sistemdeki tersinmezliklerin özellikle ısı toplama ve güç çevrimi bileşenlerinde yoğunlaştığını göstermektedir.

Organik Rankine çevriminden çıkan atık ısının yardımcı bir ısıtma uygulamasında değerlendirilmesi, sistemin toplam enerji kullanım etkinliğini artırarak çok amaçlı bir enerji dönüşüm yapısı sağlamıştır. Bu yaklaşım, güneş enerjisi tabanlı sistemlerin yalnızca elektrik üretimiyle sınırlı kalmayıp, hidrojen üretimi ve ısı geri kazanımı gibi farklı çıktılar sunabileceğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, güneş havuzu ve parabolik oluklu güneş kolektörlerinin birlikte kullanıldığı entegre sistemlerin, yenilenebilir kaynaklara dayalı

elektrik ve hidrojen üretimi açısından uygulanabilir ve sürdürülebilir bir alternatif sunduğu görülmektedir. Uygun tasarım parametreleri ve çalışma koşulları seçildiğinde, bu tür sistemlerin gelecekte çok amaçlı enerji üretim uygulamalarında önemli bir rol üstlenebileceği değerlendirilmektedir.

REFERANSLAR

Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Solar Energy, 78(5), 661–669.

Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. (1996). Thermal Design and Optimization. Wiley, New York.

Damarseckin, S., Atiz A., Karakilcik, M. (2024). Solar pond integrated with parabolic trough solar collector for producing electricity and hydrogen,. international journal of hydrogen energy 52, 115e126

Dincer, I., Rosen, M.A. (2013). Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development.2nd ed., Elsevier, Oxford.

Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed., Wiley, New York.

El-Sebaii, A.A., El-Bialy, E. (2011). Advanced designs of solar ponds: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6), 2928–2940.

Hung, T.C., Shai, T.Y., Wang, S.K. (1997). A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. Energy, 22(7), 661–667.

Kalogirou, S.A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30(3), 231–295.

Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 168–186

Tiwari, G.N., Sahota, L. (2017). Advanced Solar-Distillation Systems: Basic Principles, Thermal Modeling, and Its Application. Springer, Singapore.

Turner, J.A. (2004). Sustainable hydrogen production. Science, 305(5686), 972–974.

Küresel Isınma, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

Fatma AKALIN[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversite, Türkiye
[*](fatmaakalin@sakarya.edu.tr)

ÖZET

Küresel ısınma ve küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği son 65 yıl içerisinde karşılaşılan evrensel bir problemdir. Bu problem, yeryüzünde artan ortalama yüzey sıcaklığının dünya enerjisinde oluşturduğu dengesizlik olarak nitelendirilmektedir. Sosyo-politik, sosyo-ekonomik, ekolojik ve çevresel alanların çeşitli bileşenleri üzerinde etkisi olan bu problemin temelinde insan eylemlerinin dünya atmosferinde neden olduğu değişimler, sanayi çağı ile birlikte başlayan endüstriyel faaliyetler sonucunda atmosferdeki sera gazı miktarındaki artış ve sera gazlarına eklenen kloroflorokarbonlar nedeniyle kirlenen ozon tabakası vardır. Bu faktörler tarım, orman ve bitki örtüsü, temiz su kaynakları, deniz seviyesi, enerji, insan sağlığı, hava kirliliği, asit yağmurları ve biyoçeşitlilik üzerinde potansiyel birçok etkinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum küresel ısınma sürecinin değerlendirilmesi, küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği probleminin analiz edilmesi, iklim değişikliği sonucunda oluşan hayati, mali vb. etkilerin irdelenmesi ve bu etkilere yönelik sürdürülebilirliğe ilişkin önlemlerin alınmasına itmektedir. Bu çalışma ile sürece yönelik bilgilendirme sağlanması planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Küresel Isınma, Küresel Isınmanın Neden Olduğu İklim Değişikliği, Sürdürülebilirlik, İnsan Eylemleri, Biyoçeşitlilik.

GİRİŞ

Sıcaklık artışlarında görülen anomaliler küresel iklim göstergeleri ile ilişkilidir. WMO raporuna göre küresel iklim göstergeleri, kara, okyanus, buz kütleleri ve atmosferin değişen bileşimi ile ifade edilmektedir [3]. Bu ifade 21 Mart 1994'te yürürlüğe giren Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçevesi'nde, iklim değişikliğinin insan aktivitelerinin doğrudan ya da dolaylı olarak dünya atmosferinde neden olduğu değişimler olarak nitelendirilen tanımlama ile de bağlantılıdır [4]. Çünkü yeryüzündeki ortalama yüzey sıcaklığı dünya enerjisindeki dengesizliğin oluşması ile artmaktadır. Bu dengesizlik IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 raporunda şu şekilde açıklanmaktadır [2].

Güneş, spekturumun görünür veya ultraviyole kısmında çok kısa dalga boyları ile enerji yayar. Dünya atmosferinin üst kısmına ulaşan bu enerjinin yaklaşık olarak üçte biri doğrudan uzaya yansırken kalan üçte ikisinin bir bölümü dünyanın yüzeyi ve atmosfer tarafından emilir. Emilen enerjinin ortalama aynı miktarının enerji dengesinin kurulması açısından dünya tarafından uzaya geri yayılması gerekir. Fakat dünya güneşe göre çok daha soğuk bir gezegendir. Bu nedenle uzun dalga boylarında ve özellikle spekturumun kızıl ötesi kısmında ışınım yapar. Bu durumun sonucunda görünmez dalga boyundaki ışığın büyük bir kısmı atmosfer tarafından emilir ve dünyaya geri yayılır. Sera etkisi olarak nitelendirilen bu düzenin

olmaması koşulunda ise dünya yüzeyindeki ortalama sıcaklığın suyun donma noktasına eşdeğer olması problemi meydana gelecektir [2].

Bugünkü koşullarda yaşamı mümkün kılmak üzere var olan sera etkisi, su buharı, karbondioksit, ozon, metan, diazotoksit, halokarbonlar ve diğer endüstriyel gazlardan oluşmaktadır [2][4]. Su buharı ve CO^2 en önemli sera gazlarıdır. Metan, nitrözoksit ve diğer bazı gazlarda sera etkisinde rol oynamaktadır. Atmosferde en fazla bulunan nitrojen (Kuru atmosferin %78'ini oluşturan) ve oksijen (Kuru atmosferin %21'ini oluşturan) ise neredeyse hiç sera etkisi oluşturmayan gazlar olarak nitelendirilmektedir.

Sera gazlarının atmosferdeki yoğunlukları iklim sisteminin çeşitli doğal bileşenleri ile ilişkilidir. Bu durumun en önemli örneği olan fotosentez olayı CO^2 tüketmek ve O^2 üretmek üzere dengeyi kurmaya yardımcı olmaktadır. Fakat sanayi çağı ile birlikte başlayan insan faaliyetleri (fosil yakıt tüketiminin artması ya da ormanların yok edilmesi vb.), endüstriyel gazların miktarında artış göstererek atmosfere daha fazla sera gazı eklenmesini tetiklemiştir. Sera etkisinde oluşan farklı yoğunluklar sonucunda dünyanın ısınma ya da soğuma derecesi etkilendiği için dünya enerjisinde yaşanan dengesizlik ile küresel ısınma meydana gelmiştir [2]. WMO raporuna göre belirli konumlardan alınan gerçek zamanlı verilerin üç temel sera gazı olan karbon dioksit, metan ve nitröz oksit yoğunlukları gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda gazların rekor yüksek seviyelere ulaştığı belirtilmiştir [5].

CO^2 ve diğer sera gazlarının zaman içerisinde artışı ile birlikte atmosferde oluşan enerji, enerjinin ısı biçiminde birikmesine neden olmaktadır. Isı biçiminde depolanan bu enerji, dünyanın %70'ini kaplayan okyanus kütleleri üzerinde kritik bir etki meydana getirmektedir. Çünkü ısıyı ve CO^2 emen okyanuslar, atmosferdeki ısınma oranını yavaşlatmaktadır. Bunun sonucunda emilen ısı ile birlikte ısınan su kütleleri karadaki buzların erimesine ve deniz seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır [5]. Aynı zamanda insan kaynaklı CO^2'in atmosfere salınan yüzde 25'lik bir kısmının deniz suyu tarafından emilmesi sonucunda asitlenen okyanus; biyolojik çeşitliliği azaltmakta, yaşam alanlarını bozmakta ve balıkçılık ile su ürünleri yetiştiriciliğini tehlikeye atarak gıda güvenliği de dahil olmak üzere organizmaları ve ekosistem hizmetlerini etkilemektedir [5]. Öte yandan sera gazlarına kloroflorokarbon üretiminin eklenmesi sonucunda kötü huylu ozon ortaya çıkmaktadır. Troposferik ozon olarak bilinen ve atmosfere en yakın olan troposfer tabakasında bulunan bu ozon türü, toplam ozonun %10'unu oluşturmaktadır. Özellikle çocuklarda solunum sistemi rahatsızlıklarına neden olan kötü huylu bu ozon türü bitkiler ve ormanlar üzerinde de olumsuz birçok etkiye sahiptir [5] [6]. Atmosferdeki ozonun kalan %90'lık kısmı, atmosferin troposfer tabakasından sonra gelen stratosfer tabakasında bulunmaktadır. Stratosferik ozon olarak nitelendirilen bu ozon türü güneşten gelen zararlı ultraviyole ışınları emerek tüm canlıları koruyan bir yapı sunmaktadır [6].

Genel perspektifte ozon, dünya üzerinde koruyucu bir etki oluşturmasına rağmen ozon kirliliği insan sağlığına zararlı olan bir çevre sorunudur. Nefes darlığı, baş ağrısı, mide bulantısı, öksürük ve solunumla ilgili rahatsızlıklara da sebep olan bu çevre sorunu Montreal Protokolü ile Kyoto Protokolü hükümleri arasında yer alan bilimsel bir bağlantıdır [5].

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Küresel İklim Değişikliği Sonucunda Meydana Gelen Etkiler

Ana farklılaşan sera gazlarındaki oranın sonucu olarak tarım, orman ve bitki örtüsü, temiz su kaynakları, deniz seviyesi, enerji, insan sağlığı, hava kirliliği, asit yağmurları ve biyoçeşitlilik üzerinde potansiyel birçok olumsuz etkinin oluşmasına neden olmaktadır. Örneğin, küresel iklim değişikliği ile birlikte deniz seviyelerinde görülen artış; sahillerde erozyon oluşumu, sel ve taşkınlar ve kıyılardaki yerleşik toplulukları koruma maaliyetleri meydana getirmektedir. Enerji faktörü kapsamında fosil yakıtlar olarak bilinen petrol, kömür ve doğalgaz gibi maddelerin tüketimi ya da yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvikine ilişkin enerji politikalarındaki değişimler, enerji tüketiminde ve enerji maliyetlerinde değişimler meydana getirmektedir. İnsan sağlığı üzerinde yağışların, sıcaklıkların ya da soğukların değişmesi sonucunda iklim bağlantılı ölümler, salgın hastalıklar ve hava kalitesinde düşüş problemleri görülmektedir. Tarım ile bağlantılı olarak yükselen sıcaklıklara ilişkin ürünlerin yetiştiği alanların kayması ve artan CO^2 oranı ile birlikte ürün kayıpları, sulama problemleri ve tarım alanlarında değişimler yaşanmaktadır. Doğal çevre ve türler hususunda yükselen sıcaklık değişimleri ile birlikte artan orman yangınları, böcek istilaları ya da sıcaklık değişimine uyum sağlayamayan ekosistem bölgeleri ile doğal yaşam alanlarında kayıplar ve tür çeşitliliğinde azalmalar gerçekleşmektedir. Su kaynakları üzerinde yağışın azalmasına bağlı olarak su arzında azalma, su kalitesinde düşüş ve su kaynakları için rekabet problemleri oluşmaktadır. Ormanlar kapsamında yükselen sıcaklık ile birlikte ağaçlar, böcekler ve diğer canlılar arasında var olan dengenin bozulmasıyla orman kompozisyonu, ormanların coğrafi dağılımında değişme ve orman sağlığı ve verimliliğinde düşüş sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu örnekler doğrultusunda dünyayı tehdit eden küresel iklim değişikliği nedeniyle yaşanan farklılıkların sosyal ve ekonomik yaşamda meydana gelmesi olası diğer potansiyel etkilerin gelişimini hızlandıracağı öngörülmektedir [4].

BULGULAR VE TARTIŞMA

Uluslararası enerji ajansının her sonbaharda yayınlanan 2023 Dünya Enerji Görünümü'ne göre [7] bazı ülkelerin açıklanmış politikalar senaryosu (STEPS) ve uzun vadeli tüm koşulları varsayan açıklanmış taahhütler senaryosu (APS) kapsamında 2050 yılına kadarki uzun vadeli tüm koşulları varsayan açıklanmış taahhütler senaryoları bağlamında seçilen tüm ülkelerin güneş enerjisi ile elektrik üretimi ve temiz enerji yatırımı konularında genellikle artan bir eğri seyrettiğini göstermektedir. Fakat petrol, doğalgaz, kömür talepleri ile CO^2 emisyonu durumlarında azalan bir eğri mevcuttur. Özellikle temiz enerjinin sağlanması amacıyla 2010-2023 yılları arasında yapılan yatırımlar genel olarak bir artış gösterse de Avrupa Birliği, Amerika birleşik devletleri, Japonya ve Kore haricindeki diğer ülkelerde CO^2 emisyonunda düşüş yaşanamamıştır. Bununla birlikte açıklanmış politikalar senaryolarına göre Avrupa Birliği, Amerika birleşik devletleri, Çin, Japonya ve Kore haricindeki diğer ülkelerde CO^2 emisyonunda 2050 yılına kadar herhangi bir iyileşme sağlanamayacağı da net bir şekilde tasvir edilmektedir. Aslında ülkeler tarafından sera gazı emisyonu azaltmaya yönelik olarak alınması hedeflenen tedbirler tarım, biyoçeşitlilik, sağlık, turizm, ekonomi, sanayi ve ormancılık sektörlerinde sürdürülebilirliği sağlamak için gerçekleştirilen küresel çözümlerdir [1]. Çünkü Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli 2023 yılında yayınladığı raporda iklim değişikliğinin gıda ve su güvenliğini etkileyerek sürdürebilir kalkınma hedeflerini engellediğini ifade etmektedir [2][3]. Bu nedenle Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri 2023 raporunda [8] Eylül 2015'te, Birleşmiş Milletler Genel Kurulu vasıtasıyla sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında imzalanan 17 eylemin (-yoksulluk yok, -sıfır açlık, -iyi sağlık ve esenlik, -kaliteli eğitim, -cinsiyet eşitliği, -temiz su ve sanitasyon, -uygun fiyatlı ve temiz enerji, -insana yakışır iş ve ekonomik büyüme, -sanayi, inovasyon ve altyapı, -eşitsizliklerin azaltılması, -sürdürülebilir şehirler ve topluluklar, -sorumlu tüketim ve üretim, -iklim eylemi, -suyun altındaki yaşam, -karada yaşam, -barış, adalet ve güçlü kurumlar, -hedefler için ortaklıklar)[9] iklim krizi etkileri, savaş, zayıf küresel ekonomi ve kovid salgınının tesirlerinden dolayı hedefe ilerleme sürecinde meydana gelen engeller olduğu ve 2030 yılına kadar insanlar ve gezegen için anlamlı bir gelişme sağlamak hususunda acil eylem gerektiren alanların mevcut olduğunu belirtmektedir[8]. Ek olarak Ekonomik kalkınma ve iş birliği örgütü tarafından yayınlanan iki rapordan yola çıkarak oluşturulan "iklim değişikliği ve plastik kirliliği" politika öne çıkanlarında [10] plastik nesnelere ilişkin yaşam döngüsünün toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %4'ünü oluşturduğu ifade edilmiştir ve plastik azaltımının önemli olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, tarım, biyoçeşitlilik, sağlık, turizm, ekonomi, sanayi, ormancılık sektörlerinde sürdürülebilirliği sağlamak; çevre kirliliği, orman ve bitki örtüsü, temiz su kaynakları, deniz seviyesi, enerji, insan sağlığı, hava kirliliği, asit yağmurları ve biyoçeşitlilik üzerinde potansiyel etkileri

azaltmak; değişen iklim sıcaklıkları nedeniyle oluşum gösteren mali ve hayati sorunları indirgemek; uzun vadeli hedeflere yönelik düşük sera gazı emisyonu geliştirme stratejilerinin hayata geçirilmesine yardımcı olmak; güneş enerjisi ile elektrik üretimi ve temiz enerji yatırımını iyileştirmek; başta endüstriyel faaliyetlerde olmak üzere fosil yakıt tüketimini ve insan kaynaklı CO2'in atmosfere verilme oranını azaltmak; karbon nötrlük hedeflerin geliştirilmesi yönündeki çemberi genişletmek; küresel enerji krizini yönetmek; ülkeler arası farkındalığı arttırmak ve 12. Kalkınma planında belirlenen [11] 2024-2028 hedeflerinin gerçekleştirilmesine destek olarak milli çıktılar üretmek için uluslararası düzeyde tüm dünyaya seslenmek ve iş birliklerine davet etmek üzere yapay zeka tabanlı ve etkileşimli bir çalışma gerçekleştirilmelidir.

SONUÇLAR

Bu çalışma sera gazlarının neden olduğu küresel ısınma sürecinin değerlendirilmesi, küresel ısınmanın neden olduğu iklim değişikliği probleminin analiz edilmesi, iklim değişikliği sonucunda oluşan hayati ve mali etkilerin irdelenmesi ve bu etkiler sonucunda sürdürülebilirliğe ilişkin önlemlerin alınması için bir inceleme sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H. and Younis, I., 2022. "A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures", Environmental Science and Pollution Research, 29, 42539–42559.

[2] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), " Climate Change 2007 - The Physical Science Basis', 2007", https://www.ipcc.ch/, Son erişim tarihi : 26.01.2024.

[3] WMO(World Meteorological Organization), "Provisional State of the Global Climate in 2022", https://library.wmo.int/, Son erişim tarihi : 26.01.2024.

[4] Doğan, S. and Tüzer, M., 2011. "Küresel İklim Değişikliği ve Potansiyel Etkileri", Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(1), 21–33.
[5] WMO(World Meteorological Organization), "IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System", 2018. https://library.wmo.int/, Son erişim tarihi : 26.01.2024.
[6] MGM(Meteoroloji Genel Müdürlüğü), "Troposferik ve Stratosferik Ozon". https://www.mgm.gov.tr/, Son erişim tarihi : 26.01.2024. (https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/kitaplar/ozonuv/tsozon.pdf)
[7] World Energy Outlook," Regional insights / Different starting points, different pathways " 2023. Son erişim tarihi : 26.01.2024. (https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf).
[8] The Sustainable Development Goals Report, "The Sustainable Development Goals Report(Special Edition), 2023". https://unstats.un.org/UNSDWebsite/, Son erişim tarihi : 26.01.2024. (https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/).
[9] European Commission, "EU “whole-of-government” approach", https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-whole-government-approach_en, Son erişim tarihi : 26.01.2024.
[10] OECD, "Climate change and plastics pollution", 2023. https://www.oecd.org/, Son erişim tarihi : 26.01.2024. (https://www.oecd.org/environment/plastics/Policy-Highlights-Climate-change-and-plastics-pollution-Synergies-between-two-crucial-environmental-challenges.pdf)
[11] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, "On ikinci Kalkınma Planı (2024-2028)", 2024. https://www.sbb.gov.tr/, Son erişim tarihi : 26.01.2024. (https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf)

Genetik Etiyolojiye Sahip Klinik Bir Durumda Biyolojik Veri Örüntülerinin Analizi

Fatma AKALIN[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversite, Türkiye
[*](fatmaakalin@sakarya.edu.tr)

ÖZET

Son yıllarda bilişim dünyasındaki gelişmeler, nörolojik hastalıkların tanı ve tedavisinde sunduğu çözümlerle güvenilir bir alan oluşturmaktadır. Bilişim dünyasının bu başarısı, genetik etiyolojisi olan nörolojik epilepsi vakalarının incelenmesinde de büyük bir potansiyele sahiptir. Biyolojik araştırmalarda önemli bir rol oynayan DNA analizi için geçmişten günümüze çok sayıda hesaplama modeli geliştirilmiştir. Ancak, bu yöntemlerin çoğu DNA uzunluğuna dayalı analizler yapmaktadır ve nükleotidler arasındaki karmaşık etkileşimleri göz ardı etmektedir. Bununla birlikte her bir nükleotidin yerel önemini dikkate alarak küresel etkileşimleri analiz etmek, bu yapıları anlamak için çok önemlidir. Bu çalışmada, prognoz ve kişiselleştirilmiş tedaviler için klinik tanı ve tahmin modelleri geliştirmek üzere bir metodoloji sunulmaktadır. Bu metodoloji, kategorik DNA dizilerini sayısallaştırma, DNA dizisindeki her bir organik baz için TF-IDF ağırlıklarını hesaplama, farklı uzunluklardaki DNA dizileri için kontrol kararları oluşturma, istatistiksel kriterlerle etkili özellikleri çıkarma ve değişkenler arasında biyolojik verileri tanımlama aşamalarıdır. Sunulan metodolojinin performansı değerlendirildiğinde biyolojik veriler arasında güçlü bir ilişkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Nükleotit Dizilimleri, Genetik Etiyoloji, Biyolojik Veriler Arasındaki İlişkiyi Tespit Etme.

GİRİŞ

Epilepsi, merkezi sinir sistemi hücrelerinin anormal şekilde uyarılması nedeniyle ortaya çıkan bir nörolojik bozukluktur. Bu bozukluk, anormal beyin aktiviteleri nedeniyle ani elektriksel deşarjlar ve sinir hücreleri arasındaki kontrolsüz iletişim ile kendini gösterir. Dünya çapında yaklaşık 70 milyon kişiyi etkiler [1] ve yaşam boyu risk oranı %3'e kadar çıkabilir. Epilepsi vakalarının %30'unun genetik bir etiyolojiye sahip olduğu tahmin edilmektedir [2]. En yaygın nörolojik hastalıklardan biridir. Tüm yaş ve cinsiyet gruplarında görülebilir. Sosyal, mesleki, fiziksel ve psikolojik faktörler üzerinde olumsuz etkileri vardır [3].

Epilepsi, genetik, yapısal ve metabolik nedenleri olan bir hastalıktır. Bununla birlikte, çoğu epilepsi sendromunda bazı genetik yatkınlıklar vardır [4]. Genetik epilepsiler, genetik etiyolojilerine göre üç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar aile öyküsü, klinik çalışmalar ve genetik varyantlardır [2].

Genetik epilepsiler, monogenik veya kompleks kalıtım özellikleri gösterebilir. Monogenik kalıtım, epilepsinin ortaya çıkmasının tek bir genetik varyantla ilişkili olması anlamına gelir. Bu varyantlar kalıtsal veya yeni gelişen (de novo) mutasyonlardır. Öte yandan, kompleks kalıtım, epilepsinin ortaya çıkmasının birden fazla genetik faktör veya çevresel faktörle ilişkili olduğu durumdur. ILAE(Uluslararası Epilepsi Birliği)'nin

mevcut sınıflandırmasına göre epilepsi, de novo varyantları nedeniyle genetik kalıtımın kanıtını gerektirmez. Dravet sendromu, bu durumu doğrulayan bir çerçeve çizer. Çünkü Dravet, bir tür gelişimsel ve epileptik ensefalopati (DEE) türüdür. Oluşumu, SCN1A genindeki mutasyonlardan kaynaklanır. Bu mutasyonların neredeyse %80'i de novo olup ailelerden kalıtsal değildir. Bu bağlamda, nörogelişimsel bozuklukları ve epilepsisi olan hastalar üzerinde yapılan retrospektif büyük ölçekli bir çalışmada, 33 genin de novo varyantlarını zenginleştirdiği bulunmuştur. 33 gen arasında yer alan CACNA1E, SNAP25 ve GABRB2 için hastalıkla ilişkilerinin sınırlı olması nedeniyle epilepsi ile ilişkilerinin daha fazla araştırılması gerektiği belirtilmiştir [2].

De novo ve kalıtsal hiyerarşi ile ilişkili epilepsi ile ilgili genler, çeşitli nöronal iyon kanallarının alt birimlerini kodlayan genlerde bulunmuştur [2]. İyon kanalları, hücre zarındaki protein yapılarıdır. Sodyum, potasyum ve kalsiyum gibi inorganik maddelerin hücreye girip çıkmasından sorumludur. Hücrelerin elektriksel aktivitelerinin düzenlenmesi ve nöronlar arasındaki iletişimin gerçekleşmesi iyon kanalları aracılığıyla olur. Gerilim kapılı kanallar ve ligand kapılı kanallar, iyon kapılarının açılmasına neden olan başlıca uyarıcı türleridir. Gerilime bağlı iyon kanalları, hücre zarının elektriksel aktivitesindeki değişiklikler tarafından düzenlenirken, liganda bağlı iyon kanalları kimyasal haberciler tarafından düzenlenir [5]. Bu bağlamda, CACNA1A voltaj kontrollü iyon kanalının alt birimini kodlarken, GABRA1 ligand kontrollü iyon kanalları arasında yer alan GABAA reseptör alt birimini kodlar [2].

İyon kanalı genleri, epilepsi ile en sık nedensel olarak ilişkili gen ailesini temsil etse de [6], iyon kanalı bağımlı olmayan epilepsi ile ilişkili genler de mevcuttur. TSC1 ve TSC2 genleri bu durumun örnekleridir. Öte yandan, X kromozomuna bağlı kalıtım modeline sahip genlerin birçok örneği vardır. Bu yönde, X kromozomuna bağlı resesif bir şekilde kalıtılan ARX geni, epilepsi ile ilişkilidir [2].

Bu çalışma epilepsi ve sağlıklı kategoriler kapsamında nükleotid dizileri için yeni bir metodoloji sunulmuştur. Böylece, genetik varyasyonları tespit ederek, genetik bağlantıları inceleyerek ve fonksiyonel kalıpları belirleyerek genetik bilginin biyolojik ve klinik etkilerinin değerlendirilmesi planlanmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Veri Kümesi

BFNC ve diğer epilepsi türlerinin genetik özelliklerinin belirlenmesi, erken tanı ve tedavi stratejilerinin öngörülmesi için çok önemlidir. Bu nedenle, mutasyonları analiz etmek ve bunları sağlıklı kabul edilen dizilerden ayırt etmek sürecin yönetimi açısından önemlidir. Bu çalışmada, esnek ve genelleştirilebilir bir metodoloji geliştirmek üzere bir veri seti kullanılmıştır.

Bu veri kümesi, sağlıklı bir donörden izole edilen BMP2 ve MMP9 genetik kodlama dizileri ile diğer epilepsi türleri için KCNQ2 ve KCNQ2 genetik kodlama dizilerini içerir. Erişim sütunundaki tanımlayıcı ile her dizinin ayrıntılarına erişilebilir. NCBI gen bankasından elde edilen farklı uzunluklardaki bu diziler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. NCBI gen bankasından elde edilen DNA dizileri [8]

Erişim	UZUNLUK	Kategori
HW383596.1	1341	Epilepsy
HW383595.1	1019	Epilepsy
HW383594.1	1021	Epilepsy
HW383592.1	1172	Epilepsy
HW383591.1	1232	Epilepsy
HW383590.1	914	Epilepsy
HW383589.1	819	Epilepsy
HW383588.1	1083	Epilepsy
HW383587.1	1117	Epilepsy
HW383586.1	973	Epilepsy
HW383585.1	649	Epilepsy
HW383575.1	318	Epilepsy
HW383584.1	859	Epilepsy
HW383583.1	841	Epilepsy
HW383582.1	245	Epilepsy
HW383581.1	636	Epilepsy
HE995533.1	***461***	***Healthy***
GQ335533.1	***4570***	***Healthy***
GQ335532.1	***3976***	***Healthy***
GQ335531.1	***4333***	***Healthy***
GQ335530.1	***4588***	***Healthy***
GQ335529.1	***4328***	***Healthy***

Tablo 1'de sunulan diziler, BFNC ve diğer epilepsi türlerinin tanısında kullanılabilen KCNQ2 ve KCNQ3 genlerindeki mutasyonları sağlıklı dizilerden ayırt etmek için oluşturulmuştur.

B. Sunulan Metodoloji

Epilepsi ve sağlıklı kategorilerin istatistiksel doku özellikleri, metin madenciliği ve bilgi erişim teknikleri kullanılarak analiz edilmektedir. Bu metodolojide sırasıyla kategorik verilerin dijitalleştirilmesi, dijitalleştirilmiş her organik baz için TF-IF ağırlıklarının hesaplanması, kontrol kararını oluşturmak için fonksiyonunun kullanılması, istatistiksel kriterlerle etkili özelliklerin çıkarılması ve değişkenlerle analiz edilen biyolojik veriler üzerinde anlamlı ilişkilerin elde edilmesi aşamaları vardır.

Kategorik Verilerin Sayısallaştırılması

Adenin, Timin, Guanin ve Sitozin nükleotidlerinden oluşan DNA molekülü, büyük miktarda bilgi içeren hücrenin bir parçasıdır [9]. Nükleotid dizileri sembollerden oluşur ve bu da analiz ve bilgi çıkarma sürecini zorlaştırır. Bu nedenle, DNA dizilerini dijital haritalama teknikleriyle dijitalleştirmek önemli bir işlevdir [7]. Bu çalışmada, diziler sabit haritalama tekniklerinden biri olan Gerçek Haritalama Tekniği kullanılarak sayısallaştırılmıştır.

TF-IDF Ağırlıklarının Hesaplanması

Bu çalışmada, metin verilerini anlamak ve işlemek için metin madenciliğinde yaygın olarak tercih edilen TF-IDF yöntemi, gerçek haritalama tekniği ile dijitalleştirilen DNA dizilerini analiz etmek için kullanılmıştır. TF-IDF, belgelerden anahtar kelimeleri çıkarmak, belgeler arasındaki benzerlik derecesini hesaplamak ve arama sıralamalarını belirlemek gibi işlemler için bilgi erişim ve metin madenciliği alanlarında tercih edilmektedir. Bu yöntem, Terim Sıklığı (Term Frequency) ve Ters Belge Sıklığı (Inverse Document Frequency) terimlerinin birleşimidir[10]

TF, hedef kelimenin belgede görülme sıklığını ölçmek için kullanılır. Matematiksel ifadesi Denklem 1'de verilmiştir.

$$TF_{ij}=\frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{k,j}} \qquad (1)$$

$n_{i,j}$, belgedeki ilgili kelimenin tekrar sayısıdır. $\sum_k n_{k,j}$, belgedeki toplam kelime sayısıdır [10]

Belgelerde TF değeri yüksek olan kelimeler önemli kabul edilir [11].

IDF, belgelerde sıkça geçen kelimelere daha düşük ağırlık, nadiren geçen kelimelere ise daha yüksek ağırlık veren bir kriterdir [11]. Matematiksel ifadesi Denklem 2'de gösterilmiştir.

$IDF_{ij}=\log\frac{|D|}{|d_j \in D: t_j \in d_j|}$ (2)

Denklem 2'de, |D| toplam belge sayısını temsil eder ve $|d_j \in D : t_j \in d_j|$ anahtar kelime t_j 'nin geçtiği belge sayısını temsil eder [10]. IDF, belgede belirli kelimelerin geçme sıklığını ifade etmek ve anahtar kelimelerin önemini ölçmek için kullanılır[10].

Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen matematiksel ifadelerin birlikte kullanılması sonucunda, Denklem 3'te verilen TF-IDF kriteri elde edilir.

TF-IDF=TF * IDF (3)

Denklem 3'te verilen TF-IDF kriteri, metin madenciliği, bilgi erişim ve metin sınıflandırma gibi çeşitli alanlarda belgelerdeki önemli kelimeleri belirlemek için tercih edilir [10].

Bu süreç, veri işleme ve analiz görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fonksiyonunun Kullanılması

Bulanık mantık, net sınırları olan klasik kontrol stratejisinin aksine, belirsiz veya aralıklı değerlerle çalışan bir yaklaşım sunar [12]. Her üyelik fonksiyonunun (üçgen, trapez, Gauss vb.) kapsamında farklı yanıtlar üreten bu yapı, doğrusal olmayan sistemleri kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır [13]. Bu çalışmada Kod 1'de verilen fonksiyon kullanılmıştır.

Kod 1

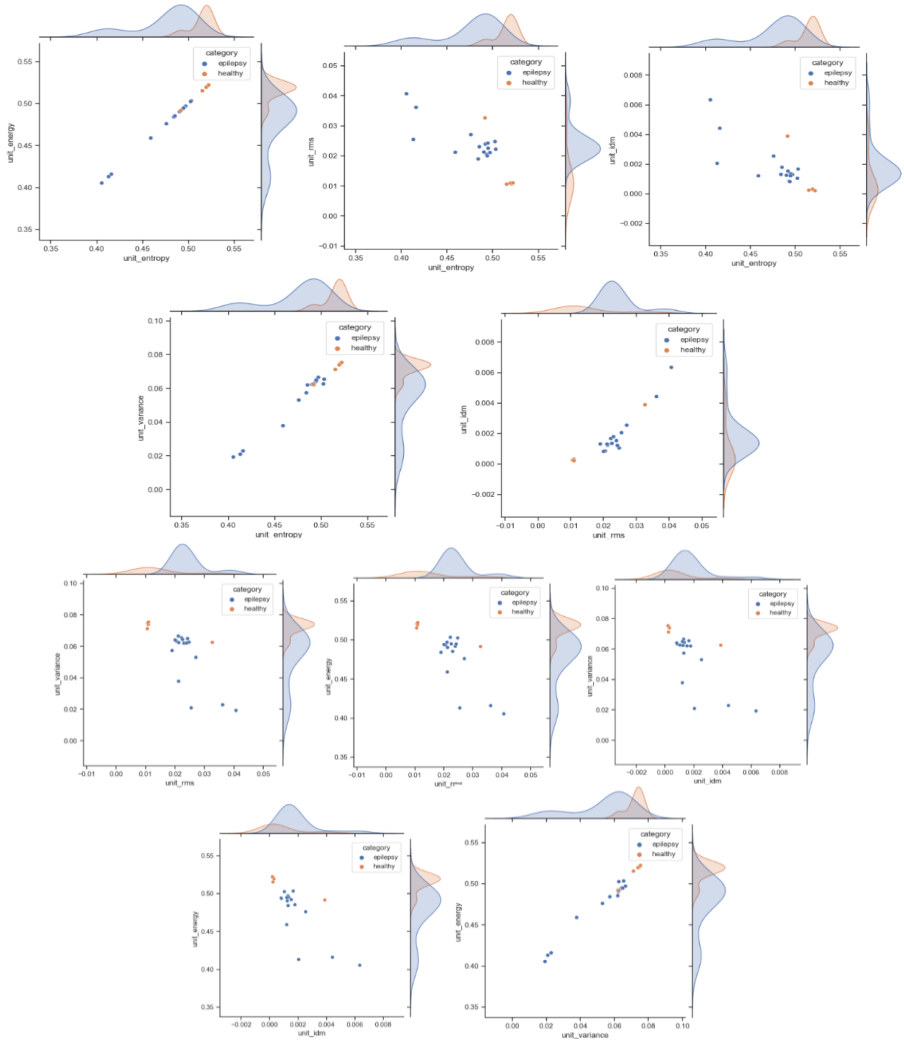
```
def gaussian_membership(x, c, theta):
    return np.exp(-((x - c)**2) / (2 * theta**2))
```

İstatistiksel Ölçülerle Etkili Özelliklerin Çıkarılması

Gerçek eşleme tekniği kullanılarak dijitalleştirilen DNA dizilerindeki her bir organik bazın TF-IDF değerleri hesaplandıktan sonra, ağırlıklı çarpma ile yeni bir dizi elde edilir. Ardından, Gauss üyelik fonksiyonu kullanılarak dizinin bulanık kümeye ait olma derecesi hesaplanır. Sonuç olarak, epilepsi ve diğer kategorilerin analizi için değiştirilmiş DNA dizileri elde edilir. Bu çalışmada, modifiye edilen DNA dizilerinden epilepsi ve sağlıklı kategorilerle ilgili başarılı çıkarımlar yapmak için istatistiksel doku analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu doğrultuda her DNA dizisi için hesaplanan entropi, kök ortalama kare, ters fark moment, varyans ve enerji özellikleri DNA dizisinin uzunluğuna bölünmüştür. Böylece, elde edilen birim değerler kullanılarak her DNA dizisi için hesaplanan uyarlanabilir çıktılarla DNA uzunluğundan bağımsız ve tutarlı değerlendirmeler yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, güçlü bir karar destek sistemi oluşturmak için elde edilen uyarlanabilir birim istatistik kriterleri çerçevesinde biyolojik verilerle ilgili özellikler arasında kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. NCBI veri kümesinden elde edilen ve Tablo 1'de ayrıntılı olarak açıklanan verilere dört temel aşama uygulandıktan sonra, elde edilen ikili birim istatistiksel ölçümlerin dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. NCBI veri setinden elde edilen epilepsi ve sağlıklı kategorilerine ait verilerin istatistiksel doku özelliklerine ilişkin dağılımın incelenmesi

Şekil 1'de verilen grafikler incelendiğinde, birim entropi, birim kök ortalama karesi, birim ters fark moment, birim varyans ve birim enerji

özelliklerine ilişkin kombinasyonların kategorileri ayırt etmede belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Güçlü bir genetik bileşene sahip karmaşık hastalıkların neden olduğu bilimsel zorluklar arasında önemli bir işlev bulunmaktadır. Bu işlev, nadir ve yaygın genetik varyantların rolünü ortaya çıkarmaktır. Bu doğrultuda, epilepsi ve epilepsi dışı sağlıklı DNA dizilerindeki genetik bilginin biyolojik ve klinik anlamını ortaya çıkarmak için yeni bir metodoloji sunulmuştur. Sunulan metodoloji, veri türlerinin ayrımında tatmin edici bir başarı sunmuştur.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmaya katkılarından dolayı bir yapay zeka dil modeli olan ChatGPT'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

[1] A. D. Shevlyakov et al., “Forward Genetics-Based Approaches to Understanding the Systems Biology and Molecular Mechanisms of Epilepsy,” Mar. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ijms24065280.

[2] C. Rastin, L. C. Schenkel, and B. Sadikovic, “Complexity in Genetic Epilepsies: A Comprehensive Review,” Oct. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ijms241914606.

[3] P. Perucca, M. Bahlo, and S. F. Berkovic, “The Genetics of Epilepsy,” 2020, doi: 10.1146/annurev-genom-120219.

[4] C. W. Habela, K. Schatz, and S. A. Kelley, “Genetic Testing in Epilepsy: Improving Outcomes and Informing Gaps in Research,” 2024, SAGE Publications Ltd. doi: 10.1177/15357597241232881.
[5] Alberts B, Johnson A, and et al Lewis J, Molecular Biology of the Cell - Ion Channels and the Electrical Properties of Membranes., 4th edition. New York, 2022.
[6] A. Orsini, F. Zara, and P. Striano, “Recent advances in epilepsy genetics,” Feb. 22, 2018, Elsevier Ireland Ltd. doi: 10.1016/j.neulet.2017.05.014.
[7] F. Akalin, B. Mühendisliği, A. Dalı, and B. Dalı, “SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DOKTORA TEZİ SAYISAL HARİTALAMA TEKNİKLERİ KULLANILARAK DNA DİZİLİMLERİ ÜZERİNDEN LÖSEMİ HASTALIĞININ TEMEL TÜRLERİNİN YAPAY ZEKA TABANLI ALGORİTMALAR İLE SINIFLANDIRILMASI.”
[8] “NCBI (National Center for Biotechnology Information).” https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/
[9] F. Akalin and N. Yumuşak, “Classification of exon and intron regions obtained using digital signal processing techniques on the DNA genome sequencing with EfficientNetB7 architecture,” Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 37, no. 3, pp. 1355–1371, 2022, doi: 10.17341/gazimmfd.900987.
[10] S. W. Kim and J. M. Gil, “Research paper classification systems based on TF-IDF and LDA schemes,” Human-centric Computing and Information Sciences, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1186/s13673-019-0192-7.
[11] S. Qaiser and R. Ali, “Text Mining: Use of TF-IDF to Examine the Relevance of Words to Documents,” Int J Comput Appl, vol. 181, no. 1, pp. 25–29, Jul. 2018, doi: 10.5120/ijca2018917395.
[12] G. D’Aniello, “Fuzzy logic for situation awareness: a systematic review,” J Ambient Intell Humaniz Comput, vol. 14, no. 4, pp. 4419–4438, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12652-023-04560-6.
[13] A. Varshney and V. Goyal, “Re-evaluation on fuzzy logic controlled system by optimizing the membership functions.” [Online]. Available: https://www.scencedrect.com/scence/artcle/p/S2214785323018710?casa_token=UMQAvcmlI8UAAAAA:s0wlgoELougbvE1d109898eLNmz3

Genetik Testlerdeki Olası Belirsizlik Sorunun Aşılması için Biyolojik Belirteçler Arasındaki İlişkinin Analizi

Fatma AKALIN[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversite, Türkiye
[*](fatmaakalin@sakarya.edu.tr)

ÖZET

Son yıllarda veri miktarında muazzam bir artış olmuştur. Bu artış, verilerin analizini daha karmaşık bir hale getirmiştir. Her bir veri türünün analizi, genellikle uygun anlamı yakalamak ve başarılı ilişkiler kurmak için geleneksel özel yöntemlerle ilişkilendirilir. Bununla birlikte farklı perspektiflerden daha kapsamlı içgörüler sağlamamız mümkündür. Geleneksel yaklaşımların üstesinden gelerek yenilikçi çözümler sunmayı mümkün kılar. Böylece, çeşitli yöntemlere uyarlanmış farklı veri türleri için analiz süreci hızlanır ve etkili verimlilik elde edilir. Bu çalışmada epilepsi hastalığı kapsamlı ve etkili çözümler sunmak üzere bir metodoloji sunulmuştur. Çünkü epilepside tek bir genetik nedeni belirlemek zordur. Aslında, genetik testler yeni tanı ve izleme yöntemlerinin geliştirilmesinde ve hastalık yönetiminin sağlanmasında biyobelirteç olarak kullanılma gücüne sahiptir. Ancak, genetik testler genomu tüm karmaşıklığıyla tarama esnekliğine sahip değildir. Bu nedenle, belirsiz genetik testlerin sonuçlarını değerlendirmek için sınırların aşılması ve yeni genelleştirilebilir yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Ensemble gen bankasından elde edilen ve epilepsi oluşumunu farklı şekilde etkileyen gen verileri incelenmiştir. Çalışma bulguları, biyolojik veriler arasında kalıplar ve modeller bulma, biyolojik süreçleri modelleme ve stratejik kararlar alma açısından değerli çıkarımlar elde edildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Biyolojik Süreçlerin Modellenmesi, Biyolojik Veriler Arasında Kalıpların Tespit Edilmesi, DNA Dizilimleri.

GİRİŞ

Epilepsinin tek bir genetik nedenini belirlemek zordur. Çünkü aynı hastalık, birkaç farklı genetik varyant veya gen tarafından neden olabilir. Örneğin, Dravet sendromu SCN1A geninin varyantları tarafından neden olur. Öte yandan, sadece kadınlarda görülen GABRA1, STXBP1, PCDH19 genleri ile de ilişkilidir. Farklı genetik nedenlerin aynı hastalığa yol açabileceği genetik heterojenliğin aksine fenotipik heterojenlik, aynı genin veya aynı genin çeşitli varyantlarının birey üzerinde farklı klinik sonuçlara yol açması olarak açıklanır [1].

Son yıllarda giderek hassaslaşan manyetik rezonans görüntüleme ile epilepsi nedenlerinin anlaşılmasında ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, çoğu durumda altta yatan nedenler hala belirsizdir. Bununla birlikte, genetik faktörler aracılığıyla yapılan analizler, epilepsinin belirli formları nasıl etkileyebileceğine dair yeni bilgiler sunmaktadır. Bu, epilepsi üzerindeki karmaşık etkileri anlamada daha kapsamlı bir bakış açısı sağlamaktadır [2].

Son 20 yılda genetik testlerin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir [4]. Genetik testlere erişimin artması ve yaygın kullanımı, epilepsinin analizini kolaylaştırmıştır [1][4].

Epilepsi testi için kullanılan teknolojiler arasında, DNA'daki önemli yapısal varyasyonları tespit etmek için kromozomal mikroarrayler (CMA'lar), yaygın varyasyonları yakalamak için tek nükleotid polimorfizmi (SNP) dizi verileri [5], yeni nesil dizileme (NGS), tüm ekson dizileme (WES) ve tüm genom dizileme (WGS) bulunmaktadır. Daha fazla genetik varyantı tespit etmek ve genler tarafından kodlanan proteinlerin işlevlerindeki değişkenliği ortaya çıkarmak, epilepsiyi teşhis etmek ve yönetmek için değerlidir. Ancak, birçok sınırlama da vardır [1]. Örneğin, NGS testi ekson bölgelerini ve bu bölgelerin çevresindeki kısa intronları tarar. Derin promotör veya intronik bölgelerdeki varyantlar ve tekrarlanan DNA dizileri tespit edilemez. Öte yandan, WGS ve WES testleri, yeni varyantların yorumlanması ve yönetimi ile ilgili bilgilerden yoksundur. Aslında, genetik testler yeni tanı ve izleme yöntemlerinin geliştirilmesinde ve hastalık yönetiminin sağlanmasında biyobelirteç olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, zaman içinde sağlık hizmetlerinin genel maliyetini düşürme gücüne de sahiptir [1]. Ancak, tüm genetik teknikler genomun tüm karmaşıklığını tarama esnekliğine sahip değildir [3]. Bu nedenle, sınırları aşmak ve belirsiz genetik testlerin sonuçlarını değerlendirmek için yeni yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma da önerilen metodolojinin potansiyelini, esnekliğini ve performansını ortaya çıkarmak için bir analiz gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, Ensembl gen bankasından veri kümesi tedarik edilmiştir. Bu kısımda farklı nükleotid uzunluklarına sahip genleri seçerek nükleotid uzunluğundan bağımsız bir çalışmanın yürütülmesi hedeflenmiştir. Esnek modelleme ve genişletilebilir bir çerçeve sunan bu çalışma ile, biyolojik verilerin tanımlanması için değişkenler arasında anlamlı bir ilişkinin elde edilmesi hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Veri Kümesi

[5] numaralı çalışmada, epilepsi ile ilişkili 900'den fazla gen olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, Ensemble veri setinde insan CCDS kümesindeki protein kodlayan gen üyeleri kullanılmıştır. Epilepsi ve sağlıklı olarak tanımlanan gen yapılarının açıklaması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ensemble gen bankasından elde edilen DNA dizileri [6]

Gene	CCDS	Uzunluk	Category
ARX ENSG00000004848	CCDS14215	1689	Epilepsy
BRD7 ENSG00000166164	CCDS10742	1956	Epilepsy
BRD7 ENSG00000166164	CCDS54007	1959	Epilepsy
CACNA1H ENSG00000196557	CCDS45375	7062	Epilepsy
CACNA1H ENSG00000196557	CCDS45376	7044	Epilepsy
CLCN2 ENSG00000114859	CCDS3263	2697	Epilepsy
CLCN2 ENSG00000114859	CCDS54690	2565	Epilepsy
CLCN2 ENSG00000114859	CCDS54691	2646	Epilepsy
CLCN2 ENSG00000114859	CCDS54692	2610	Epilepsy
CNTN2 ENSG00000184144	CCDS1449	3123	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS43006	4719	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS43007	1680	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS46692	4785	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS56229	4512	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS74849	4812	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS87017	4746	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS87018	4578	Epilepsy
DEPDC5 ENSG00000100150	CCDS93151	4728	Epilepsy
GABRA1 ENSG00000022355	CCDS4357	1371	Epilepsy
HEATR3 ENSG00000155393	CCDS10739	2043	Epilepsy
NPRL3 ENSG00000103148	CCDS73794	1635	Epilepsy
NPRL3 ENSG00000103148	CCDS73795	1710	Epilepsy
PIGQ ENSG00000007541	CCDS10411	2283	Epilepsy
PIGQ ENSG00000007541	CCDS10412	1746	Epilepsy
PRICKLE1 ENSG00000139174	CCDS8742	2496	Epilepsy
RORB ENSG00000198963	CCDS6646	1380	Epilepsy
RORB ENSG00000198963	CCDS94422	1413	Epilepsy
SETD1A ENSG00000099381	CCDS32435	5124	Epilepsy
SLC12A5 ENSG00000124140	CCDS13391	3351	Epilepsy
SLC12A5 ENSG00000124140	CCDS46610	3420	Epilepsy
SNIP1 ENSG00000163877	CCDS419	1191	Epilepsy
SYN1 ENSG00000008056	CCDS14280	2118	Epilepsy
SYN1 ENSG00000008056	CCDS35233	2010	Epilepsy
ABCG2 ENSG00000118777	**CCDS3628**	**1968**	**Healthy**
ABCG2 ENSG00000118777	**CCDS58910**	**1836**	**Healthy**
CD2 ENSG00000116824	**CCDS889**	**1056**	**Healthy**
CLIC5 ENSG00000112782	**CCDS4914**	**756**	**Healthy**
CLIC5 ENSG00000112782	**CCDS47438**	**1233**	**Healthy**
CLIC5 ENSG00000112782	**CCDS59022**	**618**	**Healthy**
DST ENSG00000151914	**CCDS4959**	**7950**	**Healthy**
GABPA ENSG00000154727	**CCDS13575**	**1365**	**Healthy**
HGF ENSG00000019991	**CCDS5597**	**2187**	**Healthy**
HGF ENSG00000019991	**CCDS47626**	**2172**	**Healthy**
HGF ENSG00000019991	**CCDS47627**	**873**	**Healthy**
HGF ENSG00000019991	**CCDS47628**	**858**	**Healthy**
HGF ENSG00000019991	**CCDS47629**	**633**	**Healthy**
MED27 ENSG00000160563	**CCDS6945**	**936**	**Healthy**
MED27 ENSG00000160563	**CCDS59153**	**828**	**Healthy**
MED27 ENSG00000160563	**CCDS69689**	**393**	**Healthy**

MFN1 ENSG00000171109	**CCDS3228**	**2226**	**Healthy**
NTNG2 ENSG00000196358	**CCDS6946**	**1593**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS6671**	**2517**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS35050**	**2469**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS35051**	**1662**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS35052**	**1614**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS35053**	**1434**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS94427**	**2433**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS94428**	**1395**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS94429**	**966**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS94430**	**2049**	**Healthy**
NTRK2 ENSG00000148053	**CCDS94431**	**2001**	**Healthy**
PTGFRN ENSG00000134247	**CCDS890**	**2640**	**Healthy**
RUNX2 ENSG00000124813	**CCDS4913**	**1524**	**Healthy**
RUNX2 ENSG00000124813	**CCDS43467**	**1566**	**Healthy**
RUNX2 ENSG00000124813	**CCDS43468**	**1500**	**Healthy**
RUNX2 ENSG00000124813	**CCDS64443**	**1458**	**Healthy**
SLC28A3 ENSG00000197506	**CCDS6670**	**2076**	**Healthy**
SV2B ENSG00000185518	**CCDS10370**	**2052**	**Healthy**
SV2B ENSG00000185518	**CCDS53972**	**1599**	**Healthy**
ZNF639 ENSG00000121864	**CCDS3227**	**1458**	**Healthy**

Tablo 1'de sunulan epilepsi kategorisi sekansları, Ensemble veri setinin arama motoruna epilepsi (tür: insan) ifadesini yazarak açılan sayfada "Epilepsi ile ilişkili lokuslar (EFO:0000474)" başlığı altında sunulmaktadır. Bu sonuçlar, "Fenotip/Hastalık/Özellik" alt başlığı altında epilepsi ile ilişkili örneklerdir. Bu örnekler arasında voltaj kontrollü iyon kanalının alt birimini kodlayan gen dizileri, ligand kontrollü iyon kanalları arasında GABAA reseptör alt birimini kodlayan gen dizileri veya X kromozomuna bağlı resesif şekilde kalıtsal olan gen dizileri bulunmaktadır. Genelleştirilebilir bir model oluşturmak için, Tablo 1'in gen sütunundaki tanımlayıcı aracılığıyla farklı işlevlere sahip DNA dizilerini seçerek oluşturulan veri kümesindeki her bir dizinin ayrıntılarına erişmek mümkündür. Öte yandan, Tablo 1'deki sağlıklı kategorideki genler, epilepsi kategorisiyle ilişkili olmayan genlerdir.

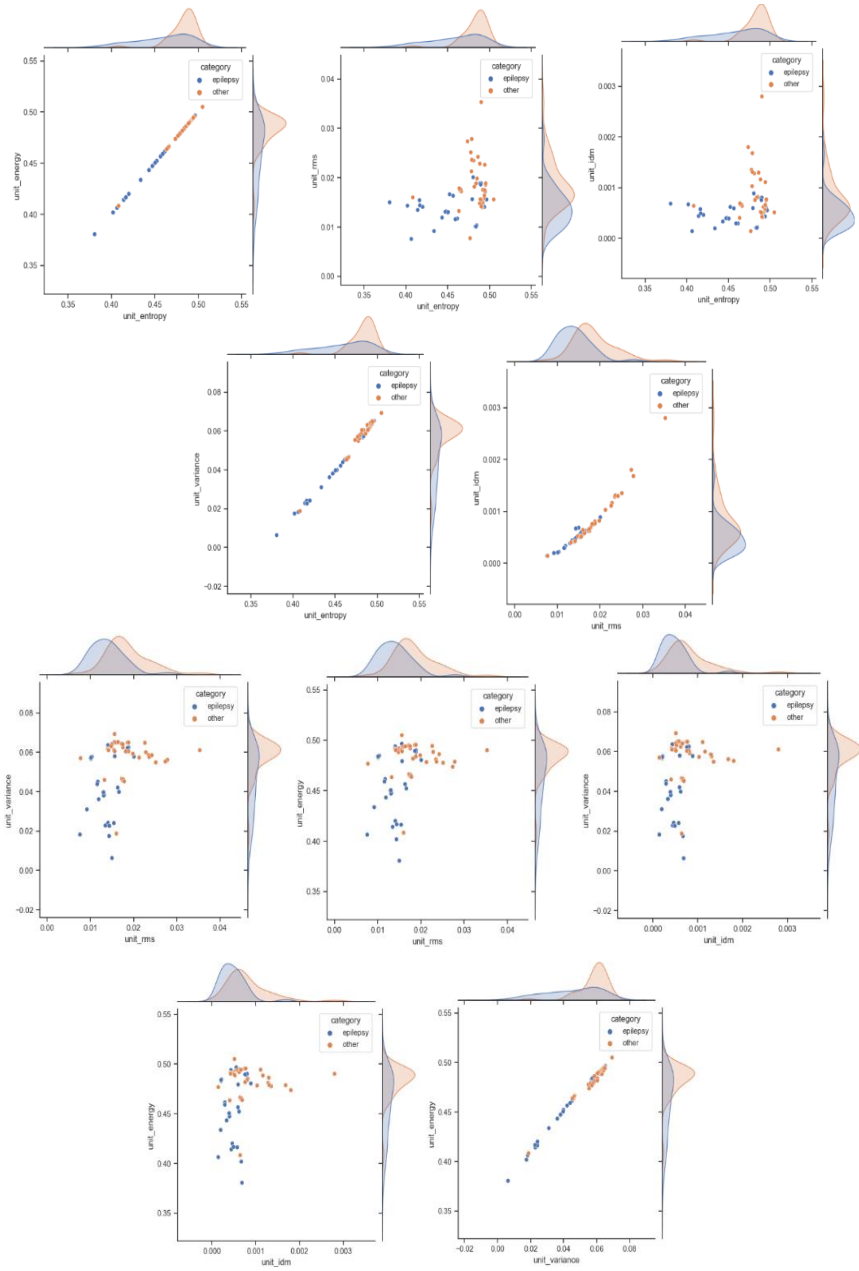
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Ensemble veri setinden elde edilen verilere aşağıdaki aşamalar uygulanmıştır. Bu aşamalara ilişkin kaba kod Kod 1'de verilmiştir.

Kod 1:

1- Veri setini oluşturmak
2- DNA dizilimlerini sayısallaştırmak
3- Her bir organik baza ilişkin TF-IDF ağırlıklarını hesaplamak
4- Sayısallaştırılan değerleri TF-IDF ağırlıkları ile çarpmak ve güncel listeyi oluşturmak
5- Güncel listenin ortalamasını bulmak
6- Güncel listenin standart sapmasını bulmak
7- "Güncel liste", "ortalama" ve "standart sapma" parametrelerini girdi olarak alan ve ardından bunları membership_value listesine atayan üyelik fonksiyonu ile belirsiz ve karmaşık sistemlerin modellemek
8- membership_value listesindeki entropi, kök ortalama kare, ters farklı moment, varyans ve enerji istatistiksel doku özelliklerini hesaplamak
9- Elde edilen özellikleri nükleotit uzunluğuna bölmek
10- Dağılım ve ilişkiyi görselleştirmek
11- Değerlendirme sağlamak

Ensemble veri setlerinden elde edilen ve Tablo 1'de ayrıntılı olarak açıklanan verilere Kod 1'de verilen aşamalar uygulandıktan sonra analiz edilen istatistiksel ölçümlerin dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ensemble veri setinden elde edilen epilepsi ve sağlıklı kategorilerine ait verilerin istatistiksel doku özelliklerine ilişkin dağılımının incelenmesi

Şekil 1'de verilen grafikler incelendiğinde ikili değişkenler arasında en yakın ilişki enerji ve entropi özellikleri arasında gözlemlenirken, en uzak ilişki kök ortalama karesi ve ters fark moment özellikleri arasında gözlemlenmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışma genetik varyasyonları tespit etmeyi, genetik bağlantıları incelemeyi ve fonksiyonel kalıpları tanımlamayı içermektedir. Bu metodoloji ile DNA verilerinden elde edilen istatistiksel doku özellikleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin sonucunda, biyolojik verilere dayalı yüksek performanslı bir tanı süreci geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmaya katkılarından dolayı bir yapay zeka dil modeli olan ChatGPT'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

[1] C. Rastin, L. C. Schenkel, and B. Sadikovic, “Complexity in Genetic Epilepsies: A Comprehensive Review,” Oct. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ijms241914606.

[2] P. Perucca, M. Bahlo, and S. F. Berkovic, “The Genetics of Epilepsy,” 2020, doi: 10.1146/annurev-genom-120219.

[3] A. Orsini, F. Zara, and P. Striano, “Recent advances in epilepsy genetics,” Feb. 22, 2018, Elsevier Ireland Ltd. doi: 10.1016/j.neulet.2017.05.014.

[4] M. W. Zhang et al., “Epilepsy-associated genes: an update,” Seizure, vol. 116, pp. 4–13, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.seizure.2023.09.021.

[5] R. Zeibich, P. Kwan, T. J. O’Brien, P. Perucca, Z. Ge, and A. Anderson, “Applications for Deep Learning in Epilepsy Genetic Research,” Oct. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ijms241914645.A. Karnik, “Performance of TCP congestion control with rate feedback: TCP/ABR and rate adaptive TCP/IP,” M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.

[6] “Ensemble.”, https://www.ensembl.org/index.html.

Biyolojik Veri Analizinde Hesaplamalı Bir Yaklaşım

Fatma AKALIN[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversite, Türkiye
[*](fatmaakalin@sakarya.edu.tr)

ÖZET

Genom teknolojisindeki son gelişmeler, DNA dizileriyle ilgili veri sayısında bir artışa neden olmuştur. Bu artışın bir sonucu olarak, manuel analiz vasıtasıyla verilerin doğru ve hızlı bir şekilde yorumlanması zorlaşmıştır. Bu nedenle, bilgisayar tabanlı karar destek sistemleri ile verileri etkili bir şekilde işlemek ve doğru sonuçlar elde etmek gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, gen keşfi, genom analizi, yeni nesil dizileme ve yüksek verimli ilaç taraması vb. alanlarında çalışan biyoenformatik bilim dalı ile biyolojik veri analizi planlanmıştır. Bu doğrultuda analiz uygulamaları için verimli, güvenilir ve hızlı sonuçlar elde etmeyi mümkün kılan doku analizi yaklaşımı, biyoenformatik analiz uygulamalarında kullanılmak üzere araştırılmıştır. Geleneksel kullanımların ötesinde yenilikçi çözümler öneren bir metodoloji sunulmuştur. Bu metodoloji farklı perspektifler çerçevesinde daha kapsamlı ve esnek içgörüler sağlamayı planlamaktadır. Böylece DNA verilerinden elde edilen istatistiksel doku özellikleri, kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda, biyolojik verilere dayalı yüksek performanslı bir tanı süreci sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler – DNA Dizilimleri, Biyolojik Veri Analizi, Bilgisayar Tabanlı Karar Destek Sistemleri.

GİRİŞ

Epilepsi hastalığını epileptik olmayan sağlıklı DNA dizilerinden ayırmayı amaçlayan bu araştırma, genetik çeşitliliğin incelenmesini mümkün kılmaktadır. Bu alandaki son gelişmeler incelendiğinde, sekanslama teknolojisinin insan hastalıklarını, bunların kökenlerini ve evrimini anlamak için genetik varyasyonu sistematik olarak düzenlediği ve tanımladığı görülmektedir. Ayrıca, üretilen veriler kapsamında kaliteli bir analiz sağlamak için birçok hesaplama adımı gerekmektedir [1]. Bu bağlamda, makine öğrenimi, genomik verilerin işlenmesi için dizileme verileriyle ilgili yöntem ve araçların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Makine öğrenimi, girdiler arasındaki kalıpları ve ilişkileri keşfetmek için istatistiksel algoritmalar kullanan bir alandır. Makine öğrenimi, derin öğrenmeyi de içerir. Biyolojik sinir sisteminden esinlenen derin öğrenme, büyük miktarda veriyi işleyerek karmaşık kalıpları ve ilişkileri elde etmeyi mümkün kılar. Makine öğrenimi ve derin öğrenme, epilepsinin tespitinde kullanılan yaklaşımlardır [2].

Bu bağlamda, genetik varyasyonları keşfetmek ve genetik yapıyı ayrıntılı olarak analiz etmek için [1] çalışmasında 5 aşamalı bir süreç geliştirilmiştir. Bu süreçler sırasıyla İlk Okuma Eşleme, Indeller Etrafında Yerel Yeniden Hizalama, Baz Kalite Puanı Yeniden Kalibrasyonu, SNP Keşfi ve Genotipleme ve Makine Artefaktlarından Gerçek Ayrışma Varyasyonunu Ayırmak için Makine Öğrenimidir. Bu 5 adımlı sürecin sonucunda yüksek

kaliteli varyant çağrıları elde edildiği belirtilmiştir. [3] çalışmasında, hızla gelişen sekanslama teknolojileri kullanılarak elde edilen verilerde kısa ve hatalı sekans okumalarıyla bireyin genomundaki genetik varyasyonları tespit etmenin zor olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, bir tür makine öğrenimi algoritması olan derin evrişimli sinir ağları yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece, varyantların etrafındaki okuma yığınlarını ve bu verilerle ilişkili doğru genotip çağrılarını analiz ederek istatistiksel ilişkilerin öğrenildiği belirtilmiştir. Çalışma [4], genetik varyasyonları tanımlamak için derin sinir ağlarına dayalı yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu derin sinir ağı tabanlı yaklaşımda, görüntü tanıma yerine sekanslama verilerinin yapısal özelliklerini dikkate almak üzere geliştirilen derin sinir ağı mimarileri ve varyant çıkarım fonksiyonları önerilmiştir. Çalışmanın varyant belirleme doğruluğunu artırdığı belirtilmiştir. Hızlı ve doğru varyant belirleme araştırma ve klinik uygulamalar için önemli olduğundan, çalışma [5] küçük varyantları hızlı ve doğru bir şekilde tanımlamak için Clair sistemi önermiştir. Clair, tekrarlayan sinir ağı mimarisidir. Clair, hizalanmış bir formatta dizileme verilerini alarak olası varyantları tespit eder. Ardından, bu varyantların etrafındaki bazları içeren verileri işler. Geleneksel hedefli dizileme yöntemleri nanopore dizilemenin avantajlarını ortadan kaldırdığı için, çalışma [6] nanopore akım sinyallerini referans dizisiyle hızlı bir şekilde eşleştiren UNCALLED adlı açık kaynaklı bir eşleştirici sunmuştur. Bu yaklaşım, K-merleri olasılık açısından değerlendirir ve Ferragina–Manzini indeksine göre eleme yapar. UNCALLED'ın tek nükleotid polimorfizmlerini (SNV'ler), eklemeleri ve silmeleri, yapısal varyantları ve metilasyonu doğru bir şekilde tespit edebildiği belirtilmiştir. Çalışma [7], Yeni Nesil Dizileme deneylerinde tanımlanan genomik varyantları kullanarak gen, yolak, alan ve protein-protein etkileşimi verilerini birleştirmek için bir veri füzyon hiyerarşisi geliştirmiştir. Bu hiyerarşi, mutasyon yüklerini hesaplamak için genleri, yolakları, alanları ve protein-protein etkileşimlerini (4 ROI) içermektedir. ROI-fenotip ilişkileri incelenmiştir ve ardından ROI türleri birleştirilerek veri setleri oluşturulmuştur. Son aşamada, model Random Forest orman algoritması ile 85 epilepsi ve 61 sağlıklı bireyden oluşan bir veri seti üzerinde test edilmiştir. Çalışma sonucunda, epilepsi tiplerinde ortak genetik faktörlerin olduğu hipotezinin desteklendiği belirtilmiştir. Çalışma [8], derin öğrenme tabanlı çalışmaların genelleştirilebilirliğinin düşük olduğunu, çünkü bunların biyolojik dizi sınıflandırması ve dizi motifi tespiti alanındaki belirli bir sorun için optimize edildiğini belirtmiştir. Bu nedenle, dizi motiflerini tespit etmek ve biyolojik dizi verilerini otomatik olarak sınıflandırmak için, değişken sayıda yoğun katmandan oluşan bir ağ mimarisi, ardından değişken sayıda evrişimli ve maksimum havuzlama katmanı ve otomatik hiperparametre optimizasyon prosedürü sunulmuştur. Bu çalışmanın RNA dizileri için ikincil yapı tahmin bilgilerini de içerebileceği belirtilmiştir. Son yıllarda yapılan bu çalışmalar, makine öğrenimi ve derin öğrenme yaklaşımlarının

biyolojik süreçleri anlamlandırmada önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, derin öğrenme tabanlı çalışmalar, veri miktarı fazla olduğunda en iyi sonucu vermektedir [2]. Aksi takdirde, derin öğrenme yaklaşımının kullanılması, veri sayısının yetersizliği nedeniyle aşırı uyuma neden olacaktır. Uygulama gerekliliği nedeniyle, harcanan zaman ve maliyet artacaktır. Makine öğrenimi algoritmalarına göre kara kutu yaklaşımı benimsendiğinden, anlaşılabilirlik ve yorumlanabilirlik olumsuz etkilenecektir [2]. Biyoloji için kapsamlı, genelleştirilebilir ve kullanıcı dostu bir derin öğrenme kütüphanesi de bulunmamaktadır [45]. Biyolojik dizi sınıflandırması ve dizi motifi tespiti için yeniden kullanılabilirlik düşüktür. Belirli bir sorun için optimize edildiğinden genelleştirilebilirlik düşüktür [8].

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Veri Kümesi

Epilepsi ve sağlıklı kategorilerine ilişkin bir sınıflandırma yapmak amacıyla NCBI veri kümesi kullanılmıştır. Bu doğrultuda sırasıyla HW383596.1, HW383595.1, HW383594.1, HW383592.1, HW383591.1, HW383590.1, HW383589.1, HW383588.1, HW383587.1, HW383586.1, HW383585.1, HW383575.1, HW383584.1, HW383583.1, HW383582.1, HW383581.1, HE995533.1, GQ335533.1, GQ335532.1, GQ335531.1, GQ335530.1, GQ335529.1 erişim numaralarına sahip farklı uzunluklarda 16 adet Epilepsi ve 6 adet Sağlıklı kategorilerine sahip toplam 22 adet veri temin edilmiştir [9].

B. Metodoloji

Bu çalışma, NCBI kamu veri setinden elde edilen epilepsi hastalığı ile ilişkili DNA yapılarını sağlıklı yapılardan ayırt etmek için yeni bir metodoloji sunmaktadır. Bu doğrultuda, aşamalar sırasıyla aşağıda sunulmaktadır.

1- Kategorik Verilerin Dijitalleştirilmesi

Sabit haritalama teknikleri arasında yer alan gerçek haritalama tekniği, DNA dizisindeki organik bazlar A, T, G ve C'ye -1,5, 1,5, -0,5 ve 0,5 değerlerinin atanmasına olanak tanır [10]. Bu teknikte, organik bazlar A-T ve G-C birbirini tamamlayıcı özelliklere sahiptir. Bu nedenle, DNA dizisinin tamamlayıcı zincirini bulmada etkilidir [11]. Bu, gerçek sayı eşleştirme

tekniği kullanılarak uygulanan tamamlayıcı kodlama şemasının ortalamasının sıfır olmasına ve sapmasının simetrik olmasına yardımcı olur. Gerçek sayı eşleştirme tekniğinin bu özellikleri veri eğitimi ve özellik öğrenimi için yararlı olduğundan, DNA dizilerini etkili bir şekilde analiz edebilir ve modelleyebilir [12]. Bir örnek DNA dizisi üzerinde gerçek haritalama tekniğine göre ardışık olarak dizilen nükleotidlerin sayısallaştırılması Tablo 1'te gösterilmektedir.

Tablo 1. Gerçek haritalama tekniğine göre sayısallaştırılmış DNA dizisi örneği

DNA dizilimi	… ATCGATGCAC …
Gerçek Haritalama Tekniği	… -1.5, 1.5, 0.5, -0.5, -1.5, 1.5, -0.5, 0.5, -1.5, 0.5…

Biyoinformatik ve genetik araştırmalarda, tamamlayıcı kodlama şemaları ve simetrik özellikler, verilerin etkili bir şekilde işlenmesi ve analiz edilmesinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle, gerçek haritalama tekniği kullanılarak sayısallaştırılan dizilerin biyolojik ilişkilerinin anlaşılmasında yararlı olması beklenmektedir.

2- TF-IDF (Terim Sıklığı ve Ters Belge Sıklığı) Ağırlıklarının Hesaplanması

Genetik alanında dijitalleştirilen DNA dizilerine TF-IDF yöntemi uygulanarak her bir organik bazın TF-IDF ağırlık hesaplaması yapılmıştır. Daha sonra, DNA dizilerindeki organik bazlara karşılık gelen sayısallaştırılmış değerler, her bir organik bazın TF-IDF ağırlığı ile çarpılmıştır. Böylece, modifiye edilmiş bir DNA dizisi oluşturulmuştur. Bu süreç kapsamında gerçekleştirilen ağırlıklandırma, DNA dizisinin ölçeklendirilmesi için önemlidir. Dizideki bileşenleri vurgulamak veya kısmen göz ardı etmek için tercih edilir. Öte yandan, DNA dizilerine genelleme yeteneği sağlar.

3-Kontrol Kararı Oluşturmak

Gauss, belirli bir bulanık kümeye ait olma derecesini hesaplar. Bulanık Kontrol Sistemleri, Bulanık Mantık ve Karar Verme, Veri Kümeleme, Örüntü Tanıma, Gauss üyelik fonksiyonunun kullanım alanlarına örneklerdir [13], [14], [15]. Gauss üyelik fonksiyonunun çeşitli kullanım alanlarına sahip olması, başarısıyla ilgilidir. Gauss fonksiyonu, girdi değişkenleri arasında yumuşak geçişler sağladığından, girdi değişkenleriyle ilgili belirsizliklerin başarılı bir şekilde modellenmesini mümkün kılar. Ayrıca, bu üyelik fonksiyonu kullanıldığında, veri noktalarının ortalaması ve standart sapması girdi olarak alınır. Bu süreç, merkezi eğilimi ve dağılımı yakalayarak gerçekçi çözümlerin geliştirilmesine olanak tanıdığından, esnek modellerin oluşturulmasını sağlar. Bu çalışmada, sayısallaştırılmış DNA

dizisindeki her bir organik bazın TF-IDF ağırlığı ile çarpılması sonucu elde edilen modifiye edilen DNA dizisi,

```
def gaussian_membership(x, c, theta):
    return np.exp(-((x - c)**2) / (2 * theta**2))
```

fonksiyonuna girdi olarak verilmiştir.

Bu denklemde, x girdi veri noktalarının dizisidir; c girdi veri noktalarının ortalamasıdır ve theta girdi veri noktalarının standart sapmasıdır. Algoritma 1'in çıktısı, dizideki her bir girdi veri noktasının 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecesidir. Bu fonksiyon ile, merkez c etrafındaki Gauss dağılımına dayalı bir üyelik derecesi her x için hesaplanır. Üyelik derecesi, merkez c'ye yakınlığa göre şekillenir. Diğer bir deyişle, merkez c'ye yakın olmak, yüksek üyelik derecesi ile açıklanır. Öte yandan, standart sapma parametresi, üyelik fonksiyonunun şekli ve yayılımı ile ilgilidir. Küçük theta değerleri için dağılım dar ve keskindir. Aksi takdirde, dağılım geniştir.

Algoritma 1'de verilen fonksiyon, farklı uzunluklardaki diziler için uyarlanabilir kontrol kararları alınmasına yardımcı olmak amacıyla, girdi değişkeninin belirli bir bulanık kümeye ne kadar ait olduğunu hesaplar.

4-İstatistiksel Ölçülerin Kullanılması

Bu çalışmada Entropi, RMS, IDM, varyans ve enerji istatistiksel doku analizi yöntemleri kullanılarak biyolojik verilerin karmaşıklığı, homojenliği, varyasyonu ve enerji seviyesi değerlendirilmiştir. Ancak, bu değerlendirme, DNA dizilerinin farklı uzunlukları nedeniyle analitik önyargıya neden olabilir. Bu sınırlama ile ilgili olarak, [16][10][17], [18] makalelerinde, DNA dizilerinin uzunluğuna bağlı bir metodolojinin çıkarım sürecini olumsuz etkilediği belirtilmektedir. Bu sınırlamayı aşmak için, her DNA dizisi için hesaplanan istatistiki ölçüm sonuçları DNA dizisinin uzunluğuna bölünmüştür.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çoklu özelliklerin sınıflandırılması, kalıpları ve ilişkileri analiz ederek dağılımdaki anomalilerin belirlenmesini sağlar. Bu bölümde, çoklu özellikleri değerlendirmek için, NCBI veri setindeki Epilepsi ve Sağlıklı kategorilerini sınıflandırmak için altı temel makine öğrenimi algoritması uygulanmıştır. %75'i eğitim kümesi ve %25'i test kümesi olan bölme işleminden elde edilen deneysel çıktıların performans ölçütleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. NCBI gen bankası tarafından sağlanan eğitim veri seti için ulaşılan performans değerleri.

Makine Öğrenmesi Alg.	Doğruluk Oranı	Hassasiyet	Duyarlılık	Özgüllük	F1 Skoru
Lojistik Regresy.	0.9375	0.9230	1.0	0.75	0.96
KNN	0.9375	0.9230	1.0	0.75	0.96
Karar Ağaçları	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Random Forest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Naive Bayes	0.9375	0.9230	1.0	0.75	0.96
SVM	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tablo 2. NCBI gen bankası tarafından sağlanan test veri seti için ulaşılan performans değerleri.

Makine Öğrenmesi Alg.	Doğruluk Oranı	Hassasiyet	Duyarlılık	Özgüllük	F1 Skoru
Lojistik Regresy.	0.833	0.8	1.0	0.5	0.888
KNN	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Karar Ağaçları	0.833	0.8	1.0	0.5	0.888
Random Forest	0.833	0.8	1.0	0.5	0.888
Naive Bayes	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
SVM (rbf)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tablo 1 ve Tablo 2 incelendiğinde, eğitim ve test veri setleri kapsamında NCBI gen bankasından elde edilen epilepsi ve sağlıklı kategorilerine ait DNA dizilerinden çıkarılan beş ayrı birim istatistiksel doku özelliğinin performansı, sınıflandırmada başarılı bir sonuç vermiştir. Dengesiz veri dağılımına rağmen, RBF çekirdeğine sahip bir SVM algoritması ile %100 doğruluk oranı elde edilmiş ve verilerin uyarlanabilir birim istatistiksel doku özellikleri arasında kalıplar ve tasarımlar etkili bir şekilde keşfedilmiştir. Eğitim ve test seti için elde edilen bu istikrar büyük bir başarıdır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, epilepsi hastalığını sağlıklı, epilepsi olmayan DNA dizilerinden ayırt etmek için bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışma, istatistiksel yöntemlere ve makine öğrenimi yaklaşımlarına dayanmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan veri kümelerindeki bilgilerin büyüklüğü göz önüne alındığında, sunulan metodoloji başarılıdır. Çünkü basittir ve daha az hesaplama gücü gerektirir. Değişkenler arasındaki ilişkiler açıkça gösterildiği için yorumlanabilirlik yüksektir. Bu, sonuçların daha kolay anlaşılmasını sağlar. Modelin karar mekanizması anlaşıldığı için, iyileştirmeler ve ayarlamalar yapmak mümkün hale gelir.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmaya katkılarından dolayı bir yapay zeka dil modeli olan ChatGPT'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

[1] M. A. Depristo et al., “A framework for variation discovery and genotyping using next-generation DNA sequencing data,” Nat Genet, vol. 43, no. 5, pp. 491–501, May 2011, doi: 10.1038/ng.806.

[2] R. Zeibich, P. Kwan, T. J. O’Brien, P. Perucca, Z. Ge, and A. Anderson, “Applications for Deep Learning in Epilepsy Genetic Research,” Oct. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ijms241914645.

[3] R. Poplin et al., “A universal snp and small-indel variant caller using deep neural networks,” Nat Biotechnol, vol. 36, no. 10, p. 983, Nov. 2018, doi: 10.1038/nbt.4235.

[4] A. Ramachandran, S. S. Lumetta, E. W. Klee, and D. Chen, “HELLO: improved neural network architectures and methodologies for small variant calling,” BMC Bioinformatics, vol. 22, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12859-021-04311-4.

[5] R. Luo et al., “Exploring the limit of using a deep neural network on pileup data for germline variant calling,” Nat Mach Intell, vol. 2, no. 4, pp. 220–227, Apr. 2020, doi: 10.1038/s42256-020-0167-4.
[6] S. Kovaka, Y. Fan, B. Ni, W. Timp, and M. C. Schatz, “Targeted nanopore sequencing by real-time mapping of raw electrical signal with UNCALLED,” Nat Biotechnol, vol. 39, no. 4, pp. 431–441, Apr. 2021, doi: 10.1038/s41587-020-0731-9.
[7] S. Marini et al., “A Data Fusion Approach to Enhance Association Study in Epilepsy,” PLoS One, vol. 11, no. 12, Dec. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0164940.
[8] S. Budach and A. Marsico, “Pysster: Classification of biological sequences by learning sequence and structure motifs with convolutional neural networks,” Bioinformatics, vol. 34, no. 17, pp. 3035–3037, Sep. 2018, doi: 10.1093/bioinformatics/bty222.
[9] “NCBI (National Center for Biotechnology Information).” https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/.
[10] F. Akalın and N. Yumuşak, “Classification of ALL and CML malignancies being among the main types of leukaemia with graph neural networks and fuzzy logic algorithm,” Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 38, no. 2, pp. 707–719, 2023, doi: 10.17341/gazimmfd.1022624.
[11] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, and S. A. Abd-Elrahman, “Genomic Analysis and Classification of Exon and Intron Sequences Using DNA Numerical Mapping Techniques,” International Journal of Information Technology and Computer Science, vol. 4, no. 8, pp. 22–36, Jul. 2012, doi: 10.5815/ijitcs.2012.08.03.
[12] N. Yu, Z. Li, and Z. Yu, “Survey on encoding schemes for genomic data representation and feature learning-from signal processing to machine learning,” Big Data Mining and Analytics, vol. 1, no. 3, pp. 191–210, Sep. 2018, doi: 10.26599/BDMA.2018.9020018.
[13] Y. Zhou, Y. Zhu, and W. K. Wong, “Statistical tests for homogeneity of variance for clinical trials and recommendations,” Jun. 01, 2023, Elsevier Inc. doi: 10.1016/j.conctc.2023.101119.
[14] M. H. Azam, S. Hassan, M. hilmi Hasan, and S. J. Abdulkadir, “Fuzzy Type-1 Triangular Membership Function Approximation Using Fuzzy C-Means-2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI),” Oct. 2020.
[15] S. H. Khairuddin, M. H. Hasan, and M. A. Hashmani, “Integration of cluster centers and gaussian distributions in fuzzy c-means for the construction of trapezoidal membership function,” Mathematics and Statistics, vol. 8, no. 5, pp. 559–565, Sep. 2020, doi: 10.13189/ms.2020.080509.
[16] F. Akalin and N. Yumuşak, “Classification of exon and intron regions obtained using digital signal processing techniques on the DNA genome sequencing with EfficientNetB7 architecture,” Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol. 37, no. 3, pp. 1355–1371, 2022, doi: 10.17341/gazimmfd.900987.
[17] F. Akalın and N. Yumuşak, “DETECTION OF EXON AND INTRON REGIONS IN DNA SEQUENCES BY THE PROPOSED HASHING FUNCTION,” 2023.

[18] F. AKALIN and N. YUMUŞAK, “Classification of Exon and Intron Regions on DNA Sequences with Hybrid Use of SBERT and ANFIS Approaches,” Journal of Polytechnic, Mar. 2023, doi: 10.2339/politeknik.1187808.

Uyarlanabilir İstatistiksel Doku Özellikleri ile Biyolojik Veri Analizi

Fatma AKALIN[1*]

[1]Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü / Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversite, Türkiye
[*](fatmaakalin@sakarya.edu.tr)

ÖZET

Doku analizi, görüntü işleme alanında aktif olarak kullanılan bir özellik çıkarma yöntemidir. Dokuyu verimli bir şekilde tanımlamak için kullanılan istatistiksel yöntemler, görüntü doku analizinin en eski yöntemi olarak kabul edilir. Doku analizi; biyomedikal analiz, belge işleme ve uzaktan algılama uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yaratıcı çözümler sunmak ve geleneksel sınırlamaları aşmak için genetik çalışmalara entegre edilmiş istatistiksel doku analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bu süreç, biyolojik verileri hassas ve ayrıntılı bir şekilde analiz etmek, verileri yorumlamak ve yönetmek, objektif sonuçlar üretmek, araştırmayı farklı perspektiflerden ele almak, biyolojik veriler arasında kalıplar bulmak ve biyolojik süreçleri modellemek açısından değerlidir. Bu doğrultuda, başarılı ve etkili özellik çıkarma elde etmek için, modifiye edilmiş DNA dizileri entropi, kök ortalama kare, ters fark moment, varyans ve enerji istatistiksel doku analizi yöntemleri ile uyarlanabilir birim istatistiksel doku özelliklerine dayalı sınıflandırma sağlanmıştır. Çalışma bulguları, makine öğrenimi yaklaşımlarına dayanan bu metodolojinin verileri anlamlandırma ve yönetme, objektif sonuçlar üretme, araştırmaları farklı perspektiflerden ele alma konusunda başarılı olduğuna işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler – Biyolojik Veri Analizi, İstatistiksel Doku Analiz Yöntemleri, Uyarlanabilir İstatistiksel Doku Özellikleri, Klasik Makine Öğrenmesi Algoritmaları.

GİRİŞ

Bu çalışmada geçmişten günümüze epilepsi araştırmaları irdelenmiş ve bir metodoloji sunulmuştur. Bu doğrultuda, çalışmada çocukluk çağı epilepsisi ve genetik tanı etkinliği karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır [1]. Bu retrospektif kohort çalışmasında, kaydedilmiş fenotip ve genotip bilgilerine sahip örnekler arasında grup içi karşılaştırmalar için standart parametrik ve parametrik olmayan istatistiksel testler kullanılmıştır. Tüm analizler R istatistik yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve iki taraflı P değeri <0,05 istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, WGS (Tüm Genom Dizileme) yönteminin çocukluk çağı epilepsisinin tanısında en yüksek verimliliği sağladığı belirtilmiştir. Çalışma [2], EIEE (Erken infantil epileptik ensefalopati) tanısını doğrulamak için retrospektif bir kohort oluşturulmuş ve DNA dizileme ve varyant analizi için standart araçlar kullanılmıştır. Hazır paketler aracılığıyla gerçekleştirilen analiz sonuçları, hastalığın tanısı konulmadan önce spontan yapısal değişiklikler (SV'ler), tek nükleotid değişiklikleri (SNV'ler) ve küçük DNA ekleme veya silme değişiklikleri (INDEL'ler) gibi yöntemlerin uygulanması gerektiğini belirtmiştir. Böylece, EIEE için daha doğru ve kapsamlı bir tanı konulacağı belirtilmiştir.

[3] çalışması, patojenik STXBP1 varyantlarının erken başlangıçlı ciddi gelişimsel ve epileptik ensefalopatiye (STXBP1-DEE) neden olup olmadığını araştırmıştır. Buna göre, STXBP1 varyantını taşıyan 32 hasta kaydedilmiştir. SPSS istatistik yazılımı kullanılarak uygulanan istatistiksel analizle raporlanan testler, $p < 0,05$ anlamlılık düzeyinde iki taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, STXBP1-DEE'nin genellikle ciddi bilişsel bozukluklara ve yüksek düzeyde fonksiyonel bağımlılığa neden olduğu belirtilmiştir. DNM1 genindeki heterozigot patojenik varyantların ciddi nörolojik hastalıklara neden olup olmadığını araştıran çalışma [4], DNM1 geninde alternatif olarak eklemlenen ekson 10b içeren klasik bir transkript incelemiştir. Ancak, beyin örneklerinin RNA dizilemesi, beyin dokusu örneklerindeki birincil transkriptin ekson 10a içerdiğini göstermiştir. Bu nedenle, DNM1 genindeki farklı varyantların ekson 10a'sı ile hastalığın ciddiyeti arasındaki ilişki araştırılmıştır. Genetik analiz ve dizileme teknikleri kullanılarak yapılan bu çalışmada, ekson 10a'yı etkileyen varyantların DNM1 geni ile ilişkili hastalıklarda ciddi DEE'ye neden olduğu belirlenmiştir.

Çeşitli ailesel fokal epilepsi sendromlarının önemli bir nedeni olarak DEPDC5 genindeki mutasyonların incelendiği çalışma [5], tüm genetik materyal ekzom dizileme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. İncelenen 293 hastanın çoğunda sporadik fokal epilepsi görülmüştür. Bu nedenle, DEPDC5 genindeki mutasyonların hem ailesel hem de sporadik fokal epilepsilere neden olabileceği belirtilmiştir. Dravet sendromuna neden olan genetik mutasyonları inceleyen bir çalışmada [6], doğrudan dizileme ve çoklu ligasyona bağlı prob amplifikasyonu kullanılarak 333 hastadan oluşan bir seri taranmıştır. Araştırma bulguları, 228 hastada nokta mutasyonları bulunduğunu belirtmiştir. Ayrıca, 161 mutasyonun daha önce bilinmediği de açıklanmıştır. Buna ek olarak, en yaygın mutasyonların, proteinin korunmuş bölgelerini etkileyen iyon taşınımı ile ilgili dizilerde bulunduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, SCN1A mutasyon spektrumunu genişleten sonuçlar ortaya koymuştur. Çalışma [7], yeni epilepsi genlerinin keşfini ve bu genlerdeki mutasyonların epilepsi ve zeka geriliğine katkısını değerlendirmiştir. Bu bağlamda, 357 hasta epilepsi ve/veya zeka geriliği (ID) ile ilişkili genlerdeki bozuklukları taramak için incelenmiştir. Çalışma sonucunda, GRIN2B genindeki mutasyonların epilepsiye katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

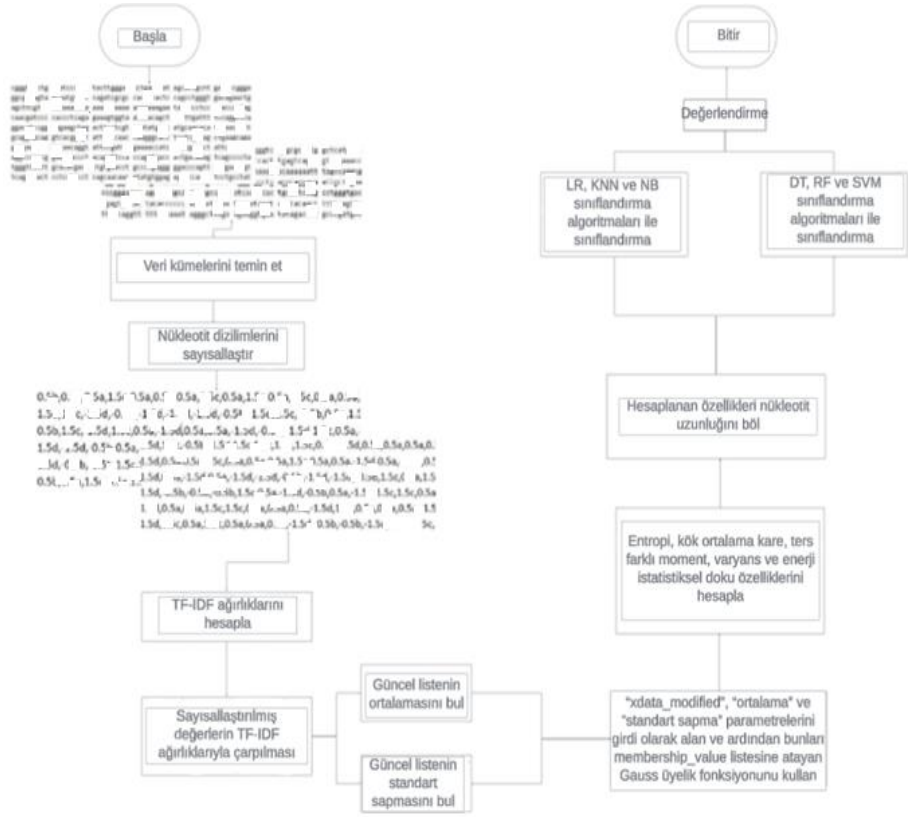
A. Veri Kümesi

Epilepsi ve sağlıklı kategorilerine ilişkin bir sınıflandırma yapmak amacıyla Ensemble veri kümesi [8] kullanılmıştır. Bu doğrultuda sırasıyla ARX ENSG00000004848(CCDS14215) BRD7 ENSG00000166164(CCDS10742) BRD7 ENSG00000166164(CCDS54007) CACNA1H ENSG00000196557(CCDS45375) CACNA1H ENSG00000196557(CCDS45376) CLCN2 ENSG00000114859(CCDS3263) CLCN2 ENSG00000114859(CCDS54690) CLCN2ENSG00000114859(CCDS54691) CLCN2ENSG00000114859(CCDS54692) CNTN2 ENSG00000184144(CCDS1449) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS43006) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS43007) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS46692) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS56229) DEPDC5 ENSG00000100150 (CCDS74849) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS87017) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS87018) DEPDC5 ENSG00000100150(CCDS93151) GABRA1 ENSG00000022355(CCDS4357) HEATR3 ENSG00000155393(CCDS10739) NPRL3 ENSG00000103148(CCDS73794) NPRL3 ENSG00000103148(CCDS73795) PIGQ ENSG00000007541(CCDS10411) PIGQ ENSG00000007541(CCDS10412) PRICKLE1 ENSG00000139174(CCDS8742) RORB ENSG00000198963(CCDS6646) RORB ENSG00000198963(CCDS94422) SETD1A ENSG00000099381(CCDS32435) SLC12A5 ENSG00000124140(CCDS13391) SLC12A5 ENSG00000124140(CCDS46610) SNIP1 ENSG00000163877(CCDS419) SYN1 ENSG00000008056(CCDS14280) SYN1 ENSG00000008056(CCDS35233) ABCG2 ENSG00000118777(**CCDS3628**) ABCG2 ENSG00000118777(**CCDS58910**) CD2 ENSG00000116824(**CCDS889**) CLIC5 ENSG00000112782(**CCDS4914**) CLIC5 ENSG00000112782(**CCDS47438**) CLIC5 ENSG00000112782(**CCDS59022**) DST ENSG00000151914(**CCDS4959**) GABPA ENSG00000154727(**CCDS13575**) HGF ENSG00000019991(**CCDS5597**) HGF ENSG00000019991(**CCDS47626**) HGF ENSG00000019991(**CCDS47627**) HGF ENSG00000019991(**CCDS47628**) HGF ENSG00000019991(**CCDS47629**) MED27 ENSG00000160563(**CCDS6945**) MED27 ENSG00000160563 (**CCDS59153**) MED27 ENSG00000160563(**CCDS69689**) MFN1 ENSG00000171109(**CCDS3228**) NTNG2 ENSG00000196358(**CCDS6946**) NTRK2 ENSG00000148053 (**CCDS6671**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS35050**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS35051**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS35052**) NTRK2 ENSG00000148053 (**CCDS35053**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS94427**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS94428**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS94429**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS94430**) NTRK2 ENSG00000148053(**CCDS94431**) PTGFRN ENSG00000134247(**CCDS890**) RUNX2 ENSG00000124813(**CCDS4913**) RUNX2 ENSG00000124813(**CCDS43467**) RUNX2 ENSG00000124813(**CCDS43468**) RUNX2 ENSG00000124813(**CCDS64443**) SLC28A3 ENSG00000197506(**CCDS6670**) SV2B ENSG00000185518(**CCDS10370**) SV2B ENSG00000185518(**CCDS53972**) ZNF639 ENSG00000121864(**CCDS3227**) erişim

numaralarına sahip farklı uzunluklarda 33 adet Epilepsi ve 37 adet sağlıklı kategorilerine sahip toplam 70 adet veri temin edilmiştir.

B. Metodoloji

Bu çalışma, Ensemble kamu veri setinden elde edilen epilepsi hastalığı ile ilgili DNA yapılarını sağlıklı yapılardan ayırt etmek için bir metodoloji sunmaktadır. Bu metodoloji Şekil 1'de açıklanmaktadır.



Şekil 1. Çalışmanın akış diyagramı

Şekil 1'deki süreçte sırasıyla kategorik verilerin sayısallaştırılması, sayısallaştırılan her bir organik baz için TF-IDF ağırlıklarının hesaplanması, kontrol kararının oluşturulması ve istatistiksel ölçüler ile etkili özelliklerin çıkarılması sağlanmıştır. İstatistiki ölçüler aşağıda detaylandırılmaktadır.

Entropi

Verilerdeki düzensizlik veya rastgelelik derecesini ölçen bir kriterdir [9]. Her DNA dizisinin entropi değerini ölçmek için kullanılan matematiksel ifade denklem 1'de verilmiştir.

Entropy=$-\sum_i p(i) log_2(p(i))$ (1)

Denklem 1'de verilen p(i), i indeksli elemanın olasılığıdır. Bu denklemle elde edilen yüksek entropi değeri, belirsiz yapının yüksek olduğu anlamına gelir. Aksi takdirde, daha düzenli ve karmaşık olmadığı anlamına gelir [10].

Kök Ortalama Kare

Verilerdeki enerji dağılımını ölçen bir metriktir [9]. Her DNA dizisinin Kök Ortalama Kare değerini ölçmek için kullanılan matematiksel ifade Denklem 2'de verilmiştir.

Kök Ortalama Kare=$\sqrt{(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2)}$ (2)

Denklem 2'de verilen N, toplam veri sayısıdır ve x_i, veri kümesinin i'inci değeridir. Bu denklemle elde edilen çıktı, doku özelliklerinin nicel bir değerlendirmesini sağlar.

Ters Fark Moment

Görüntüdeki yerel homojenliği ölçmek için kullanılan bir kriterdir [9]. Her DNA dizisinin Ters Fark Moment değerini ölçmek için kullanılan matematiksel ifade Denklem 3'te verilmiştir.

Ters Fark Moment=$\sum_{i=0}^{n-1}\sum_{j=0}^{n-1}\frac{x_i}{1+(i-j)^2}$ (3)

Denklem 3'te verilen n, veri kümesinin uzunluğudur. Bu veri kümesindeki ardışık veri öğeleri i ve j ile temsil edilir. Veri kümesindeki doku özelliklerini ve homojenliği değerlendirmek için Denklem 3 ile elde edilen çıktı tercih edilir.

Varyans

Varyans, verilerin dağılımını ölçmek için kullanılan istatistiksel bir doku ölçüsüdür. Veri noktalarının ortalamadan ne kadar uzak dağıldığını gösterir [11]. Her DNA dizisinin varyans değerini ölçmek için kullanılan matematiksel ifade Denklem 4'te verilmiştir.

Varyans = $\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(x_i - x_{ort})^2$ (4)

Denklem 4'de verilen denklemde, veri kümesi uzunluğu n olan dizi için i indeksi x_i verisini temsil eder. Varyans, istatistiksel analiz ve veri biliminde geniş bir kullanım alanına sahiptir [11]. DNA dizisinin ne kadar homojen veya heterojen olduğunu değerlendirmeye yardımcı olur.

Enerji

Enerji, verilerin homojenliğini veya düzenliliğini ölçmek için kullanılır [9]. Her DNA dizisinin enerji değerini ölçmek için kullanılan matematiksel ifade Denklem 5'te verilmiştir.

$$\text{Energy}=\sum_{i=0}^{n-1} x_i^2 \quad (5)$$

Denklem 5'te verilen denklemde, i indeksi veri kümesi uzunluğu n olan dizi için x_i verilerini temsil eder. Bu denklemle elde edilen yüksek çıktı, verilerin homojenliğini gösterirken, düşük çıktı ise heterojenliğin bir ölçüsüdür [10].

Son aşamada her bir nükleotit uzunluğu için hesaplanan istatistiksel ölçüler, nükleotit uzunluğuna bölünür. Ardından klasik makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırma işlemi sağlanır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Ensemble gen bankasından elde edilen Epilepsi ve Sağlıklı kategorilerindeki biyolojik veriler kullanılarak yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur. Kategoriler arasında dengeli olan bu veri kümesi, makine öğrenimi sınıflandırma algoritmaları ile test edilmiştir. %75'i eğitim kümesi ve %25'i test kümesi olan bölme işleminden elde edilen deneysel çıktıların performans ölçütleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Ensemble gen bankası tarafından sağlanan eğitim veri seti kapsamında üretilen performans değerleri

Makine Öğrenmesi Alg.	Doğruluk Oranı	Hassasiyet	Duyarlılık	Özgüllük	F1 Skoru
Lojistik Regresy.	0.807	0.833	0.769	0.846	0.8
KNN	0.884	0.916	0.846	0.923	0.879
Karar Ağaçları	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Random Forest	0.980	1.0	0.961	1.0	0.980
Naive Bayes	0.769	0.791	0.730	0.807	0.76
SVM	0.826	0.904	0.730	0.923	0.808

Table 7. Ensemble gen bankası tarafından sağlanan test veri seti kapsamında üretilen performans değerleri

Makine Öğrenmesi Alg.	Doğruluk Oranı	Hassasiyet	Duyarlılık	Özgüllük	F1 Skoru
Lojistik Regresy.	0.7222	0.625	0.714	0.727	0.666
KNN	0.722	0.625	0.714	0.727	0.666
Karar Ağaçları	0.611	0.5	0.428	0.727	0.461
Random Forest	0.722	0.666	0.571	0.818	0.615
Naive Bayes	0.833	0.833	0.714	0.909	0.769
SVM (rbf)	0.833	0.833	0.714	0.909	0.769

Tablo 1 ve Tablo 2'yi incelediğimizde, destek vektör makinesi sınıflandırma algoritmasının hem eğitim hem de test veri kümelerinde tatmin edici performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Normal şartlar altında bu başarının iyileştirilmesi edilmesi mümkündür. Bunun için Veri bankalarındaki bilgilerin güncellenmesi ve oluşturulan veri setlerinde örnek çeşitliliğinin artırılması sonucunda elde edilecek kaliteli verilerle, araştırmaya ilişkin bu sınırlılıklar ve olası dezavantajların aşılması öngörülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada başarılı çözümler sunmak ve geleneksel sınırlamaları aşmak için genetik çalışmalarla entegre olarak istatistiksel doku analizi yöntemleri ve makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Bu işlevsellik, biyolojik verileri hassas ve ayrıntılı bir şekilde analiz etmek, verileri yorumlamak ve yönetmek, objektif sonuçlar üretmek, araştırmaları farklı perspektiflerden ele almak, biyolojik veriler arasında kalıplar bulmak ve biyolojik süreçleri modellemek için değerlidir. Kapsamlı ve esnek içgörüler üretilmesini sağlar. Ayrıca, hızlı öğrenme ile oluşturulan model performansı, stratejik kararlar almak için değerli bilgiler üretir.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmaya katkılarından dolayı bir yapay zeka dil modeli olan ChatGPT'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

[1] G. Costain, D. Cordeiro, D. Matviychuk, and S. Mercimek-Andrews, "Clinical Application of Targeted Next-Generation Sequencing Panels and Whole Exome Sequencing in Childhood Epilepsy," Neuroscience, vol. 418, pp. 291–310, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.neuroscience.2019.08.016.

[2] B. E. P. Ostrander et al., "Whole-genome analysis for effective clinical diagnosis and gene discovery in early infantile epileptic encephalopathy," NPJ Genom Med, vol. 3, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41525-018-0061-8.

[3] H. Stamberger et al., "Natural History Study of STXBP1-Developmental and Epileptic Encephalopathy into Adulthood," Neurology, vol. 99, no. 3, pp. E221–E233, Jul. 2022, doi: 10.1212/WNL.0000000000200715.

[4] S. Parthasarathy et al., "A recurrent de novo splice site variant involving DNM1 exon 10a causes developmental and epileptic encephalopathy through a dominant-negative mechanism," Am J Hum Genet, vol. 109, no. 12, pp. 2253–2269, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ajhg.2022.11.002.

[5] M. H. Tsai et al., "DEPDC5 mutations in familial and sporadic focal epilepsy," Clin Genet, vol. 92, no. 4, pp. 397–404, Oct. 2017, doi: 10.1111/cge.12992.

[6] C. Depienne et al., "Spectrum of SCN1A gene mutations associated with Dravet syndrome: Analysis of 333 patients," J Med Genet, vol. 46, no. 3, pp. 183–191, Mar. 2009, doi: 10.1136/jmg.2008.062323.

[7] J. R. Lemke et al., "GRIN2B mutations in west syndrome and intellectual disability with focal epilepsy," Ann Neurol, vol. 75, no. 1, pp. 147–154, Jan. 2014, doi: 10.1002/ana.24073.

[8] "Ensemble.", https://www.ensembl.org/index.html.

[9] K. Sonti and R. Dhuli, "Pattern Based Glaucoma Classification Approach using Statistical Texture Features," in 2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing, AISP 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/AISP53593.2022.9760664.

[10] E. M. Van Rikxoort, "Texture analysis -Graduate research proposal in AI," 2004.

[11] Y. Zhou, Y. Zhu, and W. K. Wong, "Statistical tests for homogeneity of variance for clinical trials and recommendations," Jun. 01, 2023, Elsevier Inc. doi: 10.1016/j.conctc.2023.101119.

A Comprehensive Analytical Study on The Electronic and Optical Properties of Lithium-Doped Semiconductors

Yousef ADWAN[*]
Serap YİĞİT GEZGİN [2]
Hamdi Şükür KILIÇ [3]

[1]Department of Physics, Faculty of Science, University of Selcuk, Konya, Turkey
[2]Department of Physics, Faculty of Science, University of Selcuk, Konya, Turkey
[3]Department of Metallurgy and Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Dokuz Eylul, İzmir, Turkey
[*](yousefadwan1992@gmail.com)

ABSTRACT

The doping process is one of the fundamental techniques in semiconductor science, enabling precise control over the electrical, optical, and structural properties of semiconducting materials to suit the requirements of various electronic and optoelectronic devices. Through the intentional introduction of impurity atoms, doping allows the adjustment of carrier concentration, electrical conductivity, and energy band gap, which are crucial for optimizing the performance of components such as diodes, transistors, and solar cells.

This study focuses on the significance of lithium (Li) doping and its impact on the electronic and optical properties of semiconductors. Lithium, as a light alkali metal with high mobility, plays a key role in modifying energy levels, carrier density, and charge transport behavior within the crystal lattice. The findings aim to provide a deeper understanding of how Li doping can enhance the efficiency and functionality of semiconductor-based electronic and photoelectronic devices.

Keywords – Doping, Li Doping, CTS, CZTS, CuO, CIGS, Semiconductors.

INTRODUCTION

The growing interest in nanoscale materials stems from their unique properties, which differ significantly from those observed at the bulk scale. Reducing a material to the nanometer size alters its physical and chemical behavior, making its characteristics highly tunable through control of size, shape, and crystalline structure [1]. Furthermore, doping these materials with specific elements or impurities provides additional flexibility in tailoring their electronic, optical, and mechanical properties to meet the requirements of because of cations such as solar cells, sensors, and advanced electronic devices [2].

Thin film deposition techniques encompass a wide range of physical and chemical approaches, including thermal evaporation, electron beam evaporation, molecular beam epitaxy (MBE), sputtering processes, chemical vapor deposition (CVD), as well as sol–gel and spray pyrolysis techniques, in addition to pulsed laser deposition (PLD) [3, 4].

To characterize the thin films formed during the deposition process, several analytical techniques are employed, including X-ray diffraction (XRD) to investigate the crystalline structure, Atomic Force Microscopy (AFM) and Scanning Electron Microscopy to analyze the surface topography and morphology, as well as UV–visible (UV–Vis) spectroscopy to determine the optical and optoelectronic properties of the films [3].

In this study, we will present an analytical overview of the properties of selected nanomaterials and examine how these properties are modified because of lithium doping, with particular emphasis on the influence of Li

incorporation on the electronic and optical characteristics of semiconductor materials.

LI DOPED SEMICONDUCTORS

In this study, we review a range of semiconductors that can be doped with lithium, based on peer-reviewed research. The effects of lithium doping on the optoelectronic and atomic structural properties of these materials are also examined, aiming to elucidate the underlying mechanisms of structural and electronic modifications induced by the incorporation of lithium into the crystal lattice of various semiconductors.

A. Li-Doped CuO:

Copper oxide (CuO) is one of the transition-metal oxides that has attracted considerable attention from researchers due to its scientific significance and wide range of practical applications. It is classified as a p-type semiconductor with an energy band gap ranging from 1.2 to 1.7 eV, and it crystallizes in a monoclinic structure, which endows it with distinctive physical and electrical properties. These characteristics make CuO a promising material for various electronic, optical, and renewable-energy applications[5-7]. Also, it is utilized in a wide range of optoelectronic applications, including solar cells, sensors, catalysts, and high-temperature superconductors.

The doping of copper oxide with monovalent elements from the alkali group, such as lithium, sodium, and potassium, is important. The incorporation of these ions increases the concentration of positively charged copper ions Cu2+ within the crystal lattice, thereby enhancing the p-type semiconducting behaviour of CuO. Consequently, this leads to a notable increase in its electrical conductivity, improving its performance in various optoelectronic and electronic applications [8, 9].

Lithium is an important element widely used in various applications and devices, as the battery industry heavily relies on its high energy storage capacity [10]. Additionally, lithium is extensively employed in scientific research and incorporated with a range of materials, with several studies demonstrating its ability to modify the optoelectronic properties of numerous substances, including copper oxides [11]. Doping copper oxide with lithium ions is considered an appropriate approach due to the close match in ionic radii. The ionic radius of Cu^{2+} is approximately 0.73 Å [12], while that of Li^{+}

is about 0.76 Å [12, 13], facilitating the incorporation of lithium into the CuO crystal lattice without causing significant distortions.

Previous studies have indicated that doping copper oxide CuO significantly influences its various properties. Xu et al. demonstrated that doping CuO with manganese (Mn) leads to changes in its magnetic and structural characteristics [14]. It was also observed that the crystal size increases with higher cobalt Co doping [15]. Additionally, nickel (Ni) doping affects the energy band gap, as reported by Basith et al. [16]. Moreover, lithium (Li) doping has been shown to reduce the energy band gap of CuO, as noted by Kadhim et al. [17], while increasing the lithium content improves the quality of thin films and results in smaller particle sizes, as demonstrated by Bayansal et al. [18]. These findings highlight the critical role of doping in tuning the optical and physical properties of copper oxide.

The lithium doping of copper oxide was investigated using the spray pyrolysis method to fabricate thin films with lithium concentrations ranging from (0 to 6%) on glass substrates, as reported by N. Allouche et al. The results showed a decrease in the optical band gap from 1.88 to 1.46 eV, accompanied by a reduction in resistivity from 339 to 186 kΩ·cm with increasing lithium concentration[7]. X-ray diffraction (XRD) analysis reveals an improvement in the crystalline structure of the films[7, 19, 20] , with no observable defect peaks. This absence of defect-related signals indicates that the lithium atoms have been effectively incorporated into the copper lattice sites within the CuO crystal structure [7]. Such behaviour confirms the homogeneity of the doping process and the structural stability of the resulting films.

B. Li Doping in CTS (Cu2SnS3)

The CTS compound is classified as a chalcogenide, a group of semiconducting materials characterized by their notable optical properties and tunable bandgap, which typically ranges from approximately 1 to 3 eV. Chalcogenides derive their name from the presence of at least one negatively charged chalcogen anion from Group VI (the oxygen family), bonded to one or more electropositive elements[21].

These materials are considered promising candidates for use in optoelectronic applications, particularly in solar cells, due to the natural abundance of their constituent elements, their low cost, and the absence of toxic components. This stands in contrast to first-generation silicon-based solar cells, which require large quantities of raw materials and involve high manufacturing costs [22]. Additionally, other absorber layers commonly used in thin-film solar cells, such as CdTe [23] and CIGS [24], can achieve

power conversion efficiencies exceeding 20%, yet they contain elements that pose potential health and environmental hazards.

In pursuit of safer and more environmentally benign alternatives, researchers have developed new absorber materials, leading to the emergence of compounds such as CZTS and CTS. Despite their advantages, namely elemental abundance, low toxicity, and environmental compatibility, the power conversion efficiency of solar cells based on these materials remains relatively limited, reaching approximately 12.6% [25].

Cu_2SnS_3 (CTS) is employed in solar cells as a p-type absorber layer due to its high absorption coefficient exceeding 10^4 cm^{-1} and a suitable bandgap ranging from 0.9 to 1.6 eV[26, 27], making it effective for capturing a significant portion of the solar spectrum. Thin films of CTS can be fabricated using various deposition techniques, including pulsed laser deposition (PLD), spray pyrolysis, dip coating, and sputtering.

Incorporating alkali atoms generally enhances both the optoelectronic and structural properties of semiconductor materials. Such doping effectively reduces structural defects, improves grain boundary passivation, suppresses carrier recombination, and increases the concentration of charge carriers. Collectively, these improvements contribute to superior optoelectronic performance of the absorber layer and make alkali doping a highly effective strategy for boosting the efficiency of thin-film–based photovoltaic devices [28-30].

Studies have shown that doping CTS with alkali elements, such as sodium (Na), can enhance the crystallinity and optoelectronic properties of the absorber layer, thereby increasing the power conversion efficiency of CTS-based solar cells to approximately 5% compared to undoped films [31].

Lithium doping of CTS is considered an effective approach for enhancing the quality of chalcogenide thin films, as it contributes to improving the structural and optoelectronic properties of the absorber layer [32, 33]. The incorporation of lithium has demonstrated a noticeable enhancement in the performance of CTS-based solar cells employing p-type CTS as the absorber layer within a (p-CTS/n-Si) heterojunction structure, highlighting the positive role of lithium atoms in increasing device efficiency [34].

Furthermore, annealing is an essential post-deposition step, as it significantly improves the crystallinity of thin films. This effect is clear in the XRD analysis of the lithium-doped CTS sample before and after annealing, where substantial improvements in the crystal structure are observed. In addition, lithium doping has been shown to reduce the crystallite size, decreasing from 25.3 nm in the undoped film to 23.9 nm in

the doped film, indicating the influence of lithium on crystal growth and grain-size modification[34].

A previous study demonstrated that the decrease in the Cu/Sn ratio following lithium doping, the improvement in the surface morphology of CTS thin films, the reduction in the bandgap from 1.11 to 1.08 eV, and the notable enhancement in the photo response of the Si/Li0.03CTS/Ag solar cell can all be attributed to two principal factors: the improved surface morphology of the CTS layers and either the reduced Cu/Sn ratio or the decreased thickness of the Li-doped films [34]

C. Li Doping in CZTS (Cu2ZnSnS4)

Kesterite CZTS (Cu_2ZnSnS_4) is considered a promising material for solar cell applications due to its composition of non-toxic and earth-abundant elements, in addition to its favorable photovoltaic properties that make it suitable as an efficient absorber layer. CZTS thin films can be fabricated using various physical and chemical techniques. In this context, Maruf Chand prepared lithium-doped CZTS thin films using the sol–gel method, employing different lithium doping concentrations according to the formula $Li_xCu_{2-x}ZnSnS_4$ (x = 0, 0.2, 0.4, 0.6) [35].

The structural, morphological, and photovoltaic properties of the synthesized thin films were investigated using X-ray diffraction (XRD) to analyze the crystal structure and crystallite size, scanning electron microscopy [36] to examine surface morphology, and UV–visible spectroscopy (UV–Vis) to evaluate the photovoltaic characteristics. The results revealed improved crystallinity and an increase in crystallite size with increasing lithium doping concentration, along with a reduction in average grain size from 0.336 to 0.310 μm. The highest absorption coefficient, reaching 3.505×10^4 cm^{-1}, was observed for the most heavily lithium-doped sample, $Li_{0.6}Cu_{1.4}ZnSnS_4$. Furthermore, lithium incorporation led to an increase in the optical bandgap from approximately 1.5 to 1.8 eV and a notable enhancement in optical conductivity, indicating improved material properties suitable for photovoltaic applications[35].

D. Li Doping in CIGS (Cu(In,Ga)Se2)

Numerous studies have demonstrated that the incorporation of heavy alkali metals, such as potassium (K), rubidium (Rb), and cesium, leads to a significant enhancement in the photovoltaic efficiency of $Cu(In,Ga)Se_2$ (CIGS) solar cells, although the exact physical and chemical mechanisms responsible for this improvement are not yet fully understood. These enhancements are generally attributed to the influence of alkali metals on

crystal growth, surface composition, and charge carrier behavior within the absorber layer [37].

In this context, the present work focuses on evaluating the effect of the lightest alkali metal, lithium (Li), on the structural and optoelectronic properties of CIGS thin films and devices. Although previous studies have reported beneficial effects of Li incorporation on the performance of Cu_2ZnSnS_4-based photovoltaic devices, the current findings indicate that the impact of Li on the CIGS system is relatively limited. In contrast to sodium (Na) or rubidium (Rb), Li does not promote the preferred CIGS (112) crystallographic growth orientation [37].

A particularly distinguishing feature between Li and heavier alkali metals lies in their elemental depth distribution within CIGS thin films. While Na and heavier alkali metals exhibit a pronounced accumulation near the Cu-poor surface region—thereby contributing to surface and grain-boundary modification Li does not display a similar distribution behavior. This suggests that Li does not induce effective surface passivation in CIGS absorbers. Nevertheless, a modest improvement in photoluminescence (PL) intensity and overall photovoltaic performance is observed upon Li incorporation; however, this enhancement remains considerably weaker compared to the effects achieved with heavier alkali metals[37].

RESULTS

The quantitative results indicate that lithium doping induces measurable changes in the optical and electrical properties of the investigated semiconductor systems. In CuO thin films, the optical bandgap decreases from 1.88 to 1.46 eV with increasing lithium concentration, accompanied by a reduction in electrical resistivity from 339 to 186 kΩ·cm, reflecting enhanced electrical transport. For CTS thin films, lithium incorporation leads to a decrease in crystallite size from 25.3 to 23.9 nm and a narrowing of the optical bandgap from 1.11 to 1.08 eV, together with a significant improvement in the photo response of p-CTS/n-Si solar cells. In the case of CZTS, lithium doping results in an increase in the optical bandgap from approximately 1.5 to 1.8 eV and yields a maximum absorption coefficient of 3.505×10^4 cm^{-1} for the $Li_{0.6}Cu_{1.4}ZnSnS_4$ film, along with enhanced optical conductivity. By contrast, CIGS thin films exhibit only a limited quantitative response to lithium incorporation, showing no significant enhancement of

the preferred (112) growth orientation and only a modest increase in photoluminescence intensity and photovoltaic performance when compared with the pronounced effects induced by heavier alkali metals.

DISCUSSION

Lithium doping has been shown to effectively modify the structural and optoelectronic properties of several semiconductor thin-film systems, with material-dependent outcomes. In CuO and CTS thin films, Li incorporation improves crystallinity, reduces defect density, lowers electrical resistivity, and slightly narrows the optical bandgap, leading to enhanced photo response and improved photovoltaic performance, particularly in CTS-based devices. In CZTS thin films, lithium doping enhances crystallinity, optical absorption, and optoelectronic behaviour, yielding a widened bandgap (≈1.5–1.8 eV) and a high absorption coefficient, thus confirming its suitability for photovoltaic applications. In contrast, while heavy alkali metals (K, Rb, Cs) significantly enhance solar cell performance through improved crystal growth and surface passivation, the effect of lithium in CIGS remains relatively limited, providing only minor improvements in photoluminescence and device efficiency without promoting preferred crystallographic orientation or effective surface modification.

CONCLUSION

In conclusion, the results of this study demonstrate that lithium doping is an effective strategy for enhancing the structural and optoelectronic properties of CuO and CTS thin films. The doping process contributed to improved crystallinity, reduced structural defects, and optimized stoichiometry, in addition to decreasing the bandgap and increasing the efficiency of solar cells based on these films. These findings highlight the critical role of lithium doping in the development of high-performance semiconductor materials and open promising avenues for their applications

in optoelectronic devices and thin-film solar cells, with potential for further optimization in future thin-film designs to achieve higher efficiency and improved stability.

REFERENCES

1. Li, X., *Properties and Applications of Nanoparticles and Nanomaterials.* International Journal of Molecular Sciences, 2025. **26**(2): p. 765.
2. Chen, X., et al., *Doped semiconductor nanomaterials.* J Nanosci Nanotechnol, 2005. **5**(9): p. 1408-20.
3. Gezgin, S.Y., A. Houimi, and H.Ş. Kılıç, *Production and photovoltaic characterisation of n-Si/p-CZTS heterojunction solar cells based on a CZTS ultrathin active layers.* Optik, 2019. **199**: p. 163370.
4. Nimalan, T. and M. Begam, *Physical and chemical methods: a review on the analysis of deposition parameters of thin film preparation methods.* Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec, 2024. **13**(1): p. 59-66.
5. Allouche, N., et al., *Structural, optical and electrical properties of copper oxide thin films deposited by spray pyrolysis.* Journal of Ovonic Research, 2023. **19**(4): p. 369-377.
6. Chen, A., et al., *Controlled growth and characteristics of single-phase Cu2O and CuO films by pulsed laser deposition.* Vacuum, 2009. **83**(6): p. 927-930.
7. Allouche, N., et al., *Effect of Li Doping on Structural, Optical, and Electrical Properties of CuO Thin Films Produced by Spray Pyrolysis Method.* Acta Physica Polonica: A, 2024. **145**(4).
8. Jang, W.-L., et al., *Electrical properties of Li-doped NiO films.* Journal of the European Ceramic Society, 2010. **30**(2): p. 503-508.
9. Zgair, I.A., et al., *Investigation of structure, optical and photoluminescence characteristics of Li doped CuO nanostructure thin films synthesized by SILAR method.* Optik, 2019. **191**: p. 48-54.
10. Torrisi, A., et al., *Chemiresistors based on Li-doped CuO–TiO2 films.* Chemosensors, 2021. **9**(9): p. 246.
11. Zhao, Y., et al., *Effect of lithium-ion doping concentration on structural and optical properties of NiO films fabricated by magnetron sputtering.* Vacuum, 2017. **137**: p. 56-59.
12. Shannon, R.D., *Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides.* Foundations of Crystallography, 1976. **32**(5): p. 751-767.

13. Li, Y., et al., *One-step synthesis of Li-doped NiO as high-performance anode material for lithium ion batteries.* Ceramics International, 2016. **42**(13): p. 14565-14572.
14. Xu, M., et al., *Structural and magnetic properties of Cu1− xMnxO nanocrystal prepared by combustion synthesis.* Physica B: Condensed Matter, 2011. **406**(17): p. 3180-3186.
15. Bayansal, F., et al., *Effect of cobalt doping on nanostructured CuO thin films.* Metallurgical and Materials Transactions A, 2014. **45**(8): p. 3670-3674.
16. Basith, N.M., et al., *Structural, morphological, optical, and magnetic properties of Ni-doped CuO nanostructures prepared by a rapid microwave combustion method.* Materials science in semiconductor processing, 2014. **17**: p. 110-118.
17. Kadhim, R.G. and K. Kzar, *Structural and optical properties of CuO doped (Li) thin films prepared by sol-gel technique.* World Scientific News, 2016(56): p. 56-66.
18. Bayansal, F., O. Şahin, and H. Çetinkara, *Mechanical and structural properties of Li-doped CuO thin films deposited by the successive ionic layer adsorption and reaction method.* Thin Solid Films, 2020. **697**: p. 137839.
19. Das, S. and T. Alford, *Structural and optical properties of Ag-doped copper oxide thin films on polyethylene napthalate substrate prepared by low temperature microwave annealing.* Journal of applied physics, 2013. **113**(24).
20. Iqbal, J., et al., *Facile synthesis of Zn doped CuO hierarchical nanostructures: Structural, optical and antibacterial properties.* Aip Advances, 2015. **5**(12).
21. Sousa, V., *Chalcogenide materials and their application to non-volatile memories.* Microelectronic Engineering, 2011. **88**(5): p. 807-813.
22. Nakamura, M., et al., *Cd-free Cu (In, Ga)(Se, S) 2 thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%.* IEEE journal of photovoltaics, 2019. **9**(6): p. 1863-1867.
23. Swartz, C., et al., *Evaluation of PbTe and SnTe as ohmic contact layers in CdTe solar cell devices.* Applied Surface Science, 2022. **598**: p. 153656.
24. Sim, J.-K., et al., *Implementation of graphene as hole transport electrode in flexible CIGS solar cells fabricated on Cu foil.* Solar Energy, 2018. **162**: p. 357-363.
25. Wang, W., et al., *Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency.* Advanced energy materials, 2014. **4**(7).
26. Hossain, E., et al., *Enhancement in structural and optical properties of copper tin sulphide (CTS) thin films via sulphurization process.* Materials Science in Semiconductor Processing, 2022. **143**: p. 106496.
27. Kanai, A., et al., *Annealing temperature dependence of photovoltaic properties of solar cells containing Cu2SnS3 thin films produced by co-evaporation.* physica status solidi (b), 2015. **252**(6): p. 1239-1243.
28. Hu, X., et al., *Influence of oxygen pressure on the structural and electrical properties of CuO thin films prepared by pulsed laser deposition.* Materials Letters, 2016. **176**: p. 282-284.

29. Deepa, K., G. Chandrabose, and N. Jampana, *Tailoring the properties of Cu2ZnSnS4 thin films grown by ultrasonic spray pyrolysis.* Journal of analytical and applied pyrolysis, 2016. **120**: p. 356-360.
30. Tong, Z., et al., *Effects of potassium doping on solution processed kesterite Cu2ZnSnS4 thin film solar cells.* Applied Physics Letters, 2014. **105**(22).
31. Magdy, W., et al., *Impact of Na and/or Sb on the CTS thin films and solar cell performance.* Japanese Journal of Applied Physics, 2021. **60**(10): p. 105506.
32. Noorasid, N.S., et al., *SCAPS numerical analysis of solid-state dye-sensitized solar cell utilizing copper (I) iodide as hole transport layer.* Engineering Journal, 2022. **26**(2): p. 1-10.
33. Sharma, B., et al., *Device modeling of non-fullerene organic solar cell by incorporating CuSCN as a hole transport layer using SCAPS.* Optik, 2022. **251**: p. 168457.
34. Houimi, A., et al., *Effect of Li Doping on Cu2SnS3/n-Si Heterojunction Solar Cells: Experiments and Simulation.* Crystal Research and Technology, 2023. **58**(1): p. 2200138.
35. Chand, M.M., et al., *Synthesis and characterization of lithium-doped copper zinc tin sulfide (CZTS) thin films.* AIP Advances, 2023. **13**(12).
36. Dursun, S., et al., *Investigation of photocatalytic activity (under visible light) of ultrathin CZTS films produced in different thicknesses by PLD method.* Optical and Quantum Electronics, 2023. **55**(2): p. 166.
37. Ishizuka, S. and P.J. Fons, *Lithium-Doping Effects in Cu(In,Ga)Se(2) Thin-Film and Photovoltaic Properties.* ACS Appl Mater Interfaces, 2020. **12**(22): p. 25058-25065.

Türkiye Referanslı Ar-Ge Verimliliğinin Değerlendirilmesi: Veri Zarflama Analizi ve Oyun Teorisi ile Stratejik Ülke Kıyaslaması

Mehmet Onur OLGUN

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
onurolgun@sdu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Türkiye'nin Araştırma ve Geliştirme sisteminin verimliliğini değerlendirmek ve stratejik iş birlikleri açısından referans ülkeleri belirlemek amacıyla yapılmıştır. Almanya, Güney Kore, Türkiye ve Romanya'nın 2023 yılına ait Ar-Ge harcamaları, Ar-Ge personeli ve hükümet Ar-Ge bütçesi girdileri ile patent başvuru ve tescil sayıları ve yüksek teknoloji ihracatı çıktıları kullanılmıştır. Veriler normalize edilerek Türkiye referans ülke kabul edilmiş ve çıktı yönlü Veri Zarflama Analizi (DEA) ile ülkelerin verimlilikleri hesaplanmıştır. Normalize verilerle oluşturulan ülke koalisyonları üzerinden sistem verimliliği belirlenmiş ve kooperatif oyun teorisine dayalı Shapley değeri yöntemiyle ülkelerin koalisyonlara katkıları ölçülmüştür.Bulgular, Güney Kore'nin hem teknik verimlilik hem de sistem katkısı açısından en yüksek performansa sahip olduğunu göstermektedir. Romanya sınırlı kaynaklarına rağmen pozitif katkı sağlarken, Almanya'nın katkısı orta düzeyde kalmıştır. Türkiye ise referans ülke olmasına rağmen negatif Shapley değeriyle sistem verimliliğini düşüren bir aktör olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, Türkiye'nin yalnızca Ar-Ge kaynaklarını artırmak yerine, çıktı üretme kapasitesini yükseltecek dönüşümlere ve sistemsel katkı sağlayacak stratejik iş birliklerine odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Ar-Ge Verimliliği, Veri Zarflama Analizi, Shapley Değeri, Kooperatif Oyun Teorisi, Normalize Verimlilik, Stratejik Ülke Karşılaştırması, Çıktı/Girdi Oranı, Türkiye Referansı.

GİRİŞ

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için Ar-Ge yatırımları, sürdürülebilir ekonomik büyümenin, teknolojik ilerlemenin ve küresel rekabetçiliğin temel yapı taşlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu yatırımların gerçek etki gücünü belirleyen asıl unsur, yapılan harcamaların çıktı üretme kapasitesidir. Başka bir ifadeyle, yalnızca yüksek Ar-Ge bütçelerine sahip olmak, ülke performansını artırmak için yeterli değildir; bu kaynakların ne derece etkin ve verimli kullanıldığı da en az yatırım miktarı kadar önemlidir. Bu bağlamda, Ar-Ge verimliliğini ölçmek, değerlendirmek ve iyileştirmek, özellikle politika yapıcılar açısından stratejik bir gereklilik haline gelmiştir.

Bu tezde temel amaç, Türkiye'nin Ar-Ge verimliliğini arttırmak için hangi ülkelerin örnek alınabileceğini belirlemektir. Bu soruya yanıt ararken, yalnızca teknik verimlilik ölçümleriyle sınırlı kalmayan; aynı zamanda kooperatif oyun teorisi temelli katkı analizleriyle desteklenen çok katmanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. Literatürdeki çeşitli modellerin rehberliğinde geliştirilen bu metodoloji, klasik Veri Zarflama Analizi (DEA) [1], normalize edilmiş çıktı/girdi oranları ve Shapley değeri hesaplamalarının [2] bütünleştirilmesiyle yapılandırılmıştır.

İlk olarak, çıktı yönelimli CCR DEA modeli ile Türkiye ve örneklemde yer alan diğer ülkelerin göreli verimlilikleri hesaplanmıştır. Bu analiz,

Türkiye'nin hangi girdilerle ne kadar çıktı üretebildiğini ve diğer ülkelerle performans farkını ortaya koymayı amaçlamaktadır. İkinci aşamada ise girdiler ve çıktılar normalize edilerek, tüm veriler Türkiye'ye referanslı hale getirilmiş ve ülkeler arasındaki göreli konumlandırmalar ölçülmüştür. Bu sayede yalnızca teknik değil, aynı zamanda stratejik açıdan anlamlı karşılaştırmalar yapılabilmiştir.

Son aşamada ise normalize verimlilik skorları kooperatif oyun teorisine entegre edilerek, Shapley değeri [2] ile ülkelerin koalisyonlara katkısı hesaplanmıştır. Bu hesaplama sayesinde, Türkiye'nin Ar-Ge sistemine hangi ülkelerin daha fazla katkı sağlayabileceği ve hangi ülkelerle yapılacak iş birliklerinin sistem verimliliğini artıracağı belirlenmiştir. Dlouhý ve Havlík [3], Abing ve diğerleri [4] ile Mohammadzadeh ve arkadaşlarının [5] çalışmaları bu analizde metodolojik dayanak olarak kullanılmıştır. Bu sayede "Türkiye sadece en verimli ülkeye mi odaklanmalı, yoksa farklı alanlarda katkı sağlayan birkaç ülkeyle birlikte mi çalışmalıdır?" sorusuna da yanıtlar sunulabilmiştir.

Dolayısıyla bu araştırma, klasik verimlilik analizlerinin ötesine geçerek; normalize edilmiş skorların koalisyon katkı hesaplamalarında nasıl kullanılabileceğini ortaya koymakta ve Türkiye'nin stratejik gelişim modeli için referans ülkelerin belirlenmesine yönelik güçlü bir karar destek aracı sunmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye, Almanya, Güney Kore ve Romanya'nın 2023 yılına ait Ar-Ge verileri incelenmiştir. Ar-Ge harcamaları, personel sayısı ve kamu bütçesi gibi girdiler; patent başvuru sayısı, patent tescil sayısı, yüksek teknoloji ihracatı gibi çıktılar kullanılmıştır. Veriler, OECD ve WIPO gibi güvenilir kaynaklardan temin edilmiş ve Türkiye referans alınarak normalize edilmiştir [7][8].

Bu yöntem, özellikle sabit bir referans noktası kullanılarak ülkeler arası karşılaştırmalı analiz yapılmasını mümkün kılar. Normalize edilmiş skorlar aracılığıyla, her ülkenin çıktı üretme kapasitesi girdi düzeyine göre kıyaslanabilir hale gelir [1], [2].

Çıktı/girdi oranı esas alınarak, normalize edilmiş verilerle ülke bazlı verimlilik skorları hesaplanmış; ardından koalisyon verimlilikleri ve Shapley değerleri ile her ülkenin sistem verimliliğine katkısı değerlendirilmiştir.

Normalize girdi ve çıktı değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır:

$$X_{norm} = \frac{X_{ij}}{X_{iTR}} \quad ; \quad Y_{norm} = \frac{Y_{ij}}{Y_{iTR}}$$

Burada X_{ij} ve Y_{ij}, sırasıyla i. Girdinin ve çıktının j. Ülkeye ait değerini; X_{iTR} *ve* Y_{iTR} ise Türkiye'nin aynı değişken değerini göstermektedir. Normalize edilmiş tüm girdi ve çıktı değerlerinin toplamı alınarak ülke bazlı toplam normalize skorlar hesaplanır:

$$X_{total} = \sum X_{norm} \quad ; \quad Y_{total} = \sum Y_{norm}$$

Her ülkenin normalize edilmiş verimliliği, toplam normalize edilmiş çıktıların girdilere oranı şeklinde hesaplanmıştır:

$$v_j = \frac{Y_{total}}{X_{total}}$$

Normalize edilen girdiler ve çıktılar üzerinden yapılan bu hesaplamalar sayesinde, ülkelerin "aynı girdilerle ne kadar çıktı üretebildiği" analitik olarak karşılaştırılabilir hale getirilmiştir [3].

Verimliliğin yalnızca bireysel bazda değil, çoklu aktörlerin oluşturduğu koalisyonlar düzeyinde de değerlendirilmesi amacıyla, kooperatif oyun teorisine dayanan bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu çerçevede, iki veya daha fazla ülkenin Ar-Ge kaynaklarını birleştirerek oluşturduğu koalisyonların toplam çıktı-girdi oranları hesaplanarak, sistemsel verimlilik ölçülmüştür.

Shapley değeri analizinin temel bileşenlerinden biri olan koalisyon değer fonksiyonu v(S), ülkeler arası oluşturulan her alt kümenin (koalisyonun) sistem düzeyindeki verimliliğini yansıtmaktadır. Bu çalışmada, koalisyon verimliliği; koalisyona katılan ülkelerin toplam çıktılarının toplam girdilere oranı şeklinde hesaplanmıştır. Böylece yalnızca bireysel değil, çok taraflı iş birliklerinin performansa katkısı ölçülebilir hale getirilmiştir [4].

Koalisyon verimliliği aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$v(S) = \frac{\sum_{j \in S} Y_j}{\sum_{j \in S} X_j}$$

Burada:

- S: Koalisyonu oluşturan ülke kümesi,
- Y_j: j ülkesine ait normalize edilmiş toplam çıktı değeri,
- X_j: j ülkesine ait normalize edilmiş toplam girdi değeri,
- v(S): S koalisyonuna ait toplam verimlilik değeridir.

Koalisyon verimliliklerinin hesaplanması, tüm 2^{n-1} ülke kombinasyonu için gerçekleştirilmiş ve bu değerler, Shapley değerinin hesaplanmasında kullanılan marjinal katkıları elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntem, çok aktörlü sistemlerde iş birliğinin performans çıktısına etkisini değerlendirmede yaygın biçimde kullanılmaktadır [6]. Ayrıca, Shapley değerinin adil katkı ölçümüne dayalı teorik yapısı dikkate alındığında, koalisyon verimliliklerinin doğru ve sistematik hesaplanması büyük önem taşımaktadır [5].

Shapley değeri, bir ülkenin koalisyonlara yaptığı katkıların ortalamasını gösterir. Dört ülke az sayıda aktör varsa, bu hesaplama adım adım el ile yapılabilir ve sürecin şeffaf biçimde yürütülmesine olanak tanır [5].

Yöntemsel adımlar şu şekildedir:

- n ülke için $n!$ adet katılım sıralaması oluşturulur.
- Her permütasyonda, ülkenin koalisyona hangi sırada katıldığı belirlenir.
- Ülkenin katılımıyla koalisyon verimliliğindeki artış (marjinal katkı) hesaplanır:

$$\Delta v_i = v(S \cup \{i\}) - v(S)$$

- Tüm katkılar toplanarak permütasyon sayısına ($n!$) bölünür:

$$\phi(i) = \frac{1}{n!} \sum \Delta v_i$$

Bu yöntem, ülkelerin sistem verimliliğine katkılarını adil ve sistematik biçimde değerlendirmeyi sağlar [6].

BULGULAR

Bu çalışmada Almanya, Güney Kore, Türkiye ve Romanya'nın normalize edilmiş Ar-Ge girdileri ve inovasyon çıktıları kullanılarak veri zarflama analizi (DEA) ve Shapley değeri yöntemi ile verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen temel bulgular aşağıda sıralanmıştır:

Tablo 1. Ülkelerin Ar-Ge Girdileri ve İnovasyon Çıktıları

Ülke	AR-GE Harcaması (X1)	AR-GE Personeli (X2)	Hükümet AR-GE Bütçesi (X3)	Patent Baş. Sayısı (Y1)	Patent Tescil Sayısı (Y2)	Yüksek Tekn. İhracat ($, Y3)
Almanya	158.837	817.400	53.882	77.072	37.539	255.687.491
Kore	134.128	610.824	35.007	232.775	131.669	163.049.953
Türkiye	42.045	199.867	10.996	9.035	2.514	9.903.399
Romanya	3.845	35.273	1.132	1.006	440	9.724.367

Tablo 2. Normalize Değerler Tablosu

Ülke	AR-GE Harcaması (X1)	AR-GE Personeli (X2)	Hükümet AR-GE Bütçesi (X3)	Patent Baş. Sayısı (Y1)	Patent Tescil Sayısı(Y2)	Yük. Tek. İhracatı $(Y3)
Almanya	3,78	4,09	4,9	8,53	14,93	25,82
Kore	3,19	3,06	3,18	25,76	52,37	16,46
Türkiye	1	1	1	1	1	1
Romanya	0,09	0,18	0,1	0,11	0,18	0,98

Tablo 3. Normalize Verimlilik Değerleri

Ülke	Top. Girdi Skoru	Top. Çıktı Skoru	Normalize Verimlilik
Almanya	12,77	49,28	3,86
Kore	9,43	94,59	10,03
Türkiye	3	3	1
Romanya	0,37	1,27	3,43

- Güney Kore, 10,03 ile en yüksek normalize verimlilik skoruna sahiptir. Almanya ve Romanya sırasıyla 3,86 ve 3,43 değerleriyle orta düzeyde skor elde etmiştir. Türkiye'nin verimlilik skoru 1 olarak referans alınmıştır.

Tablo 4. Koalisyon Verimlilikleri

Koalisyonlar	**Koalisyon Verimlilikleri**
v(T)	1
v(A)	3,86
v(K)	10,03
v(R)	3,43
v(T,A)	3,32
v(T,K)	7,85
v(T,R)	1,27
v(A,K)	6,48
v(A,R)	3,84
v(K,R)	9,78
v(A,K,T)	5,83
v(T,K,R)	7,72
v(T,A,R)	3,32
v(A,K,R)	6,43
v(A,K,T,R)	5,78

T: Türkiye
A: Almanya
K: Güney Kore
R: Romanya

- Koalisyon düzeyinde en yüksek verimlilik, Güney Kore ile Romanya'nın oluşturduğu ortaklıkta (9,78) gözlenmiştir. Türkiye'nin dâhil olduğu koalisyonlarda genel verimlilik değerlerinin daha düşük kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. Shapley Değerleri

Ülke	Toplam Katkı	Shapley Değeri
Kore	129,79	**5,41**
Romanya	20,05	**0,84**
Almanya	3,29	**0,14**
Türkiye	−14,08	**−0,59**

- Shapley değeri analizinde Güney Kore'nin 5,41 değeriyle sistem verimliliğine en yüksek katkıyı sunduğu görülmüştür. Romanya ve Almanya'nın katkı değerleri pozitif; Türkiye'nin katkısı ise negatif olarak hesaplanmıştır.

Bu bulgular, ülkelerin hem bireysel hem de koalisyon bazında Ar-Ge sistemine sağladıkları katkılar açısından farklı performans sergilediğini göstermektedir.

TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, ülkelerin Ar-Ge performanslarının yalnızca teknik verimlilik skorlarıyla değerlendirilmesinin yeterli olmadığını, aynı zamanda sistem içindeki marjinal katkılarının da dikkate alınması gerektiğini açıkça göstermektedir. Özellikle Shapley değeri analizi, geleneksel DEA yaklaşımlarının sunduğu bireysel verimlilik düzeylerini kooperatif bağlamda yeniden yorumlama imkânı sunmuştur [5].

Güney Kore'nin sistem taşıyıcı rolü; yüksek verimlilik skoru ve pozitif Shapley değeri ile teyit edilmiştir. Kore, teknik olarak en yüksek çıktı/girdi oranına sahip olmasının yanı sıra, hangi koalisyon yapısına dahil edilirse edilsin sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Bu durum, Shapley değerinin "adil katkı" ilkesini destekleyen somut bir örneğidir [6]. Kore ile kurulacak iş birliklerinin, yalnızca bilgi ve teknoloji transferi açısından değil, sistemin genel denge ve verimliliği açısından da kritik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Romanya örneği, sınırlı kaynaklara rağmen pozitif Shapley değeri sunmasıyla dikkat çekmektedir. Bu durum, kaynak yoğunluğu düşük olan

ülkelerin de doğru konumlandırıldığında stratejik avantaj yaratabileceğini göstermektedir. Babaei ve Toloo'nun da belirttiği üzere, düşük kapasiteli ancak stratejik katkı sunan aktörler sistemin dengelenmesinde rol oynayabilir [5]. Türkiye açısından bakıldığında, Romanya gibi ülkelerle yapılacak düşük maliyetli iş birliklerinin bile sistem performansını artırıcı etkisi olabileceği değerlendirilmektedir.

Almanya'nın durumu, teknik verimliliği yüksek olmasına rağmen Shapley değerinin düşük kalması nedeniyle "baskın ancak verimsiz" birim sınıfında değerlendirilebilir [11]. Bu durum, yüksek çıktı üreten bir ülkenin her durumda sistemin verimliliğine pozitif katkı sunamayabileceğini göstermektedir. Almanya'nın sisteme geç katıldığı bazı koalisyon senaryolarında marjinal katkısının düşük kalması, bu ülkenin iş birliği zamanlaması ve modeli konularında daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Türkiye'nin negatif Shapley değeri, sistemin genel verimliliğini azalttığını göstermektedir. Bu bulgu, Türkiye'nin Ar-Ge yapısının teknik ve stratejik yönlerden yeniden ele alınması gerektiğini gösteritemer. Seiford ve Zhu'nun belirttiği gibi, referans birimler dahi sistem başarısında zayıf halka olabilir [12]. Türkiye'nin mevcut Ar-Ge politikaları, yüksek teknoloji üretimine dönüşmeyen harcamalar, yetersiz patent çıktıları gibi yapısal problemler nedeniyle sisteme pozitif katkı sunamamaktadır.

Özetle bu tartışma, Ar-Ge verimliliği kavramının çok katmanlı değerlendirilmesi gerektiğini ve ülkeler arası iş birliği stratejilerinin yalnızca teknik yeterliliğe değil, sistemsel katkı potansiyeline dayalı olarak kurulması gerektiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, Türkiye'nin Ar-Ge sistem performansını artırmaya yönelik olarak sadece teknik verimlilik analizleriyle değil, oyun teorisi temelli katkı analizleriyle de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Normalize edilen çıktılar ve girdiler aracılığıyla hesaplanan verimlilik skorları ile Shapley değerleri birlikte ele alınarak hem bireysel hem de koalisyon bazlı analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar özetle şunları göstermektedir:

- Güney Kore, yüksek teknik verimliliği ve sistem verimliliğine sürekli pozitif katkısı ile Türkiye için model alınabilecek en uygun stratejik ortaklardan biridir. Kore ile yapılacak iş birlikleri, teknoloji transferi,

ortak araştırma projeleri ve yenilikçi patent üretimi açısından yüksek potansiyele sahiptir.

- Romanya, sınırlı kaynaklara rağmen sistemde dengeleyici bir rol üstlenebileceğini göstermiştir. Bu durum, kaynak açısından zayıf ancak stratejik olarak anlamlı ülkelerle iş birliği yapılmasının da değerli olduğunu ortaya koymaktadır.
- Almanya, yüksek teknik verimliliğine rağmen sistem katkısı açısından beklenen düzeyde performans gösterememiştir. Türkiye için Almanya ile iş birliği potansiyeli mevcut olmakla birlikte, bu iş birliklerinin türü ve zamanlaması özenle kurgulanmalıdır.
- Türkiye, referans ülke olarak hesaplamalara dahil edilmiş olmasına rağmen negatif Shapley değeri ile sistem verimliliğini düşüren bir aktör olarak konumlanmıştır. Bu durum, mevcut Ar-Ge yatırımlarının çıktıya dönüşmesinde ciddi bir verimsizlik olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar, farklı ülkelerin sistem verimliliğine farklı şekillerde katkı sunduğunu ve bu nedenle Türkiye'nin, yalnızca bir ülkeyi örnek almak yerine, çeşitli güçlü yönlere sahip ülkelerle iş birliği yaparak daha dengeli ve verimli bir strateji geliştirmesi gerektiğini göstermektedir.

Türkiye'nin Ar-Ge Verimliliği İçin Stratejik Öneriler

- Güney Kore Modeliyle Teknoloji Transferi ve Ortak Ar-Ge Merkezleri Yaygınlaştırılmalıdır:

Güney Kore, kamu destekli teknoloji merkezleri aracılığıyla üniversite-sanayi iş birliklerini güçlendirmiş ve bu sayede yüksek patent verimliliği sağlamıştır. Türkiye'nin de çok paydaşlı Ar-Ge merkezleri kurarak bu yapıyı benimsemesi, ortak patent üretimini teşvik edecektir [7][13].

- Almanya Örneğinden Hareketle Ar-Ge Finansmanı Sadece Nicelikle Değil, Kalite Kriterlerine Bağlı Olarak Dağılmalıdır:

Almanya, Ar-Ge desteklerinde proje kalitesine ve ticarileşme potansiyeline öncelik vererek kaynak verimliliğini artırmaktadır. Türkiye'nin de benzer şekilde fon dağılımını çıktı odaklı kriterlerle yapılandırması, etkinliği artıracaktır [14][15].

- Romanya Örneğinden İlhamla Düşük Kaynakla Yüksek Katkı Sunabilecek Alanlara Odaklanılmalıdır:

Romanya, sınırlı Ar-Ge kaynağına rağmen yazılım ve niş teknoloji alanlarında hedefli yatırımlar yaparak sistem katkısını artırmıştır. Türkiye de benzer biçimde kaynaklarını stratejik odaklarda yoğunlaştırmalıdır [16].

- Uluslararası Koalisyonlar İçin Sistematik Katılım Stratejileri Geliştirilmelidir:

Güney Kore ve Almanya, Horizon Europe gibi çok taraflı Ar-Ge fonlarında aktif yer almaktadır. Türkiye de bu programlarda proje yürütücüsü olarak konumlanmalı, stratejik ortaklık ağları oluşturmalıdır [17].

- Türkiye İçin Performans İzleme Sistemi, Shapley Değeri Gibi Katkı Temelli Ölçütleri İçermelidir:

Shapley değeri gibi oyun teorisi temelli metrikler, sistem geneline yapılan marjinal katkıyı dikkate alarak daha adil bir değerlendirme sunar. Türkiye'nin performans izleme mekanizması da bu tür katkı temelli ölçütleri içermelidir [5][11].

Sonuç olarak bu çalışma, Ar-Ge verimliliğini ölçmede çok boyutlu yöntemlerin uygulanabilirliğini göstermiş; Türkiye'nin stratejik referans ülke seçiminde sadece teknik verimliliğe değil, sistemsel katkıya dayalı yeni bir çerçeve geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

[1] M. J. Farrell, "The measurement of productive efficiency," Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General), vol. 120, no. 3, pp. 253–290, 1957.

[2] T. J. Coelli, D. S. P. Rao, C. J. O'Donnell, and G. E. Battese, An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2005.

[3] M. J. Rezaee, "Using Shapley value in multi-objective data envelopment analysis: Power plants evaluation with multiple frontiers," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 69, pp. 141–149, 2015.

[4] W. D. Cook and L. M. Seiford, "Data envelopment analysis (DEA) – Thirty years on," European Journal of Operational Research, vol. 192, no. 1, pp. 1–17, 2009.

[5] L. S. Shapley, "A value for n-person games," in Contributions to the Theory of Games II, H. W. Kuhn and A. W. Tucker, Eds. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1953, pp. 307–317.

[6] M. T. Babaei and M. Toloo, "A Shapley value approach for ranking DMUs in DEA," Journal of the Operational Research Society, vol. 64, no. 11, pp. 1669–1676, 2013.

[7] OECD. (2024). Main Science and Technology Indicators. [Online]. Available: https://www.oecd.org/sti/msti.htm

[8] WIPO. (2024). WIPO Statistics Database. [Online]. Available: https://www.wipo.int/ipstats

[9] A. E. Roth, "The Shapley value as a tool for evaluating coalition formation in cooperative games," Games and Economic Behavior, vol. 4, no. 2, pp. 228–248, 1988.

[10] W. W. Cooper, L. M. Seiford, and K. Tone, Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses, New York, NY, USA: Springer, 2007.

[11] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 2(6), 429–444.

[12] L. M. Seiford and J. Zhu, "Context-dependent data envelopment analysis—Measuring attractiveness and progress," Omega, vol. 31, no. 5, pp. 397–408, 2003.

[13] Ministry of Science and ICT Korea (2023). Korean R&D Policy Framework.

[14] Federal Ministry of Education and Research, Germany (BMBF) (2023). Research and Innovation Strategy.

[15] European Commission (2020). Country Report Germany – Horizon 2020 Implementation.
[16] European Innovation Scoreboard (2023). Country Profile: Romania.
[17] European Commission (2023). Horizon Europe: International Cooperation.

Çevrimiçi Kullanıcı Davranışlarından Satın Alma Kararının Tahmini: Lojistik Regresyon Yöntemi ile Bir E-Ticaret Verisi Uygulaması

Mehmet Onur OLGUN

Endüstri Mühendisliği / Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakütlesi , Süleyman Demirel Üniversitesi , Türkiye
onurolgun@sdu.edu.tr

ÖZET

Dijitalleşmenin hız kazanmasıyla birlikte, e-ticaret platformları tüketiciler tarafından yoğun şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişme, kullanıcı davranışlarının analiz edilmesini ve bu davranışlara yönelik tahmin modellerinin geliştirilmesini işletmeler açısından stratejik bir gereklilik haline getirmiştir. Artan rekabet koşulları altında firmalar, yalnızca müşteri çekmekle kalmayıp, mevcut kullanıcıların çevrimiçi davranışlarını istatistiksel yöntemlerle analiz ederek pazarlama stratejilerini daha etkili biçimde yapılandırmak zorundadır. Bu bağlamda, satın alma olasılığının tahmin edilmesi; hedef kitleyi tanıma, kişiselleştirilmiş hizmet sunma ve müşteri bağlılığını artırma gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, çevrimiçi alışveriş yapan kullanıcıların site üzerindeki davranışları analiz edilerek, satın alma ile sonuçlanıp sonuçlanmayacağı lojistik regresyon modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Modelin başarımı; doğruluk oranı (accuracy), duyarlılık (recall), F1 skoru ve ROC-AUC gibi performans ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Özellikle sınıf dengesizliğine bağlı olarak modelin pozitif sınıfı tanıma kapasitesini artırmak amacıyla SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca modelin doğruluğunu ve yorumlanabilirliğini artırmak için çeşitli özellik seçimi (feature selection) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Çalışmanın sonucunda, lojistik regresyon modeli ile anlamlı sonuçlar elde edilmiş ve e-ticaret kullanıcı davranışlarını öngörmede bu yöntemin etkinliği ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, veri odaklı karar verme süreçlerinde lojistik regresyonun güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Lojistik Regresyon, E-Ticaret, Satın Alma Davranışı, Özellik Seçimi, SMOTE, Model Başarımı.

GİRİŞ

Dijitalleşmenin hızlanmasıyla birlikte e-ticaret, tüketiciler için yaygın bir alışveriş kanalı haline gelmiştir ve kullanıcı davranışlarının analiz edilmesini ve tahmin modelleri geliştirilmesini işletmeler açısından stratejik bir gereklilik haline getirmiştir. Artan rekabet ortamında firmalar, yalnızca müşteri çekmekle kalmayıp, satın alma davranışlarını istatistiksel yöntemlerle analiz ederek satış ve pazarlama stratejilerini optimize etmelidir. Bu sayede hedef kitleyi daha iyi tanıma, kişiselleştirilmiş hizmet sunma ve müşteri sadakatini artırma gibi önemli avantajlar elde edilebilir.

Bu çalışmada, çevrimiçi alışveriş yapan kullanıcıların site üzerindeki davranışlarına bakılarak satın alma ile sonuçlanıp sonuçlanmayacağını tahmin etmeye yönelik bir lojistik regresyon modeli oluşturulmuş ve bu modelin başarımı değerlendirilmiştir. Ek olarak, modelin başarısını etkileyen özelliklerin seçimi ve sınıf dengesizliğine karşı çözüm önerileri de ele alınmaktadır.

Amaç, kullanıcıların çevrimiçi alışveriş davranışlarına bakarak satın alma yapıp yapmayacaklarını tahmin edebilecek bir model kurmaktır. Kurulan modelin ne kadar doğru tahmin yaptığı analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinden e-ticaret alanında nasıl faydalı çıkarımlar yapılabileceği tartışılmıştır. Çalışmada veri analizi, model oluşturma, modelin doğruluğunu ölçme ve sonuçları yorumlama gibi aşamalara yer verilmiştir.

Bu doğrultuda geliştirilen veri odaklı yaklaşımlarla, yüksek boyutlu veri setlerinde modelin doğruluğunu ve yorumlanabilirliğini artırmak amacıyla 'feature selection' (özellik seçimi) yöntemleri uygulanmıştır, model üzerinde anlamlı etkisi olmayan değişkenler elenmiş, en etkili özellikler seçilerek model daha güçlü hale getirilmiştir.

E-ticaret verilerinde sıkça karşılaşılan sınıf dengesizliği problemi, modellerin özellikle satın alan kullanıcıları doğru tahmin etme yeteneğini düşürebilmektedir; bu durum da modelin genel olarak başarısını olumsuz etkiler. Tahmin performansını artırmak amacıyla SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) yöntemiyle de ele alınmıştır. Azınlık sınıfa ait örneklerin artırılması yoluyla modelin pozitif sınıfı daha sağlıklı tanıması hedeflenmiştir.[3]. Bu sayede modelin hem doğruluk oranı hem de özellikle pozitif sınıfa ait recall değeri artırılmaya çalışılmıştır.

Lojistik regresyon modeli, ikili sınıflandırma problemleri için teorik temeli güçlü, yorumlanabilirliği yüksek, her bir değişkenin hedef değişken üzerindeki etkisini sayısal olarak açıklama yeteneği olan bir yaklaşımdır. Literatürde müşteri sadakati, kredi riski ve sağlık gibi farklı alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. E-ticaret alanında yapılan çalışmalarda da lojistik regresyon modelleri %80'in üzerinde doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Liu (2024) çalışmasında kullanıcı davranışlarını modelleyerek %84 doğruluk elde etmiş, Nayeem (2022) ise sayfa deneyimi ve güvenlik algısının satın alma kararları üzerindeki etkisini lojistik regresyonla başarılı şekilde analiz etmiştir.

Çalışmanın literatüre katkısı iki başlıkta öne çıkmaktadır: İlk olarak, veri setindeki sınıf dengesizliği SMOTE yöntemi ile giderilmeye çalışılarak modelin tahmin gücü artırılmıştır. İkinci olarak, lojistik regresyon modeli ile satın alma davranışını etkileyen önemli değişkenler belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Tüm analizler Python programlama dili ile gerçekleştirilmiş, modelin e-ticaret uygulamalarında etkin şekilde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, veriye dayalı pazarlama stratejilerinin karar süreçlerindeki önemini vurgulamaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, çevrimiçi alışveriş yapan kullanıcıların satın alma davranışlarını tahmin edebilmek amacıyla, kullanıcıların alışveriş sürecinde gerçekleştirdiği çeşitli etkileşimler (sayfa görüntüleme, oturum süresi, çıkma oranı vb.) bağımsız değişkenler olarak ele alınmış ve bu değişkenlerin satın alma kararına etkisi lojistik regresyon temelli bir sınıflandırma modeli ile analiz edilmiştir.

Çalışmada kullanılan veri seti, UCI Machine Learning Repository'de yer alan Online Shoppers Purchasing Intention Dataset'tir [1]. Veri seti, toplamda 12.330 kullanıcı kaydından oluşmakta olup, kullanıcıların sitede geçirdikleri süre, inceledikleri sayfalar, çıkma oranı, ziyaret günleri ve hafta sonu bilgisi gibi özellikleri içermektedir. Hedef (bağımlı) değişken olarak, kullanıcının oturumu sonucunda satın alma yapıp yapmadığını gösteren "Revenue" sütunu kullanılmıştır. Bu sütun, ikili (0/1) formatında yapılandırılmıştır.

Veri seti analize hazırlanırken öncelikle eksik veri kontrolü yapılmış, eksik gözlem bulunmadığı tespit edilmiştir. Ardından kategorik değişkenler ("Month", "VisitorType", "Weekend") One-Hot Encoding yöntemiyle sayısal forma dönüştürülmüştür [2]. Sayısal değişkenlere ise gerekli görülen durumlarda standardizasyon uygulanmış, tüm değişkenler ortalaması 0, standart sapması 1 olacak şekilde normalize edilmiştir. Böylece farklı ölçeklerdeki değişkenlerin modele eşit katkı sağlamıştır. (EK1)

Modelleme sürecinde veri seti rastgele olarak %70 eğitim ve %30 test olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim seti modelin öğrenmesi için, test seti ise performansın değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Lojistik regresyon modeli Python programlama dili ve Scikit-learn kütüphanesi kullanılarak uygulanmış; model, LogisticRegression sınıfı ile oluşturulmuştur [4].

Modelin başarımı; doğruluk oranı (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall), F1 skoru ve ROC-AUC gibi performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Doğruluk oranı, modelin genel tahmin başarısını gösterirken; kesinlik, pozitif tahminlerin ne kadarının doğru olduğunu ifade eder. Duyarlılık, modelin gerçek pozitifleri ne ölçüde yakalayabildiğini belirtir. F1 skoru, kesinlik ve duyarlılığın dengeli bir birleşimidir. ROC-AUC ise modelin pozitif sınıfı diğerlerinden ayırt etme yeteneğini ölçer. Confusion Matrix gerçek ve tahmin edilen sınıflar arasındaki dağılımı, ne ölçüde ayırt edebildiğini daha net görebilmek adını karışıklık matrisi değerlendirilmesi yapılmıştır. Modeldeki değişkenlerin etkisini yorumlayabilmek için regresyon katsayıları incelenmiş, pozitif katsayılı değişkenlerin satın alma ihtimalini artırdığı; negatif katsayılı değişkenlerin ise azalttığı gözlemlenmiştir. Bu sayede satın alma kararını etkileyen kullanıcı davranışları belirlenmiş ve düşük etkili değişkenler analiz dışı bırakılarak sade bir model önerilmiştir.

Modelin daha yalın, yorumlanabilir ve genellenebilir olması amacıyla özellik seçimi (feature selection) işlemi uygulanmıştır. Başlangıçta 18 olan değişken sayısı, one-hot encoding sonrası 26'ya çıkmıştır. Aşağıdaki yöntemlerle özellik seçimi gerçekleştirilmiştir:

-Katsayı Temelli Seçim: Katsayısı düşük değişkenler elenmiştir.

-Korelasyon Analizi: Değişkenler arası yüksek korelasyon bulunmadığından eleme yapılmamıştır.

-Chi-Square Testi: Anlamlı bulunan 10 değişkenle model doğruluğu %86,6 olarak korunmuştur.

-L1 Regülerizasyonu (Lasso): Yalnızca *PageValues* anlamlı kalmış, doğruluk %84,3'e düşmüş ve pozitif sınıf başarısı azalmıştır.

-RFE (Recursive Feature Elimination): Aşamalı olarak etkisiz değişkenler elenmiş, 10 değişkenle %86,6 doğruluk korunmuştur.

E-ticaret verilerinde sıkça karşılaşılan sınıf dengesizliği problemi, bu çalışmada da gözlemlenmiştir. Pozitif sınıf olan "Revenue = 1" gözlemlerinin azlığı, modelin bu sınıfı doğru tahmin etme becerisini sınırlamaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla SMOTE yöntemi uygulanmış, azınlık sınıfa sentetik örnekler eklenerek sınıflar arasında denge sağlanmıştır [3].

BULGULAR

Lojistik regresyon modeli ile kullanıcıların satın alma davranışları tahmin edilmiştir ve modelin başarımını değerlendirebilmek amacıyla çeşitli performans metrikleri kullanılmıştır. Modelin test seti üzerindeki başarısı aşağıdaki metriklerle ölçülmüştür:

```
Doğruluk Oranı (Accuracy): 0.8661800486618005

Sınıflandırma Raporu:
              precision    recall  f1-score   support

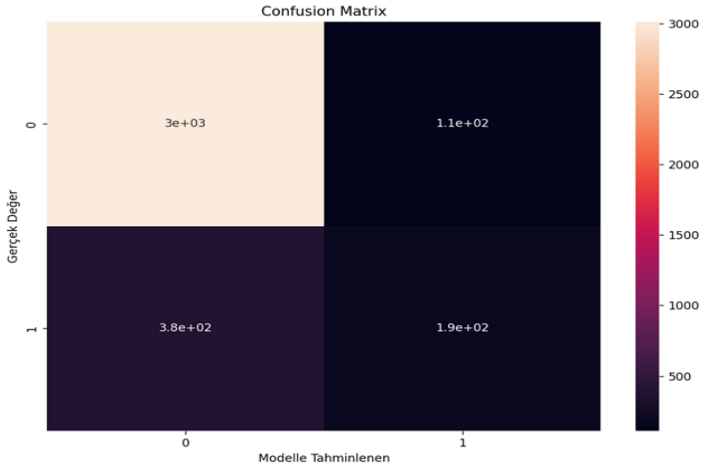
           0       0.89      0.96      0.92      3124
           1       0.63      0.33      0.44       575

    accuracy                           0.87      3699
   macro avg       0.76      0.65      0.68      3699
weighted avg       0.85      0.87      0.85      3699


Confusion Matrix:
 [[3012  112]
 [ 383  192]]
AUC Skoru:  0.6540299504537104
```

1.Kod çıktısı : Lojistik Regresyon Sonucu

Model, %86,6 doğruluk oranı ile genel olarak iyi bir performans sergilese de, pozitif sınıfı tanımada düşük başarı göstermiştir. Satın alma yapan kullanıcılar için recall değeri %33, F1 skoru ise %44 seviyesindedir. Bu da modelin çoğunluk sınıfa odaklandığını göstermektedir. AUC skoru 0,65 olup, modelin sınıflar arasında ayrım yapma gücünün orta düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.



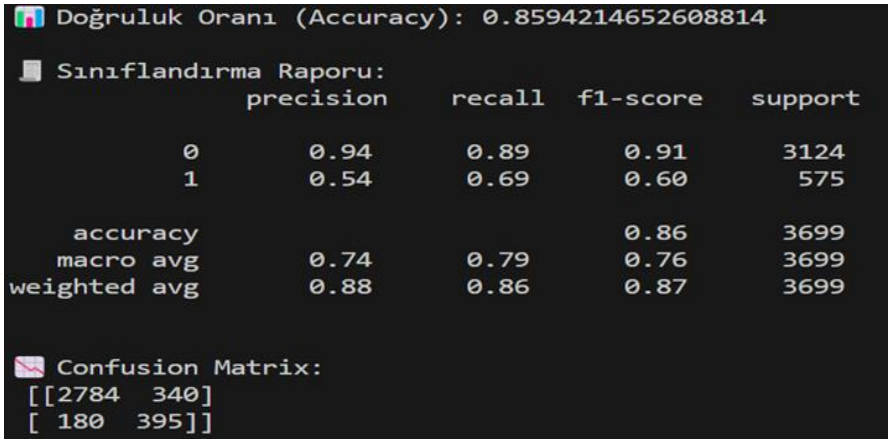
Şekil 2. Confusion Matrix ile Model Performansının Görselleştirmesi

Sınıflandırma performansını ortaya koymaktadır. Model, satın almayan kullanıcıları büyük ölçüde doğru tahmin ederken, satın alan kullanıcıları ayırt etmede daha düşük başarı göstermiştir. Görselde açık renkli alanlar yüksek doğru sınıflandırmaları, koyu alanlar ise düşük tahmin sayısını temsil etmektedir. Bu durum, modelin sınıf dengesizliğinden etkilendiğini göstermektedir.

Tablo 1. Özellik Seçimi Karşılaştırması

Yöntem	**Seçilen Özellik Sayısı**	**Accuracy**	**Recall (Pozitif Sınıf)**	**F1 Skoru**
Tüm özellikler	26	0,866	0,33	0,44
Korelasyon	26	0,866	0,33	0,44
Chi-Square	10	0,866	0,33	0,44
L1 (Lasso)	20	0,843	0,02	0,04
RFE	10	0,866	0,33	0,44

Chi-Square, Korelasyon ve RFE yöntemleriyle seçilen 10 değişken ile modelin doğruluk oranı (%86,6) ve F1 skoru (%44) korunmuştur. Buna karşın, L1 (Lasso) yöntemi ile elde edilen modelde, pozitif sınıfı tanıma oranı (recall) ciddi şekilde düşmüş (%2), bu da modelin dengesiz veri yapısında önemli sinyalleri göz ardı ettiğini göstermektedir.



2.Kod Çıktısı: SMOTE Uygulaması Sonuçları

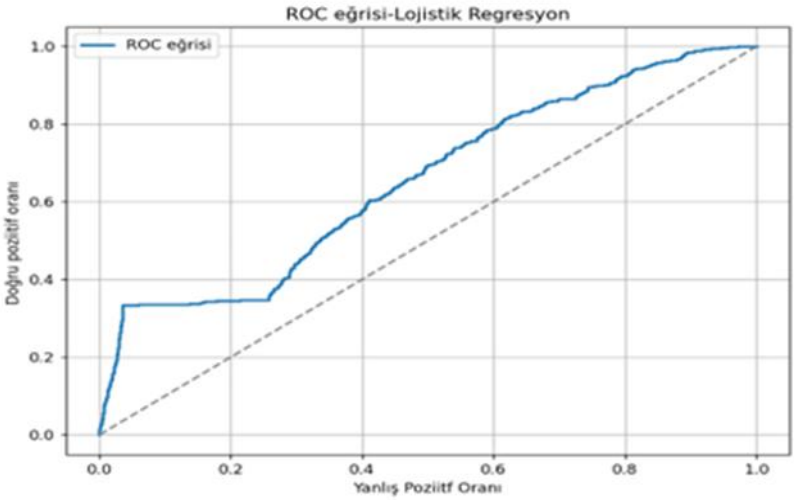
SMOTE yöntemi uygulandıktan sonra, modelin pozitif sınıfı tanıma performansında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Pozitif sınıfa ait recall değeri %69, F1 skoru ise %60 seviyesine yükselmiş, bu da modelin dengesiz sınıflardan kaynaklanan sorunları önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ancak genel doğruluk oranı (%85,9), dengesiz veride elde edilen %86,6 değerinin bir miktar altına düşmüştür. Karmaşıklık matrisi incelendiğinde, modelin satın alma yapan kullanıcıları daha başarılı şekilde sınıflandırdığı görülmektedir.

Modeldeki lojistik regresyon katsayıları incelenerek, satın alma kararını en çok etkileyen değişkenler belirlenmiş ve kullanıcı davranışları analiz edilmiştir. Aşağıdaki tablo, en yüksek etkiye sahip ilk beş özelliği göstermektedir:

	Özellik	Katsayı
7	ExitRates	-6.131442e-08
8	PageValues	3.364659e-10
5	ProductRelated_Duration	-1.560244e-10
1	Administrative_Duration	-5.685690e-11
3	Informational_Duration	-2.373909e-11

3.Kod Çıktısı

Lojistik regresyon modelinde yer alan bazı özelliklerin katsayı değerleri görülmektedir. Pozitif katsayıya sahip olan PageValues değişkeni, satın alma olasılığını artıran önemli bir faktör olarak öne çıkarken; ExitRates, ProductRelated_Duration ve Administrative_Duration gibi değişkenlerin negatif katsayıya sahip olması, bu değişkenlerin artmasının satın alma ihtimalini düşürdüğünü göstermektedir. Bu bulgu, kullanıcıların sitedeki gezinme davranışlarının satın alma kararlarını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Lojistik Regresyon Modeline Ait ROC Eğrisi

ROC eğrisi, modelin sınıflandırma performansını değerlendirmede kullanılan önemli bir metriktir. Eğrinin, rastgele sınıflandırmayı temsil eden 45°'lik çizginin üzerinde yer alması, modelin sınıfları ayırt etme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak eğrinin ideal (sol üst köşeye yakın) bir yapıdan uzak olması, ayrım gücünün sınırlı kaldığını ve modelin performansının iyileştirmeye açık olduğunu ortaya koymaktadır.

TARTIŞMA

1.Kod Çıktısı ve Şekil 1 temel alındığında, model genel doğruluk oranı açısından başarılı bir performans sergilemiştir (%86,6). Ancak bu başarı, pozitif sınıfa (satın alma yapan kullanıcılar) yansıyan sınıflandırma performansında gözlemlenememiştir. Özellikle %33'lük recall ve %44'lük F1 skoru, modelin çoğunluk sınıfa (satın almayanlar) odaklandığını ve asıl tahmin edilmek istenen davranışı yeterince temsil edemediğini göstermektedir. Confusion matrix'te pozitif sınıfa ait 575 örneğin yalnızca 192'si doğru tahmin edilmiştir. Bu durum, sınıf dengesizliğinin model başarısını sınırladığını açıkça ortaya koymaktadır.

Bu sınırlılığı gidermek amacıyla uygulanan SMOTE tekniği (2.Kod Çıktısı) ile modelin pozitif sınıfı tanıma başarısı anlamlı şekilde artmıştır. Recall oranının %69'a çıkması ve F1 skorunun %60'a yükselmesi, dengeleme yönteminin etkili bir sonuç verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca doğruluk oranı %85,9 ile önceki modele benzer kalmıştır. Bu çıktı, sınıf dengesizliğinin doğrudan performansı etkilediğini ve SMOTE gibi örnekleme tekniklerinin bu soruna yönelik çözüm sunduğunu göstermektedir.

Modelin genel ayrıştırma gücünü yansıtan ROC-AUC değeri, ilk modelde 0,65 (1.Kod Çıktısı – Şekil 1) iken, SMOTE sonrası 0,75'e (2.Kod Çıktısı – Şekil 2) yükselmiştir. Bu değer, modelin sınıflar arası ayrım yapma başarısının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Ayrıca, karar eşiğinin değiştirilerek daha fazla pozitif örneğin yakalanabileceği, dolayısıyla modelin farklı sınıflandırma senaryolarında kullanılabilir hale getirilebileceği düşünülmektedir.

Modelin regresyon katsayılarına (Kod Çıktısı 3) bakıldığında, PageValues değişkeni pozitif sınıfa ait davranışları en iyi açıklayan faktör olarak öne çıkmıştır. Kullanıcıların değerli içeriklere daha fazla zaman ayırmaları, satın alma ihtimalini artırmıştır. Bu bulgu, Liu (2024) tarafından belirtilen sayfa etkileşimlerinin etkisini desteklemektedir. Öte yandan BounceRates ve ExitRates gibi kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyen değişkenler, negatif katsayılara sahip olup satın alma ihtimalini azaltmaktadır. Bu sonuçlar da Nayeem (2022) tarafından ifade edilen kullanıcı ilgisi ve site etkileşiminin önemiyle örtüşmektedir.

Tablo 1'de yer alan özellik seçimi yöntemleri karşılaştırıldığında, Chi-Square ve RFE gibi yöntemler daha sade modeller sunarken, doğruluk oranında kayda değer bir düşüş olmamıştır. Ancak pozitif sınıf tahmininde anlamlı bir gelişme sağlanamamıştır. L1regülerizasyonu, baskın değişkenleri koruyarak modelde ciddi bir sadeleşme sağlamış, ancak bu durum pozitif sınıfı tanıma oranını düşürerek önemli bilgi kaybına neden olmuştur. Bu

bulgu, dengesiz veri setlerinde L1 gibi cezalandırıcı yöntemlerin dikkatli kullanılması gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, lojistik regresyon modeli e-ticaret kullanıcı davranışlarının analizinde anlamlı sonuçlar sunmaktadır. Ancak sınıf dengesizliği, özellikle pozitif sınıfın doğru tahmini açısından modelin temel zayıflığı olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle SMOTE gibi dengeleme tekniklerinin yanı sıra, XGBoost, Random Forest gibi alternatif algoritmaların da değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, modele sosyal, psikolojik ve ekonomik faktörlerin dahil edilmesi, modelin genellenebilirliğini ve tahmin gücünü artırabilir.

SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel amacı, çevrimiçi alışveriş yapan kullanıcıların oturum verilerini kullanarak satın alma davranışlarını lojistik regresyon yöntemiyle tahmin etmek ve kullanıcı davranışlarının bu karar üzerindeki etkilerini incelemektir. UCI veri seti kullanılarak oluşturulan modelde, veri ön işleme, sınıf dengesizliğini giderme ve özellik seçimi gibi aşamalar uygulanmış, elde edilen bulgular ışığında modelin genel doğruluk oranı %86,6 olarak hesaplanmıştır.

Her ne kadar doğruluk oranı yüksek olsa da, sınıf dengesizliği nedeniyle pozitif sınıfı tanıma başarısı sınırlı kalmıştır. Bu problemi azaltmak amacıyla uygulanan SMOTE yöntemi, modelin pozitif sınıfa olan duyarlılığını artırsa da sınıf dengesizliğini tam anlamıyla gidememiştir [1]. Öte yandan, PageValues, BounceRates ve ExitRates gibi değişkenlerin satın alma kararında belirleyici rol oynadığı görülmüş ve uygulanan Chi-Square, RFE ve L1regülerizasyonu gibi yöntemlerle model sadeleştirilerek yorumlanabilirliği artırılmıştır [7].

Bu bulgular ışığında aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

-Gelecek çalışmalarda, karar ağaçları, rastgele ormanlar (Random Forest), XGBoost ve yapay sinir ağları gibi farklı sınıflandırma algoritmalarının uygulanması modelin başarımını artırabilir [8], [4].

-Kullanıcı davranışlarını daha kapsamlı şekilde analiz edebilmek için farklı platformlardan toplanan daha büyük ve çeşitli veri kümeleriyle çalışılması önerilmektedir.

-Sadece teknik oturum verileriyle sınırlı kalınmadan, kullanıcıların sosyo-demografik özellikleri, cihaz kullanımı, alışveriş alışkanlıkları gibi ek faktörlerin de modele dahil edilmesi, tahmin gücünü artırabilir [10].

-Sınıf dengesizliği problemini daha etkili şekilde çözmek adına SMOTE dışında ADASYN, Borderline-SMOTE gibi alternatif yöntemlerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi faydalı olabilir [11].

-Lojistik regresyonun açıklayıcılığı avantaj sağlasa da, daha karmaşık ilişkileri modelleyebilecek esnek yöntemlerle birlikte hibrit yaklaşımlar değerlendirilebilir [9].

Sonuç olarak, bu çalışma e-ticaret alanında kullanıcı davranışlarından satın alma kararlarını tahmin etmenin mümkün olduğunu göstermekte ve veri temelli pazarlama stratejileri açısından önemli bir altyapı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] D. Sakar, S. Polat and Y. Katircioglu, “Real-Time Prediction of Online Shoppers’ Purchasing Intention using Machine Learning,” *UCI Machine Learning Repository*, 2019. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Online+Shoppers+Purchasing+Intention+Dataset

[2] G. James et al., *An Introduction to Statistical Learning*, Springer, 2013.

[3] N. Chawla et al., "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique," *JAIR*, vol. 16, pp. 321-357, 2002.

[4] Pedregosa et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *JMLR*, vol. 12, pp. 2825-2830, 2011.

[5] Liu, Y., "Predictive modeling of e-commerce purchase behaviors using logistic regression," 2024.

[6] Nayeem, T., "The impact of online security perception on consumer behavior," 2022.

[7] Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An introduction to variable and feature selection. *Journal of Machine Learning Research*, 3(Mar), 1157-1182.

[8] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.

[9] Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794.

[10] Li, H., & Karahanna, E. (2015). Online recommendation systems in e-commerce: A review and future directions. *Journal of the Association for Information Systems*, 16(2), 72–107.

[11] He, H., Bai, Y., Garcia, E. A., & Li, S. (2008). ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1322–1328.

Çimento Fabrikalarında Alternatif Yakıt Kullanımı ve Atık Besleme Sistemlerine Güncel Bakış

İlyas Fahri YEŞİLOT [1]

Kamil DELİKANLI[2]

1- Mak. Müh.; Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü.Isparta, Türkiye fahriyesilot@gmail.com ORCID: 0000-0002-7541-748X
2- Dr. Öğr. Üyesi; Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye kamildelikanli@sdu.edu.tr ORCID: 0000-0001-5074-7872

ÖZET

Çimento endüstrisi, yüksek enerji tüketimi ve karbon emisyonları nedeniyle sürdürülebilir üretim yaklaşımlarına yönelmektedir. Bu kapsamda fosil yakıtların alternatif yakıtlar ve atıklarla ikame edilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Bu kitap bölümünde, çimento üretiminde kullanılan alternatif yakıt türleri, atık besleme noktaları ve ön kalsinatör–döner fırın koşulları mühendislik bakış açısıyla ele alınmıştır. Ayrıca, klinker oranını azaltmaya yönelik kalsine kil (LC3) teknolojisi değerlendirilmiş; alternatif yakıtların güvenli ve sürekli biçimde prosese aktarılmasında kullanılan malzeme taşıma sistemleri incelenmiştir. Özellikle hava beslemeli bant konveyör sistemlerinin enerji verimliliği, toz kontrolü ve işletme güvenliği açısından sağladığı avantajlar vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Çimento, alternatif yakıt, atık besleme, hava beslemeli bant, kalsine kil.

GİRİŞ

Çimento endüstrisi, dünya genelinde enerji yoğunluğu en yüksek sektörlerden biri olup, küresel karbon dioksit (CO_2) emisyonlarının yaklaşık %7–8'inden sorumlu olması nedeniyle sürdürülebilirlik politikalarının merkezinde yer almaktadır. Artan enerji maliyetleri, fosil yakıt kaynaklarının sınırlılığı ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında getirilen çevresel regülasyonlar, çimento üreticilerini geleneksel üretim yaklaşımlarını yeniden değerlendirmeye zorlamaktadır.

Bu çerçevede alternatif yakıt ve atıkların çimento üretim proseslerinde kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel açıdan stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Çimento döner fırınları; yüksek işlem sıcaklığı, fazla hacimde gaz ve katı bekleme süresi ile atıkların güvenli biçimde birlikte yakılmasına olanak sağlayan endüstriyel üniteler arasında yer almaktadır. Bu özellikler sayesinde birçok atık türü, ek bir bertaraf tesisine ihtiyaç duyulmaksızın enerji geri kazanımı ve mineral geri dönüşüm prensipleri çerçevesinde değerlendirilebilmektedir.

Ancak alternatif yakıt kullanımının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, yalnızca fırın içi yanma koşullarının uygunluğuna bağlı değildir. Atıkların üretim prosesine sürekli, kontrollü ve güvenli biçimde beslenmesini sağlayan taşıma ve besleme sistemleri, bu yaklaşımın teknik açıdan en kritik bileşenlerinden biridir. Özellikle heterojen yapıya sahip, tane boyutu ve nem oranı değişken olan yakıt türlerinde; besleme sistemlerinin

tasarımı, işletme sürekliliği ve çevresel performans üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır.

Bu kitap bölümünde, çimento endüstrisinde alternatif yakıt kullanımının genel çerçevesi ele alınmakta; farklı yakıt türleri, potansiyel besleme noktaları ve kullanılan taşıma–besleme sistemleri mühendislik bakış açısıyla değerlendirilmektedir. Ayrıca, son yıllarda alternatif yakıt projelerinde yaygınlaşan hava beslemeli bant konveyör sistemleri, enerji verimliliği, çevresel etkiler ve işletme güvenliği açısından detaylı biçimde incelenmektedir. Bölümün amacı, akademik literatür ile endüstriyel uygulamalar arasında köprü kurarak, sürdürülebilir çimento üretimine yönelik teknik bir başvuru kaynağı sunmaktır.

1. ÇİMENTO ÜRETİM PROSESİNDE ALTERNATİF YAKITLARIN YERİ

Çimento klinkerinin oluşumunda fosil yakıtların alternatif yakıtlarla ikame edilmesi, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Lastikten türetilmiş yakıtlar (ÖTL) ve katı geri kazanılmış yakıtlar (ATY), yüksek ısıl değerleri ve çimento fırınlarının yüksek sıcaklık koşullarına uyumları sayesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Literatürde, lastikten türetilmiş yakıtların taşınması, depolanması ve besleme hızının kontrolü açısından kömüre kıyasla daha avantajlı olduğu; toz oluşumunun daha sınırlı olduğu ve işletme maliyetlerini düşürdüğü ifade edilmektedir (Aborawi, 2017).

Ön kalsinatörlü sistemlerde ATY kullanımı, atık üreticileri açısından güvenli bir nihai bertaraf seçeneği sunarken, çimento üreticileri için de enerji tahsisini optimize eden ve çevresel etkileri sınırlayan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Cembureau, 1999).

Atık malzemeler koku, biyolojik, yangın gibi çevresel ve iş güvenliği risklerinden dolayı mümkün olduğunda üretim tesisinden uzakta depolanmalıdır. Bu malzemelerin depo alanından düzenli bir şekilde bu riskleri önleyerek fırınlara beslenmesinin en uygun yöntemi hava beslemeli bantlardır.

2. ÇİMENTO ÜRETİMİNDE YENİLİK KALSİNE KİL (LC3)

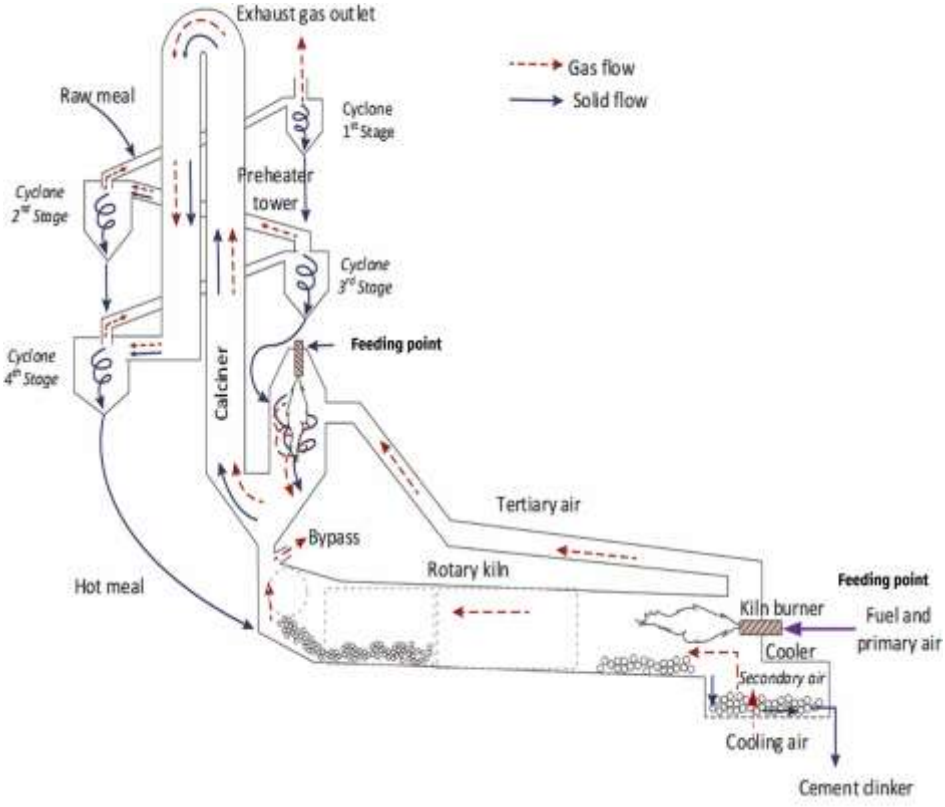
LC3, klinker, kireç taşı ve kalsine kilden oluşan bir karışımdır ve bu, çimentonun CO_2 emisyonlarının ana kaynağı olan klinkere olan ihtiyacı azaltır. LC3 üretimi, normal Portland çimentosuna (OPC) kıyasla

emisyonları %40'a kadar azaltabilir. Küresel çimento endüstrisinin dünya çapındaki CO_2 emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu göz önüne alındığında, bu düşüş, Paris Anlaşması gibi uluslararası iklim hedeflerine ulaşmada kilit bir rol oynayabilir. İnşaatın hızla büyüdüğü Hindistan'da LC3'ün benimsenmesi, ülkenin altyapı taleplerini karşılarken karbon ayak izini azaltma çabalarını da destekleyebilir ve yıllık milyonlarca ton CO_2 emisyonunun önüne geçebilir.

LC3'ün benimsenmesi, teknik avantajlarının yanı sıra ulusal çevresel hedeflerle uyum sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle, düşük karbon salımlı malzemelerin teşvik edildiği politikalar ve hükûmet destekli pilot projeler, LC3'ün geniş çaplı kullanımını destekleyebilir. Hindistan gibi büyük ve hızla gelişen bir pazarda, LC3'ün uzun vadeli dayanıklılık ve çevre dostu nitelikleri ile öne çıkarılması, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda önemli bir adım olacaktır.

3. ÇİMENTO FIRINLARINDA ATIK BESLEME NOKTALARI

Kuru proses çimento fırınlarında alternatif yakıt ve atık beslemesi için farklı noktalar bulunmaktadır. Bu noktaların seçimi, atığın fiziksel özellikleri, tane boyutu, nem oranı ve yanma davranışına bağlıdır. Literatürde tanımlanan başlıca potansiyel besleme noktaları şunlardır: Döner fırın çıkış ucundaki ana brülör, 1.) Döner fırın giriş ucunda yer alan geçiş odasındaki besleme oluğu (özellikle topaklanmış yakıtlar için), 2.) Döner fırının ana yakma odası ve ana yakıcı bölgesi.



Şekil 1 Ön Isıcı kulede atık besleme noktaları. (Kahawalage ve ark., 2023)

Bu bölgelerde gerçekleşen yanma süreçlerinde; nem buharlaşması, uçucu maddelerin açığa çıkması, gazlaşma ve kömür/atık yanması gibi olaylar belirleyici rol oynamaktadır. Katı parçacıkların genleşme–büzülme davranışları ve iç gözenek oluşumu, yanma kinetiğini doğrudan etkilemektedir (Nørskov, 2012).

4. ÖN KALSİNATÖR VE DÖNER FIRIN KOŞULLARI

Tipik bir çimento döner fırınında, katı malzeme sıcaklığı ön ısıtıcıdan kalsinatöre ve fırın içerisine doğru kademeli olarak artmaktadır. Döner fırın, klinkerleşme reaksiyonları için gerekli olan ısıyı sağlarken, yüksek derecede yakıt yanmasına da imkân tanır. Ön kalsinatör bölgesi ise kalsiyum karbonatın kalsiyum okside ayrıştığı ve aynı zamanda emisyonların kontrol edildiği kritik bir aşamadır (Bye, 1999).

Modern ön kalsinatör sistemleri, kullanılan yakıt türüne ve proses gereksinimlerine göre farklı tasarımlara sahiptir. Uzatılmış yükseltici kanallı,

ayrı hatlı ve sıralı kalsinatör tasarımları literatürde en yaygın kullanılan çözümler arasında yer almaktadır (Harder, 2002).

Önemli bir parametre Tutma süresi (retention time);

t=11,2 L / (r . D . s)

Burada L= fırın uzunluğu (metre), r=fırın hızı (rpm), D=etkin çap (metre), s=fırın eğimi (derece)

Tutma süresi çoğu kalsinatör ve ön ısıtıcı fırınlar için 20-30 dakika olmalıdır. Kalsinatör fırınlar daha kısa süreleri barındırabilir.

Hacim yükleme:

% yükleme = 1,67 FR . W . t / (L . A)

Burada FR=besleme oranı (kg klinker başına döner fırına giren malzeme kg), W= ton/saat cinsinden klinker üretimi, A= etkili fırın kesit alanı (m2)

Hacim yükleme, ön kalsinatör fırınlar için tipik olarak %7-8 olmalıdır ve ön ısıtıcı fırınlar için daha yüksektir.

Daha yüksek dönme hızı, klinker yükünün yüzeyinin alevin radyasyonuna maruz kalması ve (sıcak) refrakter ile temas eden yüzeyin klinker hacmine kıyasla daha yüksek olması nedeniyle yükün ısı transferini artırır. Tutma süresi çok kısa hale gelene kadar daha yüksek hız genellikle daha iyidir ve bu nokta fırın teknolojisine bağlıdır. Modern kalsinatör ve yüksek kalsinasyon derecesine sahip fırınların tutma süreleri 15 dakikadan daha kısa olabilmektedir. (Alsop, 2007)

5. ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YAKIT TÜRLERİ

Çimento fabrikalarında kullanılan yakıtlar genel olarak birincil (fosil) ve ikincil (alternatif) yakıtlar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Birincil yakıtlar arasında petrokok, taş kömürü ve linyit yer alırken; ikincil yakıtlar endüstriyel, ticari ve belediye kaynaklı atıklardan elde edilen enerji taşıyıcılarını kapsamaktadır.

Alternatif yakıtlar içerisinde en yaygın kullanılan türler şunlardır:

Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY/SRF/RDF): Belediye ve endüstriyel atıklardan elde edilen, tane boyutu ve ısıl değeri kontrol edilebilen yakıtlar olup ön kalsinatör ve fırın girişlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ömrünü Tamamlamış Lastik, Lastikten Türetilmiş Yakıt (ÖTL/TDF): Yüksek alt ısıl değere sahip olması ve kül içeriğinin klinker fazlarına uyumlu olması nedeniyle döner fırın uygulamalarında tercih edilmektedir.

Biyokütle Tabanlı Yakıtlar: Tarımsal atıklar, odun türevleri ve hayvansal atıklar gibi karbon ayak izi düşük yakıtlar olup, sürdürülebilirlik hedefleri açısından stratejik önem taşımaktadır.

Tehlikeli ve Endüstriyel Atıklar: Çözücüler, yağ çamurları ve proses atıkları gibi malzemeler, çimento fırınlarının yüksek sıcaklık ve uzun bekleme süresi avantajı sayesinde güvenli biçimde birlikte yakılabilmektedir.

Bu yakıtların kullanımında temel belirleyici faktörler; alt ısıl değer, nem oranı, klor ve ağır metal içeriği ile besleme sistemlerinin teknik yeterliliğidir. Bu nedenle yakıt seçimi, yalnızca enerji potansiyeline değil, aynı zamanda çevresel ve operasyonel uyumluluğa dayalı olarak değerlendirilmelidir.

6. ATIK BESLEME VE MALZEME TAŞIMA SİSTEMLERİ

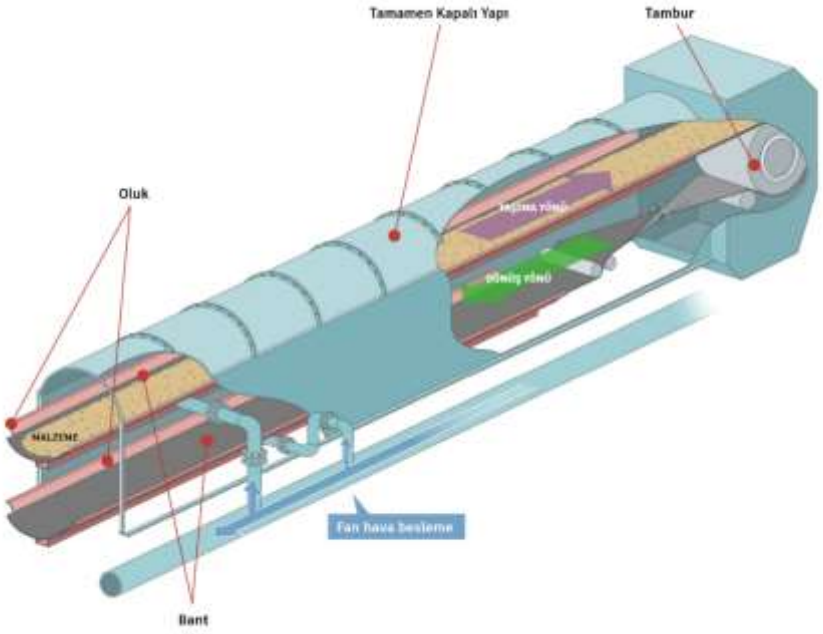
Alternatif yakıtların çimento fırınlarına beslenmesinde kullanılan malzeme taşıma sistemleri, prosesin sürekliliği ve işletme güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemler arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri lastik bantlı konveyörlerdir. Bantlı konveyörler; tasarım kolaylığı, işletme esnekliği, bakım gereksinimlerinin görece düşük olması ve farklı malzeme türlerine uyarlanabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir.

6.1. Klasik Lastik Bantlı Konveyörler

Klasik bantlı konveyör sistemleri, kuru veya ıslak malzemelerin yanı sıra taneli, çok parçalı veya pulverize yapıdaki atıkların taşınmasına imkân tanımaktadır. Eğimli taşıma uygulamalarında genellikle 20° sınırı esas alınmakta; standart bantlar -20 °C ile +125 °C sıcaklık aralığında çalışabilmektedir. Özel sentetik bantların kullanıldığı durumlarda bu sıcaklık sınırı daha da yükseltilebilmektedir (Yücel, 2009).

6.2. Hava Beslemeli Bant Konveyör Sistemleri

Son yıllarda özellikle ince taneli, heterojen ve tozuma eğilimi yüksek alternatif yakıtların taşınmasında hava beslemeli bant konveyör sistemleri ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerde bant, taşıyıcı yüzey üzerinde oluşturulan düşük basınçlı bir hava tabakası sayesinde hareket etmekte; böylece mekanik sürtünme önemli ölçüde azaltılmaktadır.



Şekil 2. Hava beslemeli bant genel yapısı. (Kawasaki Heavy Industries,2019)

Hava beslemeli bant genel konstrüksiyon yapısı şekilde gösterilmiştir. Sistemlerinin başlıca avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir: Bant ve taşıyıcı elemanlar arasındaki temasın azalması sayesinde enerji tüketiminin düşmesi,

- Mekanik aşınmanın azalması ve bakım periyotlarının uzaması,
- Kapalı sistem yapısı sayesinde toz emisyonlarının ve malzeme dökülmelerinin minimize edilmesi,
- Alternatif yakıt besleme hatlarında yangın ve patlama risklerinin azaltılması.

Bu özellikler, hava beslemeli bant konveyörleri özellikle SRF, TDF ve benzeri alternatif yakıtların çimento fırınına veya ön kalsinatöre taşınmasında uygun bir çözüm haline getirmektedir. Sistem, sürekli ve kontrollü besleme sağlaması açısından dozajlama üniteleri ile birlikte entegre biçimde tasarlanabilmektedir.

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Alternatif yakıtların çimento fabrikalarında etkin biçimde kullanılabilmesi, yalnızca fırın içi yanma koşullarının değil, aynı zamanda atık besleme ve taşıma sistemlerinin de bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bölümde sunulan değerlendirmeler, hava beslemeli bant konveyör sistemlerinin bu bütüncül yaklaşım içerisinde önemli bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Hava beslemeli bant konveyörler; düşük sürtünme prensibi sayesinde enerji verimliliğini artırmakta, kapalı yapı avantajı ile toz emisyonlarını ve çevresel etkileri azaltmakta, aynı zamanda alternatif yakıtların kontrollü ve sürekli biçimde beslenmesine olanak tanımaktadır. Özellikle ince taneli ve heterojen yakıt türlerinde sistem kararlılığı ve işletme güvenliği açısından klasik bantlı konveyörlere kıyasla belirgin üstünlükler sunmaktadır.

Tablo 1. Klasik bantlı konveyörler ile hava beslemeli bant konveyörlerin teknik karşılaştırması.

Kriter	Klasik Bantlı Konveyör	Hava Beslemeli Bant Konveyör
Sürtünme seviyesi	Yüksek	Düşük
Enerji tüketimi	Orta–yüksek	Düşük
Toz emisyonu	Açık sistemlerde yüksek	Kapalı sistemlerde çok düşük
Bakım gereksinimi	Periyodik ve yoğun	Daha seyrek
Alternatif yakıta uygunluk	Sınırlı	Yüksek
İşletme güvenliği	Orta	Yüksek

Endüstriyel uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, hava beslemeli bant sistemlerinin ön kalsinatör ve döner fırın besleme hatlarında kullanımı; bakım maliyetlerinin düşürülmesi, duruş sürelerinin azaltılması ve sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlanması bakımından stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, yeni kurulacak tesislerde ve

modernizasyon projelerinde hava beslemeli bant konveyörlerin değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aborawı, F. (2017). *The use of waste as an alternative fuel in cement factories* (Master Thesis) Karabük Üniversitesi. *Tez YÖK Ulusal Tez Merkezi*. https://hdl.handle.net/20.500.14619/13968

Alsop, P. A. (2007). Cement plant operations handbook: for dry process plants. Tradeship Publications Ltd.

Bye, G. C. (1999). *Portland cement: Composition, production and properties*. 2nd Edition-Thomas Telford Publishing.

Cembureau, B. (1999). *Best available techniques for the cement industry*. European Cement Association. *CEMBUREAU.*

Harder, J. (2002). Development of precalcining technology in the cement industry. ZKG INTERNATIONAL, 55(10), 34-41. ICR. (2019). *ICR's plant operations handbook* (7th ed.).

Kahawalage, A. C., Melaaen, M. C., & Tokheim, L. A. (2023). *Opportunities and challenges of using SRF as an alternative fuel in the cement industry.* Cleaner Waste Systems, 4, 100072.

Kawasaki Heavy Industries, Ltd. (2019). *Air-Supported Belt Conveyor Kawasaki Flow Dynamics Conveyor (FDC).* ANSWERS | Kawasaki's Solutions for the Future. https://answers.khi.co.jp/en/energy-environment/20191031e-01/

Nørskov, L. K. (2012). *Combustion of solid alternative fuels in the cement kiln burner.*

Yücel, A. (2009). *Sürekli akımlı konveyör sistemleri.* Makine Mühendisliği Dergisi, 50(596), 33–41.

Mühendislik Projelerinde Hacimsel Belirsizlik Yönetimi: Enterpolasyon Algoritmalarının Rolü

Mehmet DOĞRULUK[1]
Ayhan CEYLAN[2]

1- Öğr. Gör. Dr.; Hacettepe Üniversitesi Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü. mehmet.dogruluk@hacettepe.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6698-651X
2- Prof. Dr.; Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü. aceylan@ktun.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4408-4245

ÖZET

Mühendislik projelerinde toprak işleri, hem keşif–metraj süreçlerini hem de yapım maliyetlerini doğrudan belirleyen en kritik kalemlerdendir. Bu nedenle kazı–dolgu hacimlerinin güvenilir biçimde hesaplanması, proje planlamasından ihale dokümanlarına ve uygulama kontrolüne kadar birçok aşamada belirleyici rol oynar. Günümüzde bu hesaplar çoğunlukla sayısal/dijital arazi modelleri üzerinden yürütülmekte; böylece arazi yüzeyi daha ayrıntılı temsil edilerek sonuçlar daha hızlı üretilebilmekte ve farklı senaryolar arasında karşılaştırma yapmak kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen hacimlerin doğruluğu yalnızca ölçü noktalarının sayısına veya veri yoğunluğuna bağlı değildir. Arazi yüzeyini üretmek için kullanılan enterpolasyon yaklaşımı, yüzeyin gerçek topoğrafyayı ne ölçüde temsil ettiğini ve dolayısıyla hacim hesabının duyarlılığını doğrudan etkiler. Özellikle nokta sıklaştırma aşamasında tercih edilen algoritmalar; eğim kırıkları, yerel dalgalanmalar ve geçiş bölgelerinde farklı davranışlar göstererek hacim sonuçlarında anlamlı farklar doğurabilmektedir. Bu çalışmada yaklaşık 5 km uzunluğunda ve 200 m genişliğinde bir koridor alanı test bölgesi olarak ele alınmış; altı farklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak altı ayrı sayısal arazi modeli üretilmiştir. Modellerin araziyi temsil başarımı, kontrol noktaları üzerinden istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiş; Kriging enterpolasyonunun arazi gözlemleriyle en uyumlu sonuçları verdiği belirlenmiştir (± 0.148 m). Ardından, araziyle iyi uyum gösteren yüzeyler ile proje yüzeyi arasında gerçekleştirilen kazı–dolgu hacim hesapları karşılaştırılmış ve uygun yöntem seçimiyle hacimlerin %1'in altında bağıl doğrulukla hesaplanabildiği görülmüştür. Elde edilen bulgular, hacim hesabı çalışmalarında enterpolasyon tercihinin ikincil bir ayrıntı olarak görülmemesi gerektiğini; yöntem seçiminin hem yüzey temsiline hem de nihai metraj sonuçlarına ölçülebilir düzeyde yansıdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Koridor Tipi Mühendislik Projeleri, S*ayısal Arazi Modeli, Enterpolasyon Yöntemleri, Kazı-Dolgu Hacim Hesabı.*

GİRİŞ

Mühendislik projelerinde "arazi ile uyumlu tasarım" ilkesi, projenin doğal topoğrafya üzerinde minimum değişikliği yapacak şekilde planlanmasını esas alır. Bu yaklaşım, çevresel tahribatı sınırlarken eş zamanlı olarak yapım maliyetlerini düşürmeyi hedefler (Marcucci ve Jordan 2013:4; Hare vd., 2011:6). Ancak uygulamada; işlevsel gereksinimler, geometrik standartlar, güvenlik koşulları ve arazi kısıtları nedeniyle projelerin topoğrafyaya "olduğu gibi" oturtulması çoğu zaman mümkün değildir. Bu zorunluluk, arazi yüzeyinde kazı ve dolgu başta olmak üzere kapsamlı toprak işlerini beraberinde getirir. Yol, demiryolu, enerji iletim hatları ve boru hatları

gibi altyapı projelerinde temel bir iş kalemi olan toprak işleri, yapım maliyetini doğrudan belirleyen en kritik bileşenlerden biridir (Cheng ve Jiang 2013:1; Goktepe ve Lav 2004:2). Dolayısıyla, projenin erken aşamalarında kazı–dolgu hacimlerinin yüksek doğrulukla öngörülmesi; bütçe planlaması, güzergâh alternatiflerinin karşılaştırılması ve ihale süreçlerinin yönetimi açısından hayati önem taşır.

Tarihsel süreçte kazı–dolgu hesapları, belirli aralıklarla alınan en kesit alanlarının karşılaştırılması ve aradaki hacmin geometrik yaklaşımlarla türetilmesi esasına dayanmıştır. Ancak ölçme teknolojilerindeki gelişmeler ve dijital veri üretiminin yaygınlaşması, bu hesapların Sayısal Arazi Modelleri (SAM) üzerinden daha bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesini mümkün kılmıştır. 1960'lı yıllardan bu yana mühendislik uygulamalarında kullanılan SAM; arazinin topografik yapısını sayısal ortamda temsil ederek geçki analizi, drenaj değerlendirmeleri ve hacim hesapları gibi birçok süreçte ana altlığı oluşturur (Petrie ve Kennie, 1987:86; El-Sheimy vd., 2005: 51).

SAM tabanlı hacim hesaplarının güvenilirliği, modelin araziyi temsil gücüne, yani gerçek yüzeye ne kadar yaklaştığına bağlıdır. Özellikle eğim kırıkları ve engebeli arazilerde yüzeyin yetersiz temsili, hacim tahminlerinde ciddi sapmalara yol açabilir. Bu temsil gücü iki temel parametre ile ilişkilidir: (i) veri noktalarının mekânsal dağılımı/yoğunluğu ve (ii) bu noktalardan sürekli yüzey türetmek için kullanılan enterpolasyon yöntemi. Nokta yoğunluğu ne kadar yüksek olursa olsun, farklı enterpolasyon algoritmaları aynı veri setinden farklı karakterde yüzeyler üretebilir. Bu durum, enterpolasyon tercihini teknik bir ayrıntı olmaktan çıkarıp, metrajın sonucunu belirleyen temel bir karar haline getirmektedir.

Literatür incelendiğinde, yöntem seçiminin hacim sonuçlarında ölçülebilir farklar yarattığı görülmektedir. Örneğin Yanalak ve Baykal (2003), teorik yüzeyler üzerindeki testlerinde enterpolasyon yönteminin hacim hesabına etkisini ortaya koymuştur. Son yıllarda İHA fotogrametrisi, lazer tarama ve hatta yapay zekâ destekli yaklaşımların sürece dahil olmasıyla veri toplama hızlanmış; ancak modelleme aşamasındaki yüzey oluşturma mantığı önemini korumuştur (Töreyen vd., 2024:2). İster klasik yöntemlerle ister modern İHA verileriyle çalışılsın, nokta bulutundan anlamlı bir yüzey (ve dolayısıyla hacim) üretmek, matematiksel bir tahmin sürecidir ve bu sürecin başarısı seçilen yönteme bağlıdır (Yılmaz, 2007; Yılmaz, 2009; Yang vd., 2004; Yiğit, 2003:41).

Bu bağlamda çalışmanın amacı; bir test alanı üzerinde, farklı enterpolasyon yöntemleriyle üretilmiş altı ayrı SAM'in performansını karşılaştırmaktır. Çalışmada, modellerin araziyi temsil başarımı istatistiksel ölçütlerle irdelenecek ve bu farkların nihai kazı-dolgu metrajlarına nasıl yansıdığı nicel olarak ortaya konulacaktır. Bölümün devamında; hacim hesabına ilişkin temel kavramlar özetlenecek, ardından kullanılan enterpolasyon yöntemleri detaylandırılacaktır. Son olarak, test sahası verileri

üzerinden yapılan analizler ve hacim karşılaştırmaları tartışılarak, mühendislik projeleri için en uygun yaklaşım önerilecektir.

Enterpolasyon Yaklaşımları

Mühendislik projelerinde hacim hesaplarına temel teşkil eden yüzey modellerinin sürekliliğini sağlamak amacıyla, nokta veri setleri üzerinde enterpolasyon işlemleri uygulanır. Bu süreçte tercih edilen yöntem; yüzeyin pürüzlülük karakteri, yerel ekstremumların korunması, eğim kırıklarının temsili ve veri boşluklarının doldurulma biçimi üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Dolayısıyla, aynı veri setinden hareket edilse dahi, seçilen algoritmaya bağlı olarak üretilen yüzey geometrisi ve buna bağlı hacim sonuçları farklılaşabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ve literatürde yaygın kabul gören temel enterpolasyon yaklaşımları aşağıda özetlenmiştir.

- Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) / Ağırlıklı Ortalama Yöntemi: Deterministik yöntemler sınıfında yer alan bu yaklaşımda, bilinmeyen bir noktanın yükseklik değeri, kendisine komşu olan örnek noktaların mesafeye bağlı ağırlıklı ortalaması alınarak kestirilir. Yöntemin hassasiyetini belirleyen temel parametre ağırlık kuvvetidir (p). Bu değer arttıkça hesaplama noktasının yakın çevresindeki verilerin etkisi baskın hale gelirken, uzak noktaların etkisi azalır. Ayrıca hesaplama verimliliğini artırmak ve yerelliği sağlamak adına işleme dahil edilecek komşu noktalar, belirli bir arama yarıçapı veya elipsi ile sınırlandırılabilmektedir (Franke, 1982: 141; Inal vd., 2002:11).
- Kriging Yöntemi: Deterministik yaklaşımlardan farklı olarak Kriging, veriler arasındaki mekânsal otokorelasyonu dikkate alan jeoistatistiksel bir yöntemdir (Journel ve Huijbregts, 1978; Trangmar vd., 1985). Ağırlık katsayıları sadece geometrik uzaklığa göre değil, verinin mekânsal değişim yapısını modelleyen variogram fonksiyonuna göre belirlenir. Uygulama sürecinde öncelikle örnek çiftleri arasındaki varyansın mesafeyle değişimini ifade eden deneysel variogram oluşturulur (Isaaks ve Srivastava, 1989:25). Ardından bu deneysel yapıya en uygun teorik model (küresel, üssel vb.) seçilerek parametreler kestirilir (Yaprak, 2007:54; Chaplot vd., 2006:18). Ordinary, Simple ve Universal gibi türevleri bulunan yöntemde; özellikle Universal Kriging, verideki trendin modellenmesi, artıklar üzerinden hesaplama yapılması ve trendin sonuca tekrar eklenmesi prensibiyle çalışmaktadır (Meng vd., 2013).
- En Küçük Eğrilik (Minimum Curvature) Yöntemi: Bu yöntem, veri noktalarından geçen ve mümkün olan en az bükülmeye sahip, fiziksel olarak "elastik" bir levhaya benzetilebilecek pürüzsüz bir yüzey üretmeyi hedefler. Yüzeyin rijitlik ve esneklik davranışı, 0 ile 1 arasında değer alan iç gerilme ve sınır gerilme parametreleri ile kontrol edilir. Bu parametrelerin değeri arttıkça yüzeyin bükülme

miktarı azalmakta ve daha gergin bir yapı elde edilmektedir (Smith ve Wessel, 1990:9).

- Modifiye Shepard Yöntemi: Klasik Ters Mesafe Ağırlıklı yönteminin hesaplama yükünü hafifletmek ve veri noktaları etrafında oluşan "boğa gözü" etkisini minimize etmek amacıyla geliştirilmiş yerel bir yaklaşımdır (Renka, 1988; Basso vd., 1999). Klasik Shepard yöntemi global bir fonksiyon kullanarak tüm veri setini hesaba katarken; Modifiye Shepard yöntemi, kestirim işlemini yalnızca ilgili noktaya belirli bir uzaklıktaki veya sayıdaki en yakın komşularla sınırlar. Ağırlık fonksiyonunun yerel bir yarıçap içinde tanımlanmasıyla uzaktaki noktaların etkisi elimine edilir; böylece hem işlem hızı artırılır hem de yüzeyin yerel değişimlere duyarlılığı iyileştirilir (Franke ve Nielson, 1980:19).
- Radyal Temelli Fonksiyonlar (RBF): Bu yaklaşımda yüzey, her bir veri noktası merkezli tanımlanan radyal temel fonksiyonların (Inverse Multiquadric, Multilog, Thin Plate Spline vb.) doğrusal bileşimi olarak modellenir. Yöntem, veri noktalarından birebir geçen (kesin) bir enterpolasyon tekniğidir (Hardy, 1990; Kansa, 1990). Oluşturulan yüzeyin topolojisi üzerinde en belirleyici unsur, seçilen baz fonksiyonu ve özellikle yumuşatma (smoothing) parametresidir. Parametre seçimi, yüzeyin veriye uyumu ile pürüzsüzlüğü arasındaki dengeyi kurmak açısından kritiktir (Carlson ve Foley, 1991:29; Dressler, 2009:9; Rippa, 1999; Wang ve Liu, 2002).
- Lokal Polinomlar Yöntemi: Küresel (global) polinom yöntemlerinden farklı olarak bu yaklaşım, tüm veri setine tek bir yüzey uydurmak yerine; kestirim yapılacak noktanın etrafındaki belirli bir arama penceresi (elips/daire) içinde kalan veri grubuna düşük dereceli (1., 2. veya 3. derece) bir polinom yüzeyi uydurulması esasına dayanır. En Küçük Kareler Yöntemi ile çözülen bu yerel yüzeyler, verideki yerel eğilimleri ve bölgesel değişimleri yakalamakta etkilidir. Polinomun derecesi ve ağırlıklandırma parametreleri yüzeyin uyum başarısını doğrudan etkiler.

Hacim Hesaplama Yöntemleri

Oluşturulan yüzey modelleri kullanılarak kazı ve dolgu hacimlerinin kestirilmesi, temelde iki yüzey (referans yüzey ve proje yüzeyi) arasında kalan geometrik cismin hacminin matematiksel entegrasyonuna dayanır (Yanalak, 2003). Literatürde bu amaçla prizmalar yöntemi ya da ızgara tabanlı yaklaşımlar sıkça kullanılsa da özellikle karayolu, demiryolu ve kanal gibi doğrusal (lineer) mühendislik yapılarında endüstri standardı olarak kabul gören yaklaşım paralel kesitler yöntemidir. Bu yöntem, belirlenen bir güzergâh ekseni boyunca arazinin ve proje yüzeyinin belirli aralıklarla (örneğin 20 m) dilimlenmesi ve ardışık iki kesit alanı ortalamasının kesitler

arası mesafeyle çarpılması (Ortalama Alanlar Yöntemi) prensibine dayanır (Ghilani ve Wolf, 2012: 65). Prizmatik yöntemler yüzeyi bütüncül bir yaklaşımla ele alırken, paralel kesitler yöntemi hacim değişiminin güzergâh boyunca (kilometraj bazında) izlenmesine ve yerel hataların kesit bazında kontrol edilmesine olanak tanır. Ayrıca, geleneksel ihale ve hakediş süreçlerindeki metraj standartlarıyla tam uyumlu olması, yöntemin pratik değerini artırmaktadır (Yanalak, 2005: 22). Bu çalışmada test edilen farklı enterpolasyon yöntemlerinin etkisini proje gerçeklerine en uygun şekilde analiz edebilmek amacıyla, hacim hesaplamaları paralel kesitler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesitler arası mesafe sıklaştırılarak entegrasyon hatası minimize edilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Enterpolasyon yöntemlerin performansını gerçekçi koşullarda test etmek amacıyla, doğrusal mühendislik projelerini (karayolu, demiryolu vb.) temsilen 5.3 km uzunluğunda ve ortalama 200 m genişliğinde bir koridor, uygulama sahası olarak seçilmiştir. Yaklaşık 115 hektarlık bir alanı kapsayan bu bölgede, arazi yüzeyini tanımlayan nokta verileri Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) ölçme tekniği ile toplanmış olup; veri setinin nokta yoğunluğu ortalama 38 nokta/hektar düzeyindedir. Şekil 1'de deney alanı ve toplanan veriler gösterilmektedir.



Şekil 1: Deney alanı

Çalışma kapsamında, toplanan bu ham veriler kullanılarak altı farklı enterpolasyon yöntemi (Ağırlıklı Ortalama, Kriging, En Küçük Eğrilik, Modifiye Shepard, Radyal Temelli Fonksiyonlar ve Lokal Polinomlar) ile deney alanını temsil eden yüzeyler üretilmiştir. Modelleme ve analiz işlemleri yüzey hassasiyetini korumak adına enterpolasyon grid (ağ) noktalarının aralığı 5 m olarak belirlenmiştir.

Hacim hesaplarının karşılaştırılması için, söz konusu koridor üzerinde 12 m platform genişliğine sahip, iki şeritli teorik bir karayolu güzergâhı tasarlanmıştır. Kazı ve dolgu miktarları, ülkemizdeki hakediş standartlarına uygun olarak paralel kesitler yöntemi ile ve 20 m kesit aralığı kullanılarak hesaplanmıştır.

Farklı enterpolasyon yöntemlerinin performansını nesnel bir ölçütle karşılaştırabilmek amacıyla, üretilen yüzey modelleri ile arazideki gerçek kontrol noktaları arasındaki uyumsuzluklar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, modelin genel doğruluk seviyesini belirlemek için literatürde en yaygın kullanılan güvenilirlik ölçütü olan Karesel Ortalama Hata (KOH) esas alınmıştır. Yüzeyin gerçek topoğrafyadan sapma miktarını ifade eden KOH değeri; kontrol noktalarındaki gerçek yükseklikleri ($Z_{gerçek}$) ile enterpolasyon sonucu kestirilen yükseklikler (Z_{model}) arasındaki farkların (artıkların) karesel ortalamasının karekökü olarak, Eşitlik 1'deki gibi hesaplanmıştır:

$$KOH = \pm\sqrt{\frac{\sum(Z_{gerçek} - Z_{model})^2}{n-1}} \quad (1)$$

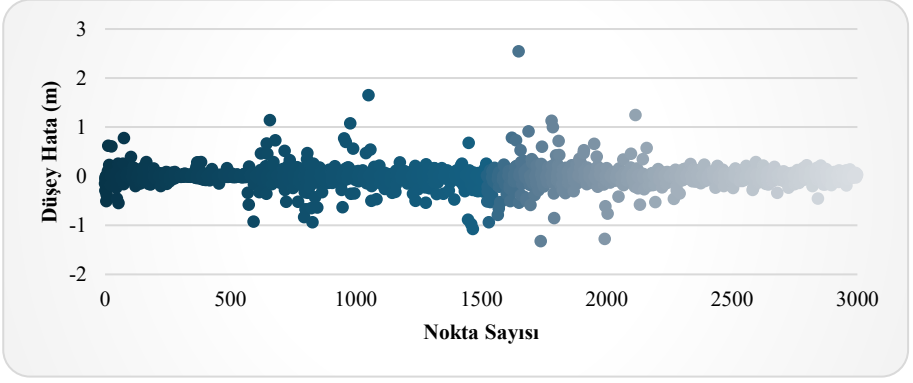
SONUÇ

Farklı enterpolasyon yöntemleriyle üretilen yüzeylerin arazideki gerçek geometriyi temsil kabiliyeti, kontrol noktaları üzerindeki kalıntı hatalar ve KOH değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, yöntem seçiminin yüzey doğruluğu üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar yarattığını göstermektedir. Yöntemlere ait istatistiksel karşılaştırma Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Enterpolasyon sonuçlarının değerlendirmesi

Enterpolasyon Yöntemi	Minimum (m)	Maksimum (m)	KOH (m)
Ağırlıklı Ortalama	-2,423	3,535	± 0,190
Kriging	-1,409	2,589	± 0,148
Radyal Temelli Fonksiyonlar	-1,402	2,616	± 0,152
Modified Shepard's	-1,957	2,313	± 0,160
Lokal Polinomlar	-2,243	2,762	± 0.221
En Küçük Eğrilik	-2,466	3,513	± 0,250

Verinin mekânsal otokorelasyonunu ve yönsel değişimini dikkate alan Kriging yöntemi ± 0.148 m'lik KOH değeri ile test edilen yöntemler arasında en yüksek doğruluğu sağlamıştır. Şekil 2'de Kriging yöntemine ait artıkların istatistiksel dağılımı gösterilmektedir. Bu veriler incelendiğinde; hataların %71'lik kısmının 0.05 m gibi oldukça dar bir aralıkta toplandığı, %98'inin ise 0.50 m sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu durum, Kriging yönteminin sadece ortalamada değil, noktasal bazda da kararlı ve güvenilir bir yüzey ürettiğini işaret eder.



Şekil 2: Kriging Yöntemi ile elde edilen yükseklik artıklarının saçılım grafiği

Kriging yöntemini, 0.152 m hata ile Radyal Temelli Fonksiyonlar ve 0.160 m hata ile Modifiye Shepard yöntemleri izlemekte olup, bu yöntemlerin de Kriging'e oldukça yakın bir temsil başarısı sergilediği belirlenmiştir. Buna karşılık, yüzeyin esnekliğini simüle eden En Küçük Eğrilik yöntemi (0.250 m) ve Lokal Polinomlar (0.221 m) yöntemlerinde hata değerlerinin belirgin şekilde arttığı ve artıkların dağılım aralığının (min/max) genişlediği gözlemlenmiştir.

Yüzey modellemesindeki bu hassasiyet farkları, mühendislik projelerinin en kritik kalemi olan hacim hesaplarına kümülatif olarak yansımıştır. Araziyi en yüksek doğrulukla modellediği tespit edilen Kriging yüzeyi referans kabul edilerek yapılan karşılaştırmalı analizde, yöntemlerin

toplam toprak işi hacminde yarattığı sapmalar Tablo 2'de özetlenmiştir. Analiz sonuçları irdelendiğinde, yüzey modelleme başarısı (düşük KOH) ile hacimsel tutarlılık arasında doğrudan ve güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir. Referans kabul edilen Kriging yöntemi ile kıyaslandığında; Modifiye Shepard yöntemi toplam toprak işi hacminde sadece -133 m^3'lük bir sapma göstererek, %0.1 gibi ihmal edilebilir düzeyde bir bağıl hata oranı yakalamıştır. Benzer şekilde Radyal Temelli Fonksiyonlar yöntemi de +1,970 m^3'lük fark ve %0.8'lik hata oranı ile güvenilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Buna karşılık, yüzey temsil gücü daha zayıf olan Ağırlıklı Ortalama ve En Küçük Eğrilik yöntemlerinde hacimsel sapmaların sırasıyla -12,159 m^3'lük (%5.5) ve -9,819 m^3'lük (%4.4) seviyelerine ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu bulgular, Kriging gibi jeoistatistiksel yöntemlerin veri yapısı veya uzmanlık gereksinimi nedeniyle uygulanamadığı durumlarda, Modifiye Shepard yönteminin yüksek hacimsel doğruluğu sayesinde en güçlü alternatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 2: Farklı enterpolasyon yöntemleri ile hesaplanan kazı-dolgu hacimleri ve bağıl hata oranları

Enterpolasyon Yöntemi	Kazı Hacmi (m^3)	Dolgu Hacmi (m^3)	Toplam Toprak İşi (m^3)	Fark (m^3)	Hata (%)
Kriging (referans)	123,320	108,337	231,657	-	-
Ağırlıklı Ortalama	117,784	101,713	219,497	-12,159	5.5
Radyal Temelli Fonksiyonlar	124,582	109,045	233,627	+1,970	0.8
Modified Shepard's	122,120	109,404	231,524	-133	0.1
Lokal Polinomlar	119,614	106,486	226,099	-5,557	2.4
En Küçük Eğrilik	118,698	103,140	221,838	-9,819	4.4

Mühendislik projelerinin maliyet ve süre yönetiminde en kritik bileşenlerden biri olan toprak işleri (kazı ve dolgu), projenin hem planlama aşamasındaki bütçe kestirimlerinde hem de uygulama sürecindeki hakediş ödemelerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışmada, doğrusal bir hat boyunca uzanan projelerde (yol, kanal, demiryolu vb.), sayısal arazi modellemesinde kullanılan enterpolasyon yönteminin hacim hesaplarına etkisi irdelenmiş. Elde edilen bulgular ışığında, mühendislik uygulamalarına ve gelecek araştırmalara yönelik şu öneriler geliştirilebilir:

- Doğrulama Zorunluluğu: Hacim hesaplarına geçilmeden önce, bilgisayar ortamında üretilen yüzey modelinin araziyi temsil yeteneği mutlaka test edilmelidir. Körlemesine bir yöntem seçimi yerine, proje sahasındaki kontrol noktaları üzerinden hesaplanan Karesel Ortalama Hata (ya da standart sapma) değeri en düşük olan yöntem tercih edilmelidir.
- Veri Kaynağı Çeşitliliği: Bu çalışmada yersel ölçümler (RTK-GNSS) kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda, günümüzde yaygınlaşan İHA ve

LiDAR teknolojileri ile elde edilen yoğun nokta bulutlarının, farklı enterpolasyon yöntemleri altındaki davranışı incelenmelidir. Özellikle nokta yoğunluğunun, enterpolasyon hatasını minimize etmedeki rolü araştırılmalıdır.

- Yapay Zekâ Destekli Tahmin: Klasik enterpolasyon yöntemlerinin yanı sıra, derin öğrenme ve yapay sinir ağları tabanlı yüzey tahmin algoritmalarının hacim hesaplarındaki performansı, geleneksel yöntemlerle kıyaslamalı olarak ele alınmalıdır.

Sonuç olarak; toprak işleri hesaplamalarında enterpolasyon yöntemi seçimi teknik bir detay değil, projenin ekonomisini doğrudan etkileyen bir mühendislik kararıdır. Özellikle koridor tipi projelerde, arazinin yerel değişimlerine duyarlı yöntemlerin kullanılması, metraj güvenilirliğini artıracaktır.

REFERANSLAR

Basso, K., De Avila Zingano, P. R., ve Dal Sasso Freitas, C. M. (1999). Interpolation of scattered data: Investigating alternatives for the modified Shepard method. *Proceedings of the XII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing* içinde (ss. 39-47). IEEE.

Cakir, L. (2011). Modified quadratic Shepard and radial basis functions interpolations for determination of orthometric heights from global positioning system (GPS) heights. *International Journal of Physical Sciences*, *6*, 8183-8187.

Carlson, R. E., ve Foley, T. A. (1991). The parameter R2 in multiquadric interpolation. *Computers & Mathematics with Applications*, *21*, 29-42.

Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., ve Phachomphon, K. (2006). Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, *77*, 126-141.

Cheng, J. C., ve Jiang, L. J. (2013). Accuracy comparison of roadway earthwork computation between 3D and 2D methods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *96*, 1277-1285.

Dressler, M. (2009). *Art of surface interpolation*. Technical University of Liberec.

El-Sheimy, N., Valeo, C., ve Habib, A. (2005). *Digital terrain modeling: Acquisition, manipulation and applications*. Artech House.

Franke, R. (1982). Scattered data interpolation: Tests of some methods. *Mathematics of Computation*, *38*, 181-200.

Franke, R., ve Nielson, G. (1980). Smooth interpolation of large sets of scattered data. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, *15*, 1691-1704.

Goktepe, A. B., ve Lav, A. H. (2004). Method for optimizing earthwork considering soil properties in the geometric design of highways. *Journal of Surveying Engineering*, *130*, 183-190.

Hardy, R. L. (1990). Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method 20 years of discovery 1968–1988. *Computers & Mathematics with Applications*, *19*, 163-208.

Hare, W. L., Koch, V. R., ve Lucet, Y. (2011). Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming. *European Journal of Operational Research*, *215*, 470-480.

Inal, C., Turgut, B., ve Yiğit, C. O. (2002). Lokal alanlarda jeoit ondülasyonlarının belirlenmesinde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması. *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu* içinde, Konya.

Isaaks, E. H., ve Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistics*. Oxford University Press.

Journel, A. G., ve Huijbregts, C. J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press.

Kansa, E. J. (1990). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—II solutions to parabolic, hyperbolic and elliptic partial differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, *19*, 147-161.

Marcucci, D. J., ve Jordan, L. M. (2013). Benefits and challenges of linking green infrastructure and highway planning in the United States. *Environmental Management*, *51*, 182-197.

Meng, Q. M., Liu, Z. J., ve Borders, B. E. (2013). Assessment of regression kriging for spatial interpolation - comparisons of seven GIS interpolation methods. *Cartography and Geographic Information Science*, *40*, 28-39.

Petrie, G., ve Kennie, T. J. M. (1987). Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computer-Aided Design*, *19*, 171-187.

Renka, R. J. (1988). Multivariate interpolation of large sets of scattered data. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, *14*, 139-148.

Rippa, S. (1999). An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation. *Advances in Computational Mathematics*, *11*, 193-210.

Smith, W. H. F., ve Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, *55*, 293-305.

Töreyen, N., Türk, Y., & Çınar, T. (2024). Determination of Material Volume Using UAVs in Land Surface Change: The Case of Konuralp Campus (Düzce). Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 20(2), 1-14.

Trangmar, B. B., Yost, R. S., ve Uehara, G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, *38*, 45-94.

Wang, J. G., ve Liu, G. R. (2002). On the optimal shape parameters of radial basis functions used for 2-D meshless methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *191*, 2611-2630.

Yanalak, M. (2003). Effect of gridding method on digital terrain model profile. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *17*(1), 58-67.

Yanalak, M., ve Baykal, O. (2003). Digital elevation model based volume calculations using topographical data. *Journal of Surveying Engineering*, *129*, 56-64.

Yanalak, M. (2005). Computing earthwork volumes of complex surface models. *Journal of Surveying Engineering*, *131*(1), 20-26.

Yang, C. S., Kao, S. P., Lee, F. B., ve Hung, P. S. (2004). Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress* içinde (ss. 778-785).

Yaprak, S. (2007). *Kriging yönteminin geoit yüzeyi modellemesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve var olan yöntemlerle karşılaştırılması* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.

Yiğit, C. O. (2003). *Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi.

Yılmaz, H. M. (2007). The effect of interpolation methods in surface definition: An experimental study. *Earth Surface Processes and Landforms*, *32*, 1346-1361.

Yılmaz, I. (2009). A research on the accuracy of landform volumes determined using different interpolation methods. *Scientific Research and Essays*, *4*, 1248-1259.

Şırnak Bazalt Oluşumları ve Bazalt Madenciliği

Öykü BİLGİN[1]

1- Doç. Dr.; Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü. ykbilgin@yahoo.com ORCID No:0000-0002-1276-5751

ÖZET

Bazalt; içeriğinde ortalama %45-53 silika(SiO_2), yüksek oranda magnezyum ve demir içeren ince taneli magmatik ve Dünya' da en yaygın olarak bulunan volkanik aktiviteler sonucunda oluşan bir kayaç türüdür. Bazaltlar görünür mineral taneler ile serpiştirilmiş gibi olan, siyah veya gri renkli, kesif yığınlar halindedir. Demir içeriği zengin olduğundan zamanla demir oksitlere ve hidroksitlere oksitlenme olur ve kahverengi veya pas kırmızı rengine dönüşebilir. Bazı bazaltlar yüksek oranda plajiyoklaz içerdiği zaman açık renklerde de olabilir. İnce taneli veya camsı görünümde olabilirler. Oluşumları kütle halinde, damar veya akıntı şeklinde olabilir. Ortalama yoğunlukları 3,0 g/cm^3 civarındadır. Sert ve çok dayanıklı bir taş türüdür. Bazaltın aşınma, darbe, eğilme ve sürtünme dayanımı yüksektir ve atmosferik etkilere karşı yüksek dayanımlıdır. Bu sebeple kaldırım(parke) taşı, köprü malzemesi, inşaat yapıtaşı, zemin işleri, heykel yapımı, gemi yapımı, baca malzemesi ve demiryolu malzemesi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Türkiye'nin pek çok ilinde bazalt madenciliği yapılmaktadır ve istenilen boyutlarda/şekillerde satışa sunulmaktadır. Bazalt taşları; genellikle cevher hazırlama (kırma-eleme ve paketleme) tesislerinde üretilmektedir. Şırnak ilinde; Cizre, İdil ve Nusaybin ilçeleri arasında yol kenarları boyunca toprak üzerine çıkmış halde bazalt rezervleri yer almaktadır. Genellikle kaldırım taşı (Arnavut kaldırımı ile adlandırılan), parke taşı olarak yol döşeme ve kaplamalarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada; Şırnak ilinde bulunan bazalt taşlarının farklı kullanımlara yönelik değerlendirilebilirliği ve kırmataş madenciliği hakkında araştırma yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Bazalt, Kaldırım Taşı, Kullanım Alanı, Bazalt Madenciliği.

GİRİŞ

Bazalt; volkanik yapıya sahip, sert ve dayanıklı, nem emmeyen, ısıya/donmaya dirençli, yüksek basınç dayanımlı, koyu veya gri renkli bir kayaç türüdür. Bazalt içeriğinde ayrıca magnezyum (Mg), demir (Fe), kalsiyum (Ca), az miktarda potasyum (K), alüminyum (Al) ve sodyum (Na) bulunmaktadır. Bazaltlar yerkabuğunun metamorfik koşulları hakkında bilgi sağlayabilir. Örneğin; metamorfize edilmiş bazaltlar; altın, bakır, volkanojenik masif sülfür cevher yatakları vd. için bilgi verebilmektedir. Bazalt taşı, önemli bir hammadde olup, taş ocağı ve fabrikasında işlendikten sonra pekçok alanda kullanılmaktadır(https://tr.wikipedia.org/wiki/Bazalt).

Türkiye' nin pek çok ilinde (İzmir, Ankara, Kayseri, Gaziantep, Diyarbakır, Elazığ, Erzincan, Kilis, Muş, Konya, Kütahya, Kastamonu, Trabzon, Kırşehir, Tokat, Kocaeli, Hatay, Kahramanmaraş, Kars, Kırşehir, Gümüşhane, Eskişehir, Nevşehir, Şırnak gibi) bazalt rezervleri ve işletilen

ocakları mevcuttur (https://www.ergagranit.net/bazalt-tasi-nerede-bulunur/) Genellikle doğal yapı malzemesi(dekoratif dış cephe, kaldırım taşı, zemin kaplama, yalıtım malzemesi, yol, park, bahçe düzenlemesi, bina cephe kaplaması, restorasyon çalışmaları, seramik, cam yapımı, heykel, hediyelik eşya yapımı vb.) olarak, kullanılmaktadır. Şekil 1' de Şırnak bazalt taşı görülmektedir.



Şekil 1: Şırnak Bazalt Taşı

Şırnak ili ile Cizre'den, İdil'e ve Nusaybin'e kadar yol kenarları boyunca toprak üzerine çıkmış halde bazalt rezervleri bulunmaktadır. Bölgede bulunan kalker ve tras malzemesi olan Kuvaterner yaşlı bazaltik cüruf hammadeleri önemli bir kaynaktırlar. Midyat grubunda bulunan ve Alem Dağı'ndan itibaren yayılmış olan Kuvaterner yaşlı bazalt türleri burada konumlanmıştır. İdil ilçesinin merkezinden yakın güneyde bulunan Alem Dağı'nın volkanik çıkışı merkezi olarak görülmektedir ve buradan güneye, kuzeye doğudaki Cizre, İdil ilçesi yakınına ve Suriye topraklarına kadar uzanan genç bazalt lavlar bulunmaktadır. Güneydoğu Anadolu otoktonunun üzerinde Kuvaterner yaşlı bazaltlar, alüvyon yelpazeleri, alüvyonlar ve eski akarsu çökellerini izlemektedir (Ayaz vd. 2018). Şırnak bazalt taşları gözenekli ve gözeneksiz olmak üzere 2 oluşumda karşımıza çıkmaktadır. Kullanım açısından ve rezerv açısından incelendiğinde sektörün talebi yönünde en çok gözeneksiz olan bazaltlar tercih edilmektedir.



Şekil 2: Şırnak/Cizre Bazalt Oluşumları



Şekil 3: Şırnak/İdil Bazalt Yerüstünde Oluşumları

Şırnak ili ve çevresinde milyonlarca ton kaliteli bazalt rezervleri yer almaktadır. Üretilen bazalt, kum, mıcır, kırmataş, hazır beton katkısı ve kaplama taşı olarak kullanılmaktadır. Rezerv miktarları kayıtlı verilere göre 2.340.000 ton'dur. MTA' nın Şırnak ilinde 2015 yılı verilerine göre 8000 ton

bazalt üretimi yapılmıştır(Ayaz vd. 2018). Şekil 2' de Şırnak/Cizre bazalt oluşumları ve Şekil 3'de Şırnak/İdil bazalt yerüstünde oluşumları verilmektedir. Şekil 4 Şırnak/İdil bazalt taşına bir örnektir.

Tablo 1 Şırnak İli Bazalt İşletmeleri(Bilgin vd., 2018)

Ruhsat Sahibi	Faaliyet Konusu	Yer/Mevkii
ACS İnş. Mad. Kim. Nak. Gıd. San. Tic. A.Ş.	Bazalt Ocağı Kırma-Eleme Tesisi (II-A Gruvbu Maden)	İdil İlçesi Açma Köyü Mevkii
ACS İnş. Mad. Kim. Nak.Gıda San. A.Ş.	Bazalt Ocağı Kırma Eleme Tesisi	Yavşan Köyü Merik MevkiiİdilŞırnak
DSİ 16. Bölge Müd.	Bazalt Ocağı-Kırma-Eleme Tesisi	Çevrimli Köyü Güçlükonak/ Şırnak
Tanrıverdi Transpart Ak. Taş. Gıda İnş. Mad. San. ve Tic. Ltd. Şti.	Taş(Bazalt) Kırma ve Eleme Tesisi	Korucu Köyü Mevkii Cizre/ Şırnak
İl Özel İdaresi	Bazalt Ocağı-Kırma-Eleme Tesisi	İdil İlçesi Mevkii



Şekil 4: Şırnak/İdil Bazalt Taşı

Şırnak ilinde tarihi yapılarda bazalt hammadesi kullanılmıştır. Bunlardan en önemlilerinden; Cizre Abdaliye Medresesi ve Cizre Ulu Cami'dir. Abdaliye Medresesi'nin batı cephesinden, şehir surlarının üzerinde olup, tamamının bazalt taşları ile örülmüş olan cephelerden yapılmıştır ve daha sonra 1930 yıllarında yıkılmış ve moloz taşlarla tekrar onarılmıştır. Güney cephesinde de bazalt taşları ve moloz taşları karışımı ile yapılmıştır. Cizre Ulu Cami' nin de ayakları yaklaşık 0.90 m. çapındadır ve silindirik şekilde yontulmuş siyah bazalt taşlar ile üst üste harç ile oturtulması şeklindedir. (https://sirnak.ktb.gov.tr/tr-56444/2004-yili-hakkari--ve-sirnak-illeri-yuzey-arastirmasi.html). Diyarbakır hanlarının pek çoğunda bazalt taşı kullanılmıştır.

Bazalt taşının, insan sağlığına faydaları olduğu da bilinmektedir. Bunlar; toksinlerin atılmasına yardımcı olmak, uyku kalitesini arttırmak, vücudun kendisini yenilemesini yardımcı, kas ağrısı ve gerginliğini gidermek, bağışıklığı güçlendirmek, enerji vermek, stresi azaltmak, yaralanmaların hızlı iyileşmesine katkıda bulunmak gibi faydaları da bulunmaktadır (https://www.gramerstones.com/urun/bazalt-tasi/).

BAZALT MADENCİLİĞİ

Bazalt taşları bloklar halinde ocaktan çıkarılabilir veya boş arazilerde toprak yüzeyinden toplama taş halinde alınabilmektedir. Ayrıca; yol yapım çalışmaları sonucunda açılan çukurlardan, sulama kanal çalışmalarından çıkan bazalt kayaları toplanabilir ve değerlendirilebilir. Yerüstünde yeterli bazalt taşı kalmadığı durumlarda ise bazalt ocağı açılmaktadır. Bazalt ocaklarının işletilmesi; kırmataş(mermer, zeolit, endüstriyel hammadeler vb.) madenciliğinde uygulanan maden işletme(ekskavatör ile kazma vb.) ve cevher hazırlama(kırma-eleme vb.) işlemlerinin bir bütünüdür. Bazalt blokları sahadan temin edildikten sonra ve fabrika/tesislerinde modern teknolojiler kullanılarak işlenmektedir. Elde edilen ürünlerin kalite kontrolleri yapıldıktan sonra, ambalajlama ile koruma altına alınmaktadır ve sektörün talebine göre zamanında sevkiyat yapılmaktadır. Taş ocaklarında bazalt blokları iş makinaları ile yamaçtan kopartılmaktadır. Bazalt kayaçlarının yamaçtan koparılması bölgedeki madencilik firmalarının talepleri doğrultusunda işlenen bazalt bloklarını daha önce kapatılan bir ocaktan da çıkarabilmektedir. Bazalt ocağında katmanlar halinde olan kayalar, ağırlıkları 7 ile 20 ton arasında değişebilmektedir. Blok halindeki bazalt taşları ekskavatör ile yamaçtan çıkarıldıktan sonra nakliye edilmek

için, kamyona yüklenir ve kesim yapılması için fabrikaya gönderilmektedir. Şekil 5' de Şırnak/İdil bazalt cevher hazırlama(kırma-eleme) tesisi görülmektedir. Şekil 6' da Şırnak/İdil kırma eleme tesisinde kırılmış bazalt taşının bantlı konveyörden stok sahasında toplanması gösterilmektedir. Şekil 7' de Şırnak/İdil kırma eleme tesisinde kırılmış bazalt taşı örneği verilmektedir.



Şekil 5: Şırnak/İdil Bazalt Cevher Hazırlama(Kırma-Eleme) Tesisi



Şekil 6: Şırnak/İdil Kırma Eleme Tesisinde Kırılmış Bazalt Taşının Bantlı Konveyörden Stok Sahasında Toplanması



Şekil 7: Şırnak/İdil Kırma Eleme Tesisinde Kırılmış Bazalt Taşı

Bazalt blokları; fabrikaya kamyon ile geldikten sonra, vinç yardımı ile üst üste istiflenerek indirilir. Kullanılan vinçlerin kapasiteleri 30 tona kadar yük kaldırabilmektedir. Sonrasında bazalt blokları vinç yardımı ile kesim için fabrika içerisine taşınmaktadır. Bazalt taşlarını kesen makina ST Dikey katraklarda 80 ile 200 cm arasında büyük çaplı olan, yatay katraklar da 40 ile 50cm çaplıdırlar. Katraklarda bulunan elmas uçlu soketler sayesinde kesimler yapılmaktadır. Güçlü elektrikli motorlar sayesinde yüksek devirde dönen katraklara kesim sırasında bol miktarda su pompalanmaktadır. Kesim işlemi önce dikey testere ile başlar ve ikinci veya üçüncü plakalara geçildiği zaman yatay testere kesime devam eder. Plakalar yatay şekilde de kesildikten sonra "kafa kesme" olarak adlandırılan diğer makinaya verilir. Buradan da iki uç kısımları şekilsiz olan plakalar 90° dik açıda ve istenilen ölçüde kesilip, istiflenmektedir. Fabrikada kesim işleri su kullanılarak yapılmaktadır. Kullanılan su, sondaj kuyusundan sağlanabilir. Bununla birlikte fabrikanın ard arda dizilmiş halde çökeltme havuzları bulunmaktadır. Sondaki havuzdan dinamolar kullanılarak fabrika içerisine su çekilmektedir. Çekilen suyun kullanım alanı, blokların kesim işleridir. Bir miktar su kesim sırasında kaybolmaktadır. Kalan sular ise kanallar yardımı ile devri daim şekilde tekrar ilk havuza gönderilmektedir. Eğer özel kesimler yapılmak isteniyor ise, taşların köşesine şekiller veren profilli testereler takılır ve farklı şekillerde bazalt taşları elde edilebilir. Fabrikada bant silim makinaları sayesinde plaka halinde verilen bazalt taşı parlak bir görünüme kavuşmaktadır. Yatay kesme makinası da bahçe park bordür vb taşların pahlı kesim yapmasını sağlamaktadır. Bazalt taşının aşınmaya karşı dayanıklı ve sert olması sebebi ile testereler sürekli değiştirilmektedir. Bu durum da üretim maliyetlerini yükseltmektedir. Daha sonra belirli boyutlardaki bazalt plakaları palete düzgün şekilde bırakılarak, yükleyici kullanılarak alınır ve uygun yerlerde stoklanır. Honlama işlemi, farklı teknik özelliklerdeki mermer türlerinde, fabrikada işlenme sürecinde, kapasiteyi arttırmak için kullanılan ve çoğunlukla 2 veya 3 kafadan oluşan 30 – 90 numaralı aşındırma serisi kullanılarak kaba bir silim birimidir. Honlama yöntemi sonunda; pürüzsüz, düz ve parlak bir görünüm elde edilmektedir. Ancak parlaklık bazaltta mermer yüzeyi gibi ışığı yansıtmamaktadır. Cila almayan mermerlere de uygulanmaktadır. Eğer parlak bir görüntü istenmiyor ise honlama işlemi yapılmaktadır. Kumlama işlemi; sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde; işlem yapılacak olan yüzeylere, yüksek basınç pompası yardımı ile silis kumu püskürtülmektedir. İşlenmesi istenilen bazalt parçaları tekerlekli araba ile kumlama makinesi altına otomatik bir şekilde giriş ve çıkış yapmakatdır. Bazalt veya mermer yüzeyine kum taneleri yada kumlama uçları çarpmakta ve küçük noktalar şeklinde küçük çukurlar ve tümsekler oluşmaktadır. Böylece bazalt, mermer, taş yüzeyi antik ve pürüzlü bir görünüm kazanmaktadır. Püskürtme işleminde kum, yağmurlama ile yıkanarak, nemli hale getirilir ve çökertilerek, işleme hattı altına toplanmaktadır. Taşa eski görünüm verildiği zaman mekanlarda antik/rustik

bir görüntü kazandırmaktadır ve tercih edilmektedir. Bu sebeple mermer/taş yüzeyleri tambur kullanılarak veya sallantılı/titreşimli makinalar ile eskitme işlemleri yapılarak, yıpranmış veya eski görünüm elde edilmektedir. Tamburlar ile yapılan eskitme işlemlerinde; çokgen kesitli veya silindirik tambur içine benzer boyutlarda taş/mermer yerleştirilir ve aşınmayı kolaylaştırmak için içerisine silisli kum ve çakıl eklenir, tamburun kapağı kapatılır. Kapağın üzerinden vanalar ile tambur içerisine su eklenir. Tambur kapak yönünde eğik, şasenin üzerindeki rulman ile küçük bir motorla döndürülmektedir. Tamburun dönüş hızı, hız kontrol mekanizması ile sağlanmaktadır. Eskitme yapılan taşın cinsine göre tambur süresi ve devir hızı ayarlanmaktadır.Tambur dönüşü ile taşlar/mermerler su içerisinde yüzeyleri aşındırıcı malzemelerin etkisi ile aşınmaktadır ve köşeleri yuvarlak bir görünüm kazanmaktadır. İşlem sonunda; tambur durdurularak, kapak üzerindeki vanalardan su boşaltılmaktadır ve eskitme yapılan taşlar çıkarılmaktadır. Daha sonra tamburun altında yer alan iri tane boyutlu elekler üzerine boşaltılmaktadır. Burada ince kum ve çakıllardan malzeme temizlenir. Tambur içindeki mazemenin boyutları farklı olur ise uzun parçalar kırılabilir. Bu durum da göz önünde bulundurulmalıdır. Doldurma(macunlama) işlemleri; bazalt yüzeyinde yapısından kaynaklanan farklı boyutlarda gözenekler mevcuttur. Cilalama ve kesme işlemleri sırasında bu gözenekler, daha da belirginleşir ve taşın görünümünü bozmaktadır. Böyle durumlarda taşın yapısına suni olarak, dolgu yapılmaktadır ve bu şekilde gözeneklerin kapatılması sağlanır. Gözeneklerin doldurulması için çimento bileşimli ve polyester içerikli dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Sık gözenekler için sıvı dolgu madde hazırlanırken, iri gözenekleri doldurmak için katı dolgu maddeleri kullanılmaktadır (https://www.bazaltstone.com/icerikler/bazalt-uretimi hakkinda).

SONUÇ

Bazaltın yapıtaşı/inşaat/kırmataş/mimari uygulamalarında kullanım alanları yaygın olduğu bilinmesine rağmen, yapısal özellikleri sebebi ile farklı alanlarda kullanım alanları da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi toprak düzenleyici olarak kullanımıdır. Toprağın pH'ını düzenleme, içeriğindeki mineral desteği, karbon tutumu(giderimi), kimyasal gübrelere bağımlılığı azaltma, azaltılmış N_2O gazı üretimi ve aşınması sırasında bazı kimyasal reaksiyonlara girerek toprağın daha verimli olmasını sağlamaktadır. Örneğin; toprak üzerine bir miktar bazalt taşı serilmesi atmosfer içindeki karbondioksit miktarını büyük oranda yok etme(CO_2 emüsyonu) yeteğine sahiptir.

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmada katkılarından dolayı DİKA' ya, Şırnak İl Özel İdaresi' ne teşekkür etmektedir.

REFERANSLAR

Ayaz, E., Polat, M.A., Sengüler, İ., ve Yıldırım, N., (2018). Türkiye'nin Yeralti Zenginlikleri Potansiyeli ve Şirnak İlindeki Durum, Şırnak Enerji ve Maden Potansiyeli, Eğitim Yayınevi, ISBN: 978-605-7557-33-9, S:303-325.

Bilgin, Ö., Kantarcı, S., ve Çiftçi, H., (2018). Şirnak İli Maden Potansiyelinin Cevher Zenginleştirme Açisindan Değerlendirilmesi ve Temiz Kömür Teknolojileri, Eğitim Yayınevi, Isbn: 978-605-7557-33-9, S:391-427.

Lazolini Madencilik San. ve Tic. A.Ş. https://www.bazaltstone.com/icerikler/bazalt-uretimi-hakkinda adresinden 23.12.2025 tarihinde alınmıştır.

Top, M., Kılavuz, B.N., Güneş, B., Kulaz, M., Sarıhan M., Koç. E., Karataş, Ş., İslamoğlu, H., Kurucu, M. ve Esen, B. 2004 Yılı Hakkari ve Şırnak İlleri Yüzey Araştırması, Şırnak İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, https://sirnak.ktb.gov.tr/tr-56444/2004-yili-hakkari--ve-sirnak-illeri-yuzey-arastirmasi.html adresinden 23.12.2025 tarihinde alınmıştır.

Erga Granit Madencilik İnşaat Sanayi Ticaret Limited Şirketi, https://www.ergagranit.net/bazalt-tasi-nerede-bulunur/ adresinden 23.12.2025 tarihinde alınmıştır.

Gramerstones, Ankara, https://www.gramerstones.com/urun/bazalt-tasi/ adresinden 23.12.2025 tarihinde alınmıştır.

Vikipedi Özgür Ansiklopedi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Bazalt adresinden 23.12.2025 tarihinde alınmıştır.

Maden, Petrol ve Su Sondaj Yöntemlerinin Ön Araştırması

Öykü BİLGİN[1]

1- Doç. Dr.; Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü.
ykbilgin@yahoo.com ORCID No:0000-0002-1276-5751

ÖZET

Sondaj; özel olarak yapılmış sondaj makinaları ile her katı ortamlarda ve her yönde, özellikle yeraltı kaynaklarını(cevher, kömür endüstriyel hammaddeler, asfaltit, petrol, içme suyu, sıcak su, maden suyu vb.) araştırmak ve çıkarmak için yapılan, madencilikte yerin çeşitli derinliklerine bir delici uç ile küçük çaplarda açılan yuvarlak deliğe denilmektedir. Sondaj işlemi, sondaj yapma veya sondaj kuyusu(sondaj deliği) açma olarak ifade edilmektedir. Sondaj kuyuları genelde 20-25"(inç)' den daha küçüktürler. Cevher sondajlarında 1-3", kömür sondajlarında 2-4" ve petrol sondajlarında ise daha büyük çaplı sondaj kuyuları açılmaktadır. Sondaj derinlikleri de genellikle 500-7000 m arasındadır. Yerkabuğunun sıcaklığı ile inilebilen en son derinlik arasında bağlantı vardır. Sondaj sırasında; delik delme işini sondaj makinası yapmaktadır ve bu makinayı kullanan kişiye sondör, sondajın yapıldığı yere lokasyon denilmektedir. Sondaj yönteminin belirlenmesi için sondajın amacının, gerekliliğinin, formasyonun tanınması ve lokasyon seçimi gibi etkenler araştırılmalıdır. Sondajın amacı ne olursa olsun; jeolojik, jeofizik, maden ve ekonomik etüdlerinin yapılması gerekmektedir. Sondaj kuyularının başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için sondaj çamurunun seçimi de önemlidir. Suya karıştırılan doğal maddeler (kil ve kilin çeşitleri örneğin bentonit, barit, galen, siderit vb.), yarı sentetik maddeler(karboksi metil selüloz vb.), tam sentetik maddeler, viskozite ayarlayıcı(fosfatlar, hüminatlar vb.), çeşitli çamur emilsiyon yağları ve çamur ağırlaştırıcı(tebeşir, barit, baryum sülfat, hematit vb.) gibi maddeler sondaj çamurunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada; maden, petrol ve su sondajları hakkında genel bir araştırma yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Sondaj, Maden, Petrol, Araştırma, Üretim.

GİRİŞ

Sondaj yapılıp, yapılmaması kararı; sondajı gerektiren amaçların uygunluğuna göre; yöneticilerin, mühendislerin (maden, petrol, jeoloji, jeofizik, inşaat) yeterli bilgileri doğrultusunda ekonomik şartlar göz önüne alınarak verilmektedir. Sondajı gerektiren amaçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır:

Sondajı gerektiren amaçlar;

- Maden ve jeolojik araştırmalar yapmak, bilgi toplamak
- Petrolü aramak ve üretimini yapmak
- Doğalgaz aramak ve üretimini yapmak
- Jeotermal kaynakları aramak ve üretimini yapmak
- Yeraltı kaynaklarını(cevher, endüstriyel hammaddeler, kömür, petrol, asfaltit, içme suyu, sıcak su, maden suyu vb.) araştırmak

(jeolojik etüd, arama, rezerv tespiti yapma, işletilebilirlik etüdleri vb.)
- Maden yataklarının işletilebilmesi veya işletilmesine yardımcı sondajlar
- Temel sondajlar ve yeraltı çimetolanması için
- Drenaj işlemi için
- Elektrik nakli hatlarının ve sanayi tesislerinin kuruluşunda zemin etüdü yapmak
- Jeofizik araştırmalar yapmak vb.

Sondajın amacı ne olursa olsun; jeolojik formasyonun tanınması gerekmektedir. Örneğin; bazı sondaj işlemlerinde; formasyonun kimyasal özellikleri bazılarında ise fiziksel özellikleri daha önemlidir. Bazı sondajlarda geçilen tabakaların derinlik ve kalınlıklarının 1-2 m hatalı olması kabul edilebilir iken, bazı sondajlarda 1cm hata dahi kabul edilemez. Örneğin; bir maden arama sondajında seçilen formasyonun mineralojik yapısı, maden yatağının özelliğini saptamak açısından çok önemli olurken, aynı formasyonda yeraltı suyu aranıyor ise formasyonun fiziksel yapısı önem taşıdığından, mineralojik yapısının çok iyi bilinmesine gerek yoktur. Bu nedenle formasyonu tanıma ve tanımlama; sondaj sırasında alınan örneklerin incelenmesi ile yapılacak önemli bir işlemdir. Sondajlarda uygulanan örnek alma yöntemleri; kırıntı örnek, örselenmiş örnek, karot örnek ve örselenmemiş örnek gibi çeşitlerde sınıflandırılmaktadır.

Maden sondajlarında; kayacın fiziksel, kimyasal ve jeolojik özelliklerine bakılmaktadır. Burada kayacın sertliği, aşındırıcılığı(kuvars oranı) ve iç yapısı(gözeneklilik, tane iriliği, yoğunluğu, sıkılığı vb.) önemlidir(Bilgin, 1998).

Su sondajı yapılması planlanıyor ise; lokasyon seçimi sırasında; etrafta önceden açılmış su kuyuları var ise bunlara bakılır. Su kuyusu yok ise; killi, marnlı ve çakıltaşı formasyonlarında aşırı killi formasyonlarda su az elde edilebilir. Bu sebeple tercih edilmez. İkinci seçenek; üst kreatese kireçtaşı ise bu formasyonda su sondajı yapılması tercih edilebilir.

Petrol sondaj kuyusu, petrol hidrokarbonlarının ve petrol gazının yüzeye çıkarılması için uygulanan bir sondajdır. Petrol kuyusu aşamaları; planlama, sondaj, kuyu muhafazası, tamamlama, üretim, vazgeçme işlemlerini kapsamaktadır. Petrol kuyu sondajları; planlama, sondaj, kuyu muhafazası, tamamlanma, üretim ve vazgeçme gibi aşamalar ile yürütülmektedir (https://www.bunkerist.com/petrol-kuyusu/).

SONDAJ YÖNTEMLERİ

Sondaj yöntemleri; yapılış şekillerine göre, yapılış amaçlarına göre, derinliklerine göre, yapıldıkları yerlere göre ve alınan numuneye göre sondajlar şeklinde gruplandırılabilmektedirler. Bunlar;

Yapılış şekillerine göre sondajlar

- Darbeli sondajlar
- Dönerli(rotary) sondajlar
- Dönerli-darbeli sondajlar
- Türbünlü sondajlar
- Diğer sondaj yöntemleri

Yapılış amaçlarına göre sondajlar

- Jeolojik etüd sondajları
- Araştırma sondajları
- İşletme sondajları
- Enjeksiyon sondajları
- Temel etüd sondajları vb.

Sondaj; yapılış amaçlarına göre sınıflandığında, arama sondajları(yeraltında aranılan hammaddenin tespitini yapmak amacı ile yapılan sondajlar), geliştirme sondajları(tespit edilen yatağın büyüklüğünü ve içerdiği hammaddenin dağılımını saptamak için yapılan sondajlar), üretim sondajları(örneğin; su, doğalgaz, petrol, tuz ve kükürt yataklarındaki gibi belirli bir plana uygun olarak açılan işletme kuyuları) ve yardımcı sondajlar(örneğin; petrol sahasında açılan su enjeksiyon kuyusu, büyük maden kuyusunun açılması sırasında çevreden gelen suların sonlandırılması için yapılan sondajlar) olarak da gruplandırılmaktadır(Guluzade, 2015; Deliormanlı, 2014).

Derinliklerine göre sondajlar

- Çok sığ olan sondajlar (Derinlik 100 m den azdır.)
- Sığ olan sondajlar (100-1000m)
- Derin sondajlar (1000-4500m)
- Çok derin sondajlar (4500-6000 m)

6000m' den derin sondajlar ultraderin sondajlardır.

Delik çapına göre sondajlar

- Dar çaplı sondajlar
- Delik çapının 152,4 mm' den daha küçük olduğu sondajlar
- Geniş çaplı olan sondajlar (Delik çapı 6-24 inç arasındadır.)
- Çok geniş çaplı olan sondajlar (Delik çapı 24 inçten daha büyüktür.)

Yapıldıkları yerlere göre sondajlar

- Yerüstünde yapılan sondajlar
- Yeraltında(galeri ve tünel) yapılan sondajlar)
- Sığ sahil sondajları
- Su üzerinde yapılan sondajlar
- Açık denizlerde yapılan sondajlar

Alınan numuneye göre sondajlar

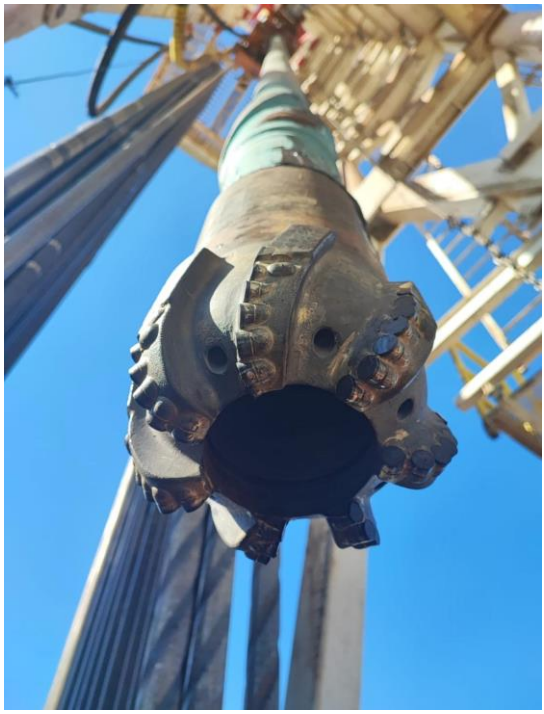
- Tam sondaj
- Karotlu sondaj

Sondaj sırasında kayaçlar; matkaba verilen baskı, döndürme ve darbe etkisi ile parçalanırlar. Parçalanma; kayacın yapısı, mekanik özellikleriile matkaba yapılan etkilerin türüne, büyüklüğüne ve süresine bağlıdır. Matkaplar kayacı; darbe ile parçalama, ezerek(baskı ile) parçalama ve keserek(kazarak) parçalama şeklinde etki etmektedirler(Çilingir, 1993; Özdemir, 2007).

Örneğin; Rotary sondaj yönteminde; kayacın parçalanması için matkaba verilen enerji; dönme hareketi ile sağlanmaktadır ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Rotary sondaj makinasının elemanları; matkap, taç makara, sondaj boruları, vinç, bağlantı elemanları, motorlar ve güç dağıtımı, halat, ağırlık boruları, döner masa, çamur pompası, hareketli makara, köşeli boru, kule, çap değiştirici, çamur tankı, çamur hortumu ve borusu, alt yapı, kuyu başı emniyet vanaları, subaşlığı, kanca vb. donanımlardan oluşmaktadır. Sondaj kulesi genellikle yukarı doğru daralan piramit şeklindedir. Yüksekliği 4-60 m arasındadır. Şekil 1' de sondaj kulesi, Şekil 2' de karot matkabı, Şekil 3' de sondaj matkabı, Şekil 4' de insert sondaj matkabı, Şekil 5' de sondör kumanda paneli, Şekil 6' da katı atık ayıklama elekleri, Şekil 7' de sondaj dizi elemanları verilmektedir.



Şekil 1: Sondaj Kulesi



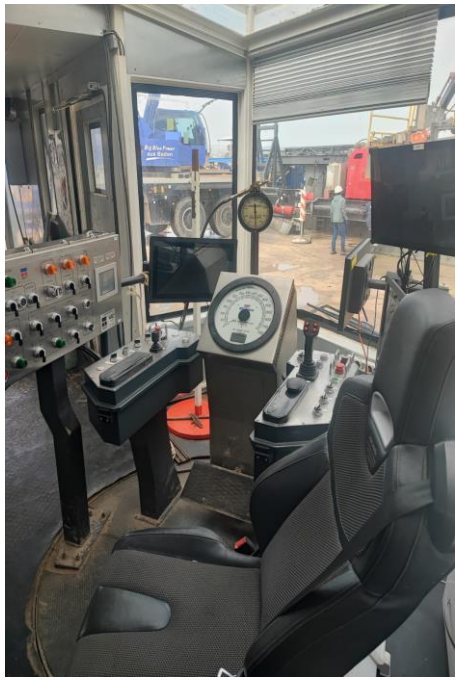
Şekil 2: Karot matkabı (karot almak için)



Şekil 3: Sondaj matkabı (12 ¼ pdc)



Şekil 4: Insert sondaj matkabı



Şekil 5: Sondör kumanda paneli



Şekil 6: Katı atık ayıklama elekleri



Şekil 7: Sondaj dizi elemanları 5" lik dp

SONDAJ ÇAMURU

Sondaj kuyularında sirkülasyon sıvısı olarak kullanılan sondaj çamurunun seçimi ve kalitesini takip etmek üzere mühendisler görevlidir. Sondaj çamurunun görevleri; kesilen kırıntıları yukarı çıkarmak, matkap dizisini soğutmak ve yağlamak, sıvı yapmak ve kuyu çeperinin yıkılmasını önlemek, sirkülasyon kesildiğinde kırıntıları askıda tutmak ve yüzeyde bırakmak, formasyon basınçlarının kontrolünü sağlamak, kuyu duvarlarının hasar görmesini önlemek ve kuyu hakkında bilgi edinmek, sondaj dizisinin ağırlığını azaltmak vb. sayılabilir. Sondaj çamurunun ağırlığı, viskozitesi, verim ilişkisi, jel mukavemeti, su kaybı, kum oranı, pH değeri, maliyeti gibi etkenleri göz önünde bulundurulmalıdır. Çamur yapımında bentonit, barit, galen siderit gibi maddeler kullanılmaktadır. Tablo 1’ de örnek bir sondaj çamurunda karşılaşılan problem ve kontrol seçenekleri verilmektedir.

Tablo 1: Örnek bir sondaj çamurunda karşılaşılan problem ve kontrol seçenekleri

No	Problem	Kontrol
1	Tatlı su içerikli çamurlarda viskozite ve jel mukavemetini arttırmak	Bentonit ileve edilir.
2	Tuzlu su içerikli çamurlarda viskozite ve jel mukavemetini arttırmak	Tuza dayanıklı kil ilave edilir.
3	Fazla miktarda katı ilave edilen çamurlarda viskozite ve jel mukavemetini azaltmak için	Su ilave edilir.
4	Çamur ağırlığından dolayı viskozite düşürmek için sulandırmanın yeterli olmadığı durumlarda	Kimyasal madde ilave edilir.

SONUÇ

Sondaj faaliyetlerinin başarısı; personel, donanım, sondaj çamuru, mekanik faktörler, lojistik destek, jeolojik yapı, ileri düzeyde teknik bilgi ve beceri gibi etkenlere bağlıdır(Yalçın, 1991). Sondör; sondaj sırasında meydana gelebilecek sorunlara karşı başarılı çözümler bulmak için bilgi, tecrübe ve özveriye sahiptir. Örneğin tork alma veya dönme kaybı gözlendiğinde dizi rahatlatılıp, 1 m yukarı çekilip, sıkıntılı metraj rahatlatılarak, yetkili kule şefine haber verme görevini üstlenmiştir. Yine basınç değişimi olursa, çamur teknisyeni, mühendisi ve kule yönetimine haber vermek ile görevlidir.

TEŞEKKÜR

Yazar; bu çalışmada katkılarından dolayı, sondaj ve hafriyat Baş Mühendisi Osman TUNCEL' e, TPIC' e ve Sondör İdris YILDIRIM' a teşekkür etmektedir.

REFERANSLAR

Guluzade, A. (2015). Petrol sondajı sırasında oluşan toprak kirliliğinin boyutları ve önlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, S:98.

Deliormanlı, A., (2014). Maden arama ve sondaj tekniği sunum III. 20 Şubat 2015, http://web.deu.edu.tr/maden/docs/maden_arama_sondaj_teknigi/sondajteknigisunum_III_deliormanli.pdf.

Özdemir, A., (2007). Sondaj tekniğine giriş. Ankara: Mattek Matbaacılık Basım Yayın, http://www.adilozdemir.com/upload/dokumanlar/sondaj-teknigine-giris-adilozdemir-2009.pdf.

Çilingir, Y., (1993) Sondaj Tekniği, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Bilgin, Ö., (1998) Sondaj Stajı, MTA Ege Bölge Müdürlüğü, İzmir.

Yalçın, A., (1991) Sondaj Yöntemleri ve Uygulamaları, TMMOB, Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, S:383.

https://www.bunkerist.com/petrol-kuyusu/

Çarpma Algoritmalarının Düşük Güç ve Yüksek Performans Temelinde Sayısal Yonga Tasarımına Uyarlanması

Serkan DERELİ[1]

1- Doç. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. dereli@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-1856-6083

ÖZET

Bu çalışmada, sayısal çip tasarımında çarpma algoritmalarının düşük güç tüketimi ve yüksek performans gereksinimleri doğrultusunda donanıma uyarlanması ele alınmıştır. Çarpma işlemi; alan, kritik yol gecikmesi ve enerji tüketimi açısından en maliyetli aritmetik fonksiyonlardan biri olduğundan, kullanılan algoritma ve mikro-mimari yaklaşım çip performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, iteratif yapıya sahip kaydır–topla (shift–add) yöntemleri ile paralel hesaplama yeteneği sunan dizi çarpanı (array multiplier) mimarileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Kaydır–topla yaklaşımının sınırlı donanım kaynakları ve düşük anahtarlama aktivitesi sayesinde güç verimliliği sağladığı; buna karşılık dizi çarpanı mimarisinin düzenli yapısı ve deterministik gecikme karakteristiği ile yüksek veri işleme hızları sunduğu deneylerde gözlemlenmiştir. Analizler, FPGA ve ASIC tabanlı tasarımlar çerçevesinde değerlendirilmekte ve sentez araçlarının hedeflenen teknolojiye bağlı olarak bu mimarileri nasıl optimize ettiği incelenmiştir. Ayrıca, boruhattı (pipeline) ekleme, operand bit genişliği ve çalışma frekansı gibi tasarım parametrelerinin güç–performans dengesi üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Çalışma, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak düşük güç veya yüksek performans öncelikli çarpma mimarilerinin seçimine yönelik tasarımcıya rehberlik eden ilkeler sunarak sonuçlandırılmıştır.

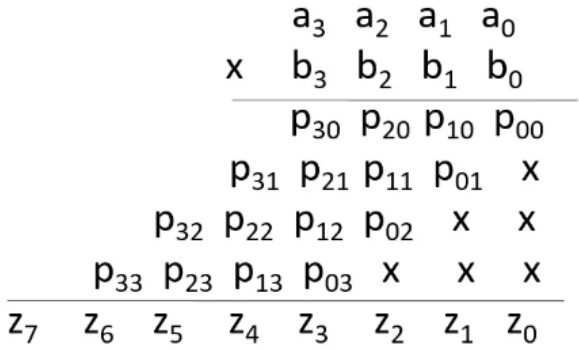
Anahtar Kelimeler – FPGA, Gömülü Sistemler, Çarpıcı Devreler, Kaydır-Topla Çarpıcısı, Dizi Çarpanı Çarpıcısı.

GİRİŞ

Çarpma işlemi, sayısal çip tasarımında en yoğun donanım kaynağı gerektiren aritmetik işlemlerden biri olup, alan, gecikme ve güç tüketimi açısından sistem performansını doğrudan etkileyen temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır (Dai vd., 2025:1). Sayısal sinyal işleme (DSP), görüntü ve video işleme, kablosuz haberleşme, makine öğrenmesi hızlandırıcıları ve gömülü kontrol sistemleri gibi pek çok uygulama alanında çarpma işlemlerinin sıklığı, toplam hesaplama yükünün önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu durum, çarpma işleminin donanımsal olarak hangi algoritma ve mikro-mimari yaklaşımla gerçekleştirileceğinin, modern VLSI tasarımlarında kritik bir tasarım kararı hâline gelmesine neden olmuştur (Varughese vd., 2025:1).

Literatürde çarpma işleminin gerçekleştirilmesine yönelik çok sayıda mimari yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımlar genel olarak, paralel yapılar kullanarak yüksek performans hedefleyen çarpan mimarileri ile iteratif ve zaman paylaşımlı çalışarak donanım maliyetini düşürmeyi amaçlayan yöntemler olarak iki ana grupta ele alınmaktadır (Venkatachalam vd.,

2025:1). Array multiplier, Wallace tree ve Dadda multiplier gibi paralel mimariler, kısmi çarpımların eş zamanlı olarak işlenmesi sayesinde düşük gecikme ve yüksek veri işleme oranı sağlamaktadır. Özellikle Wallace tree tabanlı çözümler, kritik yol uzunluğunu azaltmaları nedeniyle yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilmektedir (Kavana vd., 2025:3). Ancak bu tür paralel mimariler, bit genişliği arttıkça karesel biçimde büyüyen donanım maliyeti ve artan anahtarlama etkinliği nedeniyle güç tüketimi açısından dezavantajlı hâle gelmektedir (Abed vd., 2012:5).

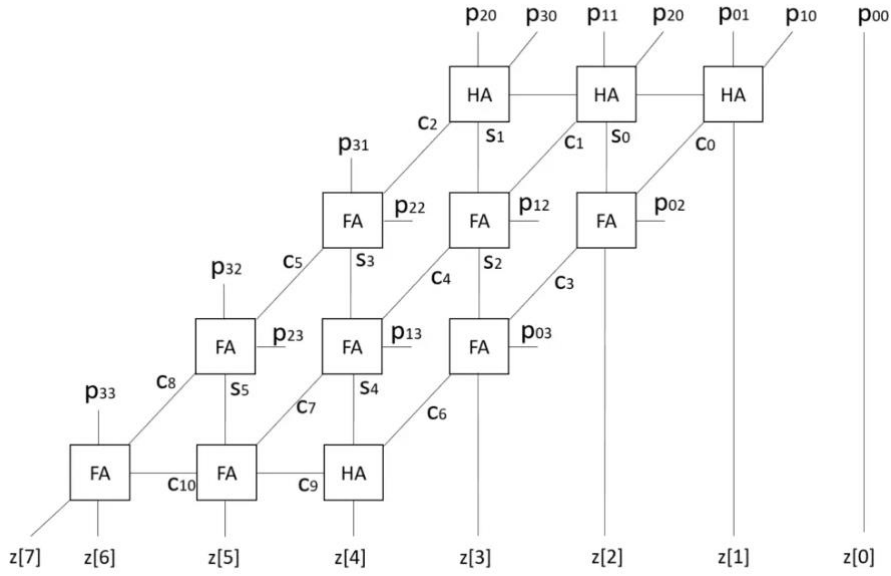


Şekil 1: Performans odaklı çarpma devresi tasarım akışı

Şekil-1'de düşük gecikme ve yüksek performans beklentisi ile tasarımı gerçekleştirilen Array, Wallace Tree, Dadda gibi çarpma devrelerinin izlediği akış görülmektedir. Gündelik yaşantıda gerçekleştirilen çarpma mantığına oldukça benzeyen bu akışta "p" ile başlayan değerler "Partial Product" ismini alırlar ve çarpılan değerle çarpan değerin AND kapısından geçirilmesi ile elde edilirler. "z" ile başlayan ifadeler ise "p" lerin toplamından elde edilmektedir ki bu da Şekil-2'de resmedilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere toplamlar yarım (HA) ve tam toplayıcı (FA) devrelerle elde edilmektedir. Tüm bu akış "Array Multiplier", "Wallace Tree" ve "Dadda Multiplier" gibi çeşitli yöntemlerle farklı şekilde kontrol ve icra edilerek hem donanımsal maliyet azaltılmış hem de performans artışları gerçekleştirilebilmiştir, çünkü bu yöntemler bütünüyle bileşik devrelerden oluşur ve işlem sonucu tek bir saat darbesinde elde edilir (Anitha vd., 2014:3).

Array Multiplier, Wallace Tree ve Dadda Multiplier benzer akışı icra etseler de aralarındaki temel fark; kısmi çarpımların (partial product) nasıl toplandığı ve bu toplamanın donanımsal derinliğinin nasıl azaltıldığıdır. Array multiplier, kısmi çarpımları düzenli bir toplama matrisi içinde satır satır toplar; bu yapı basit ve anlaşılır olmakla birlikte toplama derinliği lineer olduğu için yavaştır. Wallace Tree, Carry-Save toplayıcılar kullanarak kısmi çarpımları mümkün olan en agresif biçimde ağaç yapısında azaltır ve böylece logaritmik derinlikte çok yüksek hız elde eder; ancak alan ve yönlendirme karmaşıklığı yüksektir. Dadda Multiplier ise Wallace

yaklaşımını daha kontrollü uygular, her aşamada yalnızca gerekli minimum sayıda toplayıcı kullanarak benzer hızda çalışırken alan ve güç açısından daha verimli bir denge sağlar (Asif ve Kong, 2014:4).



Şekil 2: Çarpma tasarımında kısmi çarpımların toplanması

Array Multiplier, Wallace Tree ve Dadda yöntemlerinin aksine, kaydır–topla (shift–add) temelli çarpma yöntemleri, çarpma işlemini ardışık toplama ve kaydırma adımlarına bölerek iteratif biçimde gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım, donanım kaynaklarının zaman içinde paylaşılarak kullanılmasına olanak tanıdığı için alan gereksinimini önemli ölçüde azaltmakta ve düşük güç tüketimi hedefleyen tasarımlar için cazip bir alternatif sunmaktadır. Literatürde yapılan pek çok çalışma, iteratif çarpma yöntemlerinin özellikle düşük frekanslı, enerji kısıtlı ve kontrol ağırlıklı gömülü sistemlerde etkin biçimde kullanılabileceğini göstermektedir (Tang vd., 2011:2). Bununla birlikte, bu yöntemlerin çevrim sayısının operand bit genişliğiyle orantılı olarak artması, gecikme açısından önemli bir sınırlama oluşturmaktadır (Sakellariou ve Paliouras, 2011:2).

Son yıllarda, CMOS teknolojilerinin ölçeklenmesiyle birlikte güç tüketimi, performans kadar hatta bazı uygulamalarda performanstan daha kritik bir tasarım metriği hâline gelmiştir. Özellikle batarya ile çalışan sistemler, IoT düğümleri ve taşınabilir yapay zekâ hızlandırıcıları için enerji verimliliği öncelikli bir hedef olarak öne çıkmaktadır (Antognazza vd., 2024:6). Bu bağlamda, çarpma algoritmalarının yalnızca işlem gecikmesi açısından değil, aynı zamanda anahtarlama etkinliği, saat çevrimi başına yapılan iş miktarı ve güç–gecikme çarpımı (Power–Delay Product, PDP) gibi ölçütler üzerinden değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Literatürde yer alan güncel çalışmalar, paralel çarpan mimarilerinin yüksek performans sağlarken güç tüketimi açısından ciddi maliyetler getirdiğini, iteratif yaklaşımların ise performans pahasına enerji verimliliği sunduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır (Wu vd., 2024:2).

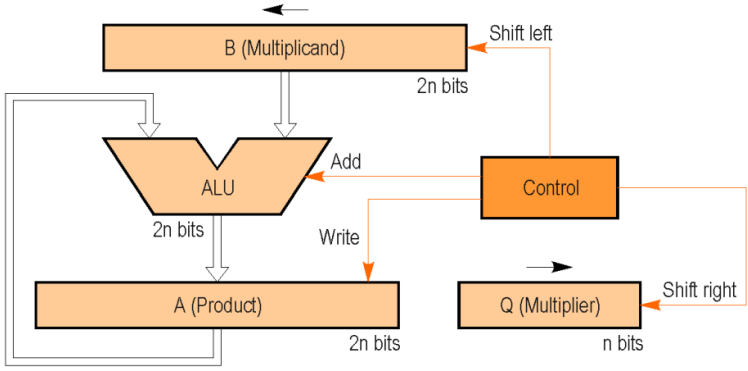
FPGA tabanlı tasarımlar açısından bakıldığında, çarpma işlemlerinin gerçekleştirilmesi çoğu zaman mimariye özgü DSP bloklarının varlığına bağlı olarak değerlendirilmekte ve bu durum literatürde ayrı bir araştırma konusu olarak ele alınmaktadır. DSP bloklarının etkin biçimde kullanıldığı durumlarda paralel çarpan mimarileri LUT tüketimi açısından avantajlı hâle gelebilmekte, ancak DSP kaynaklarının sınırlı olduğu veya bu kaynakların başka hesaplamalar için ayrıldığı senaryolarda LUT-tabanlı çarpma çözümleri kaçınılmaz olmaktadır. ASIC tasarımlarda ise çarpma mimarisi seçimi, standart hücre kütüphanesi, hedef frekans ve güç bütçesi gibi parametrelere doğrudan bağlıdır ve bu seçim, çipin toplam alanı ve enerji tüketimi üzerinde belirleyici etki yaratmaktadır (Wang vd., 2017:3).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çarpma algoritmalarının çoğunlukla teorik mimari karşılaştırmalar veya idealize edilmiş performans ölçütleri üzerinden değerlendirildiği görülmektedir. Ancak pratik tasarımlarda elde edilen sentez sonuçları, kontrol mantığı, register kullanımı ve gerçekçi zamanlama kısıtları gibi etmenler nedeniyle teorik beklentilerden sapabilmektedir. Bu nedenle, belirli bit genişlikleri için elde edilen gerçek sentez çıktılarının analiz edilmesi, çarpma algoritmalarının uygulama bağlamındaki avantaj ve dezavantajlarının daha net ortaya konulmasına olanak tanımaktadır (Ansari vd., 2017:6).

Bu çalışma, 16-bitlik kaydır–topla ve dizi çarpanı (array multiplier) çarpma yöntemlerine ait sentez sonuçlarını temel alarak, çarpma algoritmalarının çip tasarımındaki kullanım koşullarını performans ve güç verimliliği perspektifinden değerlendirme amaçlanmaktadır. Elde edilen bulgular ışığında, yüksek veri işleme oranı gerektiren uygulamalarda paralel çarpan mimarilerinin hangi koşullarda tercih edilmesi gerektiği; düşük güç ve sınırlı donanım kaynaklarına sahip sistemlerde ise iteratif yaklaşımların nasıl avantaj sağladığı sistematik biçimde ele alınacaktır. Böylece, çarpma algoritması seçiminin yalnızca teorik mimari özelliklere değil, hedef uygulama gereksinimlerine ve gerçek sentez çıktılarının sunduğu somut verilere dayandırılması gerektiği ortaya konulacaktır.

ANALİZDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu çalışmada FPGA ve ASIC tabanlı sayısal tasarımlarda sıklıkla kullanılan çarpma algoritmalarının performans ve düşük güç tüketim odaklı tercih edilirken algoritmaların hangi yönlerine odaklanılması gerektiği ile ilgili analizler sunulmuştur. Bu analizlerde özellikle performans odaklı sistemlerde devrelerin paralelleştirilmesi önceliklenirken düşük güç odaklı sistemlerde ise sistemlerin seri çalışması öncelikli hale gelmiştir. Haliyle paralel çalışan sistemler daha fazla donanım barındırdığı için daha fazla güç tüketirken seri çalışan sistemler ise daha fazla gecikme ortaya koyarlar (Dereli, 2021:7). Bu çalışmada paralel çarpma özelliğine sahip en basit yapı olan dizi çarpanı (array multiplier) yöntemi ile seri işlem özelliğine sahip Kaydır-Topla çarpma devresi karşılaştırmalı olarak analiz edilerek devrelerin performans ve enerji verimliliği ortaya konulacaktır.

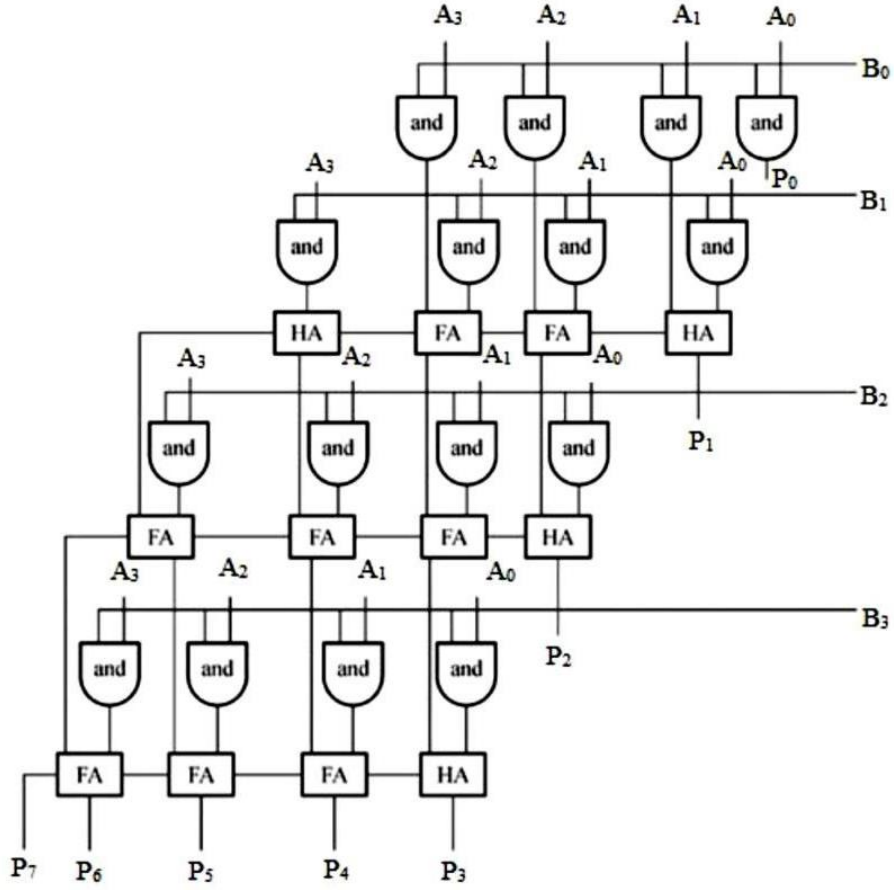


Şekil 3: Kaydır-Topla çarpma devresi blok şeması

Şekil-3'te "Kaydır-Topla" çarpma algoritmasına ait blok şeması görülmektedir. Bu devrede çarpan (multiplier) her defasında 1-bit sağa kaydırılmakta ve kaydırılan bit "1" ise çarpılan değer sonuca eklenmektedir. Dolayısıyla kaydırma işlemine muhatap olan bit sayısı arttıkça devrenin işlem süresi artmakta ve dolayısıyla da gecikme de (latency) o buna bağlı olarak artmaktadır. Ancak gerçekleştirilen işlemin döngüsel özelliği sayesinde donanım tekrar tekrar kullanıldığından güç tüketimi oldukça düşük seviyededir (Usman vd., 2023:4).

Şekil-4'te ise paralel çalışma özelliğine sahip olan dizi çarpanı devresine ait blok ve akış şeması görülmektedir, tamamıyla mantık kapılarından oluşan bu yöntem bileşik devre özelliğine sahip olduğundan 1-saat darbesinde çalışma özelliğine sahiptir. Bu nedenle de performans bakımından oldukça güçlü çıktılara sahiptir. Bu şekilde de görüldüğü üzere girişler AND kapılarıyla kısmi çarpımları oluşturur ve bu kısmi çarpımlar paralel bir şekilde yarım veya tam toplayıcılarla toplanarak sonucu oluşturur (Balasubramanian vd., 2020:6). Şekilde örnek olarak 4-bitlik iki sayının

çarpımına dair bir şema verilmiştir. Girişlerin bit sayısı arttıkça devrenin karmaşıklığı ve enerji tüketimi de buna bağlı olarak artacaktır.



Şekil 4: 4-bitlik iki sayıya ait dizi çarpanı (array multiplier) blok şeması

Günümüzde dizi çarpanı yönteminin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi neticesinde Wallace Tree ve Dadda Multiplier yöntemleri sayısal devrelerde ve çip tasarımlarında tercih edilmektedir. Tablo-1 bu üç paralel çalışma özelliğine sahip yöntemi karşılaştırmaktadır.

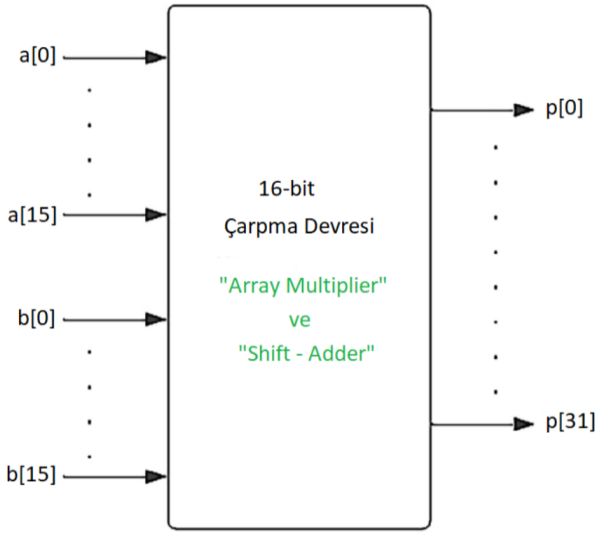
Tablo 1: Paralel çalışma özelliğine sahip çarpma devrelerinin karşılaştırılması

Kriter	Array Multiplier	Wallace Tree	Dadda Multiplier
Toplama Derinliği	O(N)	O(log N)	O(log N)
Hız	Düşük	Çok Yüksek	Yüksek
Alan	Yüksek	Yüksek	Daha Düşük
Routing Karmaşıklığı	Düşük	Çok Yüksek	Yüksek
Tasarım Zorluğu	Kolay	Zor	Orta
Eğitim Uygunluğu	Çok İyi	Zayıf	Orta

Tablo-1'de verilen bu üç yöntem derinlik (karmaşıklık), hız, donanım maliyeti (alan), fiziksel bağlantı karmaşıklığı, tasarım zorluğu ve eğitim için uygunluk kategorilerine göre karşılaştırılmıştır. Dizi çarpan yönteminin daha az karmaşık olması ve eğitim için uygunluğu bu çalışmaya konu olmasının altında yatan nedenlerdendir. En karmaşık fakat en hızlı yöntemin Wallace Tree olduğu bu tabloda görülmektedir. Dadda Çarpma yöntemi ise hız bakımından Wallace Tree'ye yakın ama kapladığı alan bakımından ise dizi çarpanı yöntemine daha yakındır. Dolayısıyla daha az karmaşık ama hızlı bir yöntem tercih edilecekse Dadda Çarpma yöntemi bunun için oldukça uygundur (Kavana ve Murthy, 2025:4).

DENEYLER VE ANALİZLER

Bu çalışmada seri ve paralel çarpma algoritmalarının sayısal tasarım yongalarında kullanılma tercihleri analiz edilmiştir. Bunun için paralel çarpma devresini temsilen dizi çarpanı (array multiplier) ve seri çarpma devresini temsilen de kaydır-topla (shift-adder) çarpma yöntemleri odak noktasına alınmıştır. Her iki algoritma da Vivado IDE arabiriminde Verilog HDL ile tasarlanarak yine bu IDE aracında hem güç hem de donanım maliyeti açısından analiz edilmiştir.



Şekil 5: 16-bitlik çarpma devresi blok şeması

Deneylerde Şekil-5'te blok şeması verilen 16-bitlik dizi çarpanı ve kaydır-topla çarpma devreleri ayrı ayrı tasarlanarak test ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Seri devre bir ardışık devre özelliği taşıdığından şemada görülen a, b ve p sinyalleri dışında giriş olarak saat çevrim ve reset sinyalleri ile çıkışta "bitti" sinyali de ayrıca yer almaktadır. "bitti" sinyali işlem sonucunu el sıkışma (hand-shake) yöntemi ile elde etmek maksadıyla kullanılmıştır.

Tablo 2: Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan girdi/çıktı değerleri

Deney	A	B	Paralel Çarpım (Dizi Çarpanı)	Seri Çarpım (Kaydır-Topla)
1	21	38	798	798
2	3	8	24	24
3	204	246	50184	50184
4	7	274	1918	1918

Tablo-2 hem dizi çarpanı hem de kaydır-topla yöntemleri ile gerçekleştirilen çarpma işlemlerine dair sonuçlar görülmektedir. Seri çarpım yöntemi ile sonuç 17-saat çevrim; paralel yöntem ile 1-saat çevrim sonrasında sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3: Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan girdi/çıktı değerleri

	Paralel Çarpım (Dizi Çarpanı)	Seri Çarpım (Kaydır-Topla)
Hız	17x	1x
Donanım Maliyeti	454 Cells, 742 Nets, 275 LUT	284 Cells, 375 Nets 64 LUT, 86 FF
Çalışma	Paralel	Seri
Güç	1.215 W (~3x)	3.665 W (1x)

Tablo-3'de her iki tasarımın dört faklı parametre temelinde karşılaştırması görülmektedir. Seri çevrim sonucu 17 saat çevriminde elde etmektedir, çünkü belli donanımları döngüsel olarak sürekli kullanmaktadır. Bu da kendisine bir gecikme olarak dönmektedir ki bu durum seri çarpma devresinin paralel çarpmaya göre 17 kat daha yavaş çalıştığını ortaya koymaktadır. Ancak bu durum donanım maliyeti açısından paralel çarpma devresinde kendini göstermektedir ki harcanan güç bakımından seri devre yaklaşık 3 kat daha az enerji tüketmektedir. Güç analizinde, güç tüketimine etkileri açıkça gözlemlensin diye giriş ve çıkışlar sabitlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada sayısal yonga tasarımlarında sıklıkla kullanılan çarpma algoritmalarının seçim analizleri ortaya konmuştur. Bunun için seri ve paralel işlem yapma kabiliyetine sahip iki farklı çarpma algoritması deney ve analizlerde kullanılmıştır. Seri yöntem için kaydır-topla, paralel çarpma yöntemi için ise dizi çarpanı (array multiplier) yöntemi kullanılmıştır. Deney ve analizlerde her iki tasarımda Vivado arabiriminde Verilog HDL ile 16-bit işlem kapasitesinde tasarlanmış ve aynı değerlerle test işlemi simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Seri yöntemin işlem sonucunu 17 saat çevriminde ve paralel yöntemin de 1 saat çevriminde sonucu vermesi seri/paralel yöntemlerinde 16-bitlik işlemlerde 17 katlık bir hız farkının olduğunu ortaya koymaktadır. Güç analizlerinde ise paralel yöntem seri yönteme nazaran daha fazla donanım kullandığı için yaklaşık 3 kat daha fazla enerji tüketmektedir. Dolayısıyla tasarım dünyasında bilinen daha az enerji için daha az donanım kullanılması ve bunun içinde donanımların döngüsel kullanımını sağlayan seri yöntemlerin tercihi doğrulanmıştır. Benzer şekilde daha performanslı işlemler için paralel yöntemler oldukça

etkilidir. Ancak güç/performans dengesinde benzer bir çarpan oluşmamaktadır. Zira paralel tasarım 17 katlık bir hız farkına rağmen 17 katlık fazla enerji tüketmemektedir. Bu durumda enerji tüketiminin çok çok önemli olmadığı durumlarda paralel veya kısmi paralel yöntemler sistemlerin hızlandırılması için kullanılabilir.

REFERANSLAR

Dai, F., Hossain, M. A., & Wang, Y. (2025). State of the art in parallel and distributed systems: Emerging trends and challenges. Electronics, 14(4), 677.

Varughese, D. A., & Sridevi, S. (2025). Optimization Strategies and Algorithms for Accelerating CNN on FPGA: A Comprehensive Review. Archives of Computational Methods in Engineering, 1-22.

Venkatachalam, A., Seerengasamy, U., & Ponraj, A. S. (2025). A scalable automated framework for multiply-accumulate unit design in high-performance computing applications. Scientific Reports, 15(1), 42713.

Kavana, L., & Murthy, G. K. (2025, March). Power and Area-Efficient Multiplier Architectures: A Comparative Study of Array, Dadda, Booth, Wallace Tree, and Vedic Multipliers. In 2025 3rd International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES) (pp. 1-6). IEEE.

Abed, S. E., Mohd, B. J., Al-bayati, Z., & Alouneh, S. (2012). Low power Wallace multiplier design based on wide counters. International Journal of Circuit Theory and Applications, 40(11), 1175-1185.

Anitha, P., & Ramanathan, P. (2014, February). A new hybrid multiplieusing Dadda and Wallace method. In 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS) (pp. 1-4). IEEE.

Asif, S., & Kong, Y. (2014). Low-Area Wallace Multiplier. Vlsi Design, 2014(1), 343960.

Tang, A. J. J., & Reyes, J. A. (2011, May). Comparative analysis of low power multiplier architectures. In 2011 Fifth Asia Modelling Symposium (pp. 270-274). IEEE.

Sakellariou, P., & Paliouras, V. (2016). Application-specific low-power multipliers. IEEE Transactions on Computers, 65(10), 2973-2985.

Antognazza, F., Barenghi, A., Pelosi, G., & Susella, R. (2024). Performance and efficiency exploration of hardware polynomial multipliers for post-quantum lattice-based cryptosystems. SN Computer Science, 5(2), 212.

Wu, Y., Chen, C., Xiao, W., Wang, X., Wen, C., Han, J., ... & Zhuo, C. (2024). A survey on approximate multiplier designs for energy efficiency: From algorithms to circuits. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 29(1), 1-37.

Wang, Q., Li, Y., Shao, B., Dey, S., & Li, P. (2017). Energy efficient parallel neuromorphic architectures with approximate arithmetic on FPGA. Neurocomputing, 221, 146-158.

Ansari, M. S., Mrazek, V., Cockburn, B. F., Sekanina, L., Vasicek, Z., & Han, J. (2019). Improving the accuracy and hardware efficiency of neural networks using approximate multipliers. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 28(2), 317-328.

Dereli, S. (2021). Micro-sized parallel system design proposal for the solution of robotics based engineering problem. Microsystem Technologies, 27(12), 4217-4226.

Usman, M., D. Ercegovac, M., & Lee, J. A. (2023). Low-latency online multiplier with reduced activities and minimized interconnect for inner product arrays. Journal of Signal Processing Systems, 95(7), 777-796.

Balasubramanian, P., Maskell, D. L., & Mastorakis, N. E. (2020). Speed, energy and area optimized early output quasi-delay-insensitive array multipliers. Plos one, 15(2), e0228343.

Kavana, L., & Murthy, G. K. (2025, March). Power and Area-Efficient Multiplier Architectures: A Comparative Study of Array, Dadda, Booth, Wallace Tree, and Vedic Multipliers. In 2025 3rd International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES) (pp. 1-6). IEEE.

Gecikmeden İvmelenmeye: Türkiye'de Elektrikli Araçlara Geçişin Ekonomik, Altyapısal ve Sosyolojik Dinamikleri

Abdulkadir ÖZDEN[1]

1- Dr. Öğr. Üyesi; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
aozden@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3657-890X

ÖZET

Elektrikli araçlar, artan enerji maliyetleri, iklim politikaları ve hızlanan teknolojik dönüşümün etkisiyle küresel mobilite sistemlerinin merkezinde yer almaya başlamıştır. Türkiye, elektrikli araç dönüşümüne öncü ülkelere kıyasla daha geç dâhil olmuş; ancak özellikle 2021 sonrasında sergilediği hızlı büyüme ile gelişmekte olan ekonomiler arasında dikkat çekici bir adaptasyon sürecine girmiştir. Bu ivmelenme, tek bir faktörle açıklanamayacak olup ekonomik baskılar, şarj altyapısındaki genişleme ve toplumsal algıdaki değişimlerin eşzamanlı etkisiyle şekillenen çok boyutlu bir dönüşümü yansıtmaktadır. Bu çalışma, Türkiye'de elektrikli araç adaptasyonunu ekonomik, altyapısal ve sosyolojik boyutları birlikte ele alan bütüncül bir çerçevede incelemektedir. 2004–2025 dönemine ait toplam araç stoku verileri, 2021 sonrası aylık yeni araç kayıtları ve 2030 perspektifli senaryo analizleri, yakıt türlerine göre yapısal bir dönüşümün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bulgular, dizel ve LPG'li araçların göreli önemini kaybettiğini; hibrit ve tam elektrikli araçların ise pazarın ana büyüme eksenlerinden biri haline geldiğini göstermektedir. Özellikle artan akaryakıt fiyatları ve vergi yapısı, elektrikli araçları şehir içi kullanımda ekonomik açıdan cazip bir seçenek haline getirmiştir. Hibrit ve plug-in hibrit araçlar ise menzil ve şarj altyapısına ilişkin kaygıları azaltarak geçiş sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. Bununla birlikte, şarj altyapısının bölgesel olarak dengesiz gelişimi, kullanıcı deneyiminde yaşanan operasyonel sorunlar ve dijital okuryazarlık düzeyindeki farklılıklar, dönüşümün sürdürülebilirliği açısından önemli sınırlılıklar oluşturmaktadır. Çalışma, Türkiye'de elektrikli araçlara geçişin kısa vadeli bir pazar başarısı olarak değil; altyapı, insan kaynağı ve toplumsal adaptasyonu kapsayan uzun vadeli bir mobilite dönüşümü olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Elektrikli Araçlar, Ulaşım Planlaması, Hibrit Araçlar, Ulaşım Politikaları, Şarj İstasyonları

GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA), küresel ölçekte ulaştırma sektörünün karbon yoğunluğunu azaltmaya yönelik politikaların merkezinde yer almakta ve otomotiv endüstrisinin teknolojik dönüşümünü hızlandırmaktadır. İklim değişikliğiyle mücadele, enerji arz güvenliği ve fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması gibi nedenlerle birçok ülke, elektrikli araçların yaygınlaşmasını teşvik eden kapsamlı stratejiler geliştirmiştir. Özellikle Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkeleri; regülasyonlar, teşvik mekanizmaları ve üretim kapasitesindeki yatırımlarla küresel elektrikli araç pazarının yönünü belirleyen başlıca aktörler haline gelmiştir. Bu süreç, yalnızca araç teknolojilerindeki dönüşümü değil, aynı zamanda tüketici davranışlarını, altyapı planlamasını ve otomotiv endüstrisinin değer zincirini de köklü biçimde etkilemektedir.

Türkiye ise elektrikli araç dönüşümünü, kendine özgü ekonomik, altyapısal ve sosyolojik dinamikler çerçevesinde deneyimlemektedir. Son yıllarda, yüksek akaryakıt fiyatları, dizel ve LPG'nin ekonomik cazibesini yitirmesi, hibrit ve elektrikli araçlara olan talebi hızlandırırken; şarj altyapısının bölgesel olarak dengesiz gelişimi ve dijital okuryazarlık düzeyleri bu dönüşümün hızını ve biçimini belirleyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Bu çalışma, Türkiye'de elektrikli araç sahipliği ve kullanımındaki artışı; küresel eğilimlerle ilişkili ancak yerel koşullarla şekillenen bir geçiş süreci olarak ele almakta ve ekonomik gerekçeler, altyapı kapasitesi ile sosyoteknolojik adaptasyon boyutlarını bütüncül bir perspektifle değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

DÜNYADA ELEKTRİKLİ ARAÇ TRENDİ: ÜLKELER VE ÜRETİCİLER

Küresel elektrikli araç pazarında 2025 itibarıyla yaşanan dönüşüm, elektrikli araçların artık bir niş teknoloji olmaktan çıkarak endüstriyel rekabetin merkezine yerleştiğini göstermektedir. 2024'te toplam EAsatışları yaklaşık 17,8 milyon adete ulaşmış olup, 2025'te bu rakamın 22 milyon adeti aşması beklenmektedir (EV Volumes, 2025). Bu büyüme, Çin, Avrupa ve ABD gibi üç büyük pazarın toplam satışların %95'ini oluşturduğu bir yapı ortaya koymuştur (Virta, 2025), ancak her bölgenin stratejik yönelimi farklılaşmaktadır. Örneğin Çin, elektrikli araçları hızla fiyat-pariteye (içten

yanmalı araçlarla fiyat eşitliği) yaklaştırarak yüksek hacim ve yerel üretim entegrasyonunu öncelemiş durumdadır, bu da ülkenin küresel pazar payının artmasına katkı sağlamıştır (IEA, 2025). Buna karşılık Avrupa Birliği, daha sıkı CO_2 emisyon hedefleri ve 2035'te içten yanmalı motorlu (ICE) araç satışını sonlandırma hedefiyle, regülasyon ağırlıklı bir yaklaşım izlemekte; bu durum, üreticileri daha fazla EA üretmeye zorlamaktadır (IEA, 2025).

Çin'in pazar liderliği hem satış hacmi hem de üretim kapasitesi açısından somutlaşmıştır. Bu ülkede, EA satışlarının 2025'te yeni araç satışlarının yarısından fazlasını oluşturduğu ve EA endüstrisinin küresel satışlarda belirleyici aktör olduğu görülmektedir (Graham, 2025). Çinli üreticiler, batarya üretimi ve kritik ham madde işleme gibi alanlarda küresel zincirde güçlü bir konum elde etmiş ve bu sayede maliyet rekabet avantajını artırmıştır. Bu bağlamda BYD, 2025'in ilk aylarında yaklaşık 3,3 milyon araç satarak küresel hacim lideri konumuna gelmiş ve üretim kapasitesini Avrupa ve diğer pazarlara genişletmektedir (SNE Research, 2025). Öte yandan ABD pazarında Tesla, teknoloji ve yazılım üstünlüğü ile öne çıkmaya devam ederken pazarın genel büyüme hızının gerisinde kalmaktadır (Counterpoint Research, 2025). Avrupa'da ise geleneksel üreticiler (ör. Volkswagen Grubu) ve Çinli markalar arasındaki rekabet sertleşmiş; Çinli araçların Avrupa pazarında artan satışlarına karşı koymak için AB tarafından getirilen %17–%38 oranındaki ek tarifeler gibi politika araçları gündeme gelmiştir (Reuters, 2025).

Bu farklı dinamikler, küresel EA pazarının homojen olmayan fakat hızla büyüyen bir yapıyı göstermektedir. Çin'in üretim ve satış alanındaki liderliği, Avrupa'nın regülasyon ve teknoloji odaklı yaklaşımı ile Amerika Birleşik Devletleri'nin premium segment ağırlıklı stratejisi, küresel EA ekosistemini şekillendiren önemli etkenler olarak ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda üreticiler arasındaki rekabet, Hibrit ve Plug-in Hibrit modellerin de politikalardaki boşluklar ve tüketici tercihlerindeki geçiş rolleriyle birlikte ele alınması gereken çok boyutlu bir dönüşüm sürecini işaret etmektedir.

TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇLARA GEÇİŞİN BAĞLAMI

Türkiye'nin elektrikli araç dönüşümü, küresel öncülerle karşılaştırıldığında görece gecikmeli başlamış; ancak son yıllarda "sıkıştırılmış dönüşüm" olarak nitelenebilecek kadar hızlı bir ivmelenme sergilemiştir. Bu hızlanma, tek bir nedene indirgenemeyecek düzeyde karmaşık bir yapıya sahip olup ekonomik teşvikler, altyapı kapasitesindeki büyüme ve toplumsal/algısal dönüşümün eşzamanlı etkisiyle açıklanabilecek çok boyutlu bir süreçtir. Nitekim 2025'te bazı aylarda elektrikli araçların toplam satışlar içindeki payının %25'lere ulaştığına ilişkin bulgular, pazarın artık "kalıcı bir kırılma" eşiğine geldiğini göstermektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025).

Bu hızlanmanın temelinde güçlü bir ekonomik yönlendirme mekanizması bulunmaktadır. Türkiye'de içten yanmalı motorlu araçlara uygulanan yüksek Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) oranları, elektrikli araçlarla geleneksel araçlar arasında belirgin bir maliyet farkı yaratmıştır. Son dönemde yapılan vergi düzenlemeleri ile, elektrikli araçlar için uygulanan ÖTV oranlarının %10–%60 bandında kalması, buna karşılık benzinli ve dizel araçlarda bu oranın %80 ve çok üzerine çıkması, özellikle orta gelir grupları için elektrikli araçları daha rasyonel bir tercih haline getirmiştir. Buna ek olarak, yerli elektrikli araç markası Togg, 2024 yılı itibarıyla bataryalı elektrikli araç (BEV) ülke pazarında yaklaşık %30'luk bir paya ulaşarak dönüşüm sürecinin sembolik ve ekonomik taşıyıcısı haline gelmiştir (Anadolu Ajansı, 2025). Aynı zamanda, BYD'nin $1 milyar yatırımla Türkiye'de üretim tesisi kurma kararı, ülkenin yalnızca bir tüketici pazarı değil, bölgesel bir EA üretim merkezi olma iddiasını güçlendirmektedir (Reuters, 2024).

Altyapısal gelişmeler, bu ekonomik yönelimin sahada karşılık bulmasını sağlayan ikinci temel bileşendir. Türkiye'de şarj altyapısı özellikle 2024 ve 2025 yıllarında hızlı bir yaygınlaşma göstermiş; 2025 yılı sonunda ülke genelindeki şarj soketi sayısı 37.000'in üzerine çıkmıştır (EPDK, 2025). Bu artış, menzil kaygısını azaltmak açısından önemli bir eşik oluştururken, altyapının bölgesel dağılımı ve operasyonel güvenilirliği hâlâ tartışma konusudur. Özellikle batı ve kuzeybatı bölgelerinde yoğunlaşan şarj ağının, Anadolu'nun diğer bölgelerinde daha sınırlı kalması, elektrikli araç kullanımını mekânsal olarak farklılaştırmaktadır. Bununla birlikte, otoyol koridorlarında kurulan yüksek hızlı DC şarj istasyonları, uzun mesafeli

yolculuk kültürüne sahip Türkiye için stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Sosyolojik açıdan bakıldığında, elektrikli araçların Türkiye'de giderek bir "ulaşım aracından" ziyade bir teknolojik ürün ve statü göstergesi olarak algılandığı görülmektedir. Teknoloji Kabul Modeli (Technology Acceptance Model) çerçevesinde değerlendirildiğinde, algılanan fayda ve sosyal çevrenin etkisi, elektrikli araç benimsemesinde belirleyici rol oynamaktadır. Türkiye bağlamında otomobilin statüyle güçlü biçimde ilişkilendirilmesi, erken benimseyicilerin tercihlerini görünür kıldıkça ikincil şehirlerde de talebin hızla artmasına yol açmıştır. Ayrıca Togg'un yerli üretim kimliği, elektrikli araç sahipliğini çevresel bir tercihin ötesine taşıyarak ulusal teknoloji ve sanayi anlatısıyla ilişkilendirmiş; bu durum tüketicilerin elektrikli araçları "geleceğe yatırım" olarak görmesini kolaylaştırmıştır (Kirmizigül & Baykal, 2023; SETA, 2025). Bu sebeple Türkiye'de elektrikli araçlara geçiş, ekonomik teşvikler, altyapısal kapasite ve sosyoteknolojik adaptasyonun birlikte şekillendirdiği çok katmanlı bir dönüşüm süreci olarak değerlendirilmelidir.

TÜRKİYE'DE ARAÇ SAHİPLİĞİ VE YAKIT TÜRLERİNE GÖRE DÖNÜŞÜM EĞİLİMLERİ

Türkiye'de araç sahipliği, 2004 yılından bu yana istikrarlı bir artış eğilimi göstermiş; özellikle son on beş yılda nüfus artışı, kentleşme ve bireysel mobilite talebindeki yükselişle birlikte toplam araç parkı belirgin biçimde genişlemiştir. Bu uzun dönemli artış eğilimi, yakıt türleri bakımından homojen bir yapı sergilememekte; aksine, dönemsel ekonomik koşullar, enerji fiyatları ve politika müdahaleleri doğrultusunda yakıt türleri arasında belirgin geçişler gözlenmektedir. Özellikle 2020 sonrası dönemde, küresel pandemi etkisi, tedarik zinciri sorunları ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmalar, Türkiye otomotiv pazarında hem toplam satış hacmini hem de yakıt türlerine göre tercihleri yeniden şekillendirmiştir.

2021 yılı sonrasında aylık yeni araç kayıtlarında belirgin bir kırılma yaşandığı görülmektedir. Grafikte benzinli araçların hâlen aylık satışlarda en yüksek payı koruduğu, ancak dalgalı bir seyir izlediği dikkat çekmektedir. Dizel araç satışları ise 2021–2023 döneminde görece yüksek seviyelerde seyrederken, 2024 sonrası dönemde belirgin bir gerileme eğilimine girmiştir.

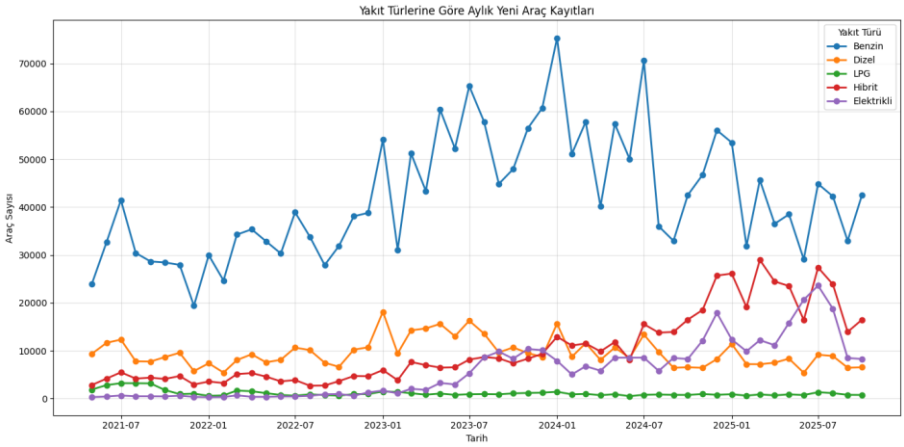
Bu durum, dizel motorlara yönelik küresel regülasyon baskıları, artan maliyetler ve ikinci el değerine ilişkin belirsizliklerle uyumlu bir görünüm sunmaktadır. LPG'li araçlar ise aylık yeni kayıtlar açısından düşük ve yatay bir seyir izlemekte; bu da LPG'nin geçmişteki "ekonomik alternatif" konumunu büyük ölçüde kaybettiğine işaret etmektedir.

Göstergeler hibrit ve plug-in hibrit araçların Türkiye otomotiv pazarında giderek daha önemli bir geçiş teknolojisi rolü üstlendiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. 2022 sonrası dönemde hibrit araç satışlarında gözlenen hızlı artış, tüketicilerin tam elektrikli araçlara geçiş öncesinde menzil ve şarj altyapısı kaygılarını azaltmaya yönelik bir ara çözüm arayışında olduklarını düşündürmektedir. Bununla birlikte, tam elektrikli araçların aylık yeni kayıtlar içindeki payının özellikle 2023 ve sonrasında güçlü bir ivme kazandığı görülmektedir. 2024 ve 2025 yıllarında elektrikli araç satışlarındaki sıçrama, yalnızca bir artış trendine değil, pazarın yapısal olarak dönüşmeye başladığına işaret etmektedir (Tablo 1 ve Şekil 1).

Tablo 1: Yakıt türüne göre yeni kayıtlı araç sayıları (2021 ve 2025'ten örneklem)

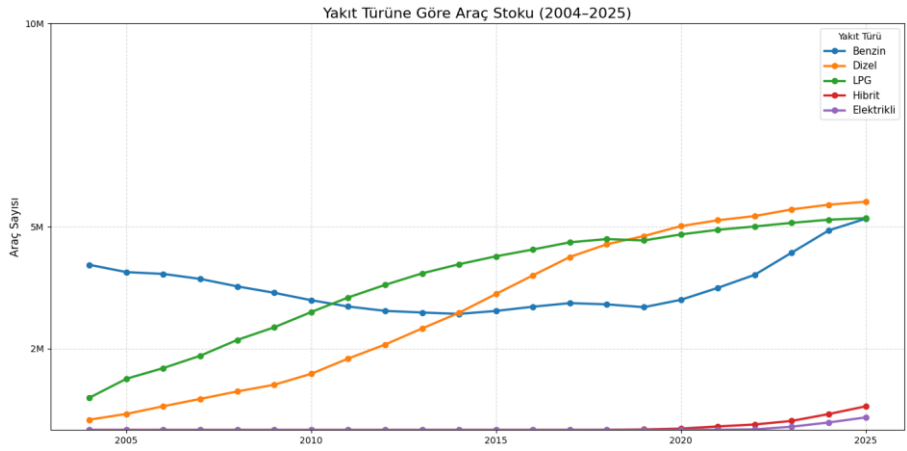
Yıl	Ay	Benzin	Dizel	LPG	Hibrit	EA	Toplam
2021	Mayıs	23.939	9.368	1.904	2.850	327	38.388
2021	Haziran	32.724	11.673	2.842	4.204	450	51.893
2021	Temmuz	41.468	12.339	3.234	5.507	670	63.218
2021	Ağustos	30.430	7.810	3.226	4.200	502	46.168
2021	Eylül	28.660	7.749	3.192	4.387	500	44.488
2021	Ekim	28.447	8.686	1.812	4.118	475	43.538
2021	Kasım	27.946	9.588	956	4.731	616	43.837
2021	Aralık	19.407	5.762	1.050	2.956	383	29.558
2025	Ocak	53.486	11.423	928	26.126	12.372	104.335
2025	Şubat	31.868	7.220	636	19.116	9.891	68.731
2025	Mart	45.657	7.192	893	28.976	12.221	94.939
2025	Nisan	36.523	7.509	692	24.472	11.173	80.369
2025	Mayıs	38.498	8.359	898	23.532	15.819	87.106
2025	Haziran	29.100	5.411	763	16.429	20.658	72.361
2025	Temmuz	44.857	9.186	1.350	27.391	23.623	106.407
2025	Ağustos	42.258	8.908	1.161	23.886	18.776	94.989
2025	Eylül	32.967	6.467	803	13.941	8.499	62.677
2025	Ekim	42.520	6.550	779	16.503	8.284	74.636

Kaynak: Motorlu Kara Taşıtlar, TÜİK, 2025



Şekil 1: Yakıt türlerine göre aylık yeni kayıt yapılan araç sayısı (2021-2025) (TÜİK, 2025)

Aylık yeni araç kayıtlarında gözlenen dönüşüm, toplam araç parkına daha yavaş ancak kalıcı bir biçimde yansımaktadır. Şekil 2, 2004–2025 döneminde yakıt türlerine göre toplam araç stokunun evrimini göstermekte; benzinli ve dizel araçların uzun yıllar boyunca toplam araç stokundaki baskın konumunu koruduğunu, ancak özellikle 2015 sonrasında bu hâkimiyetin göreli olarak zayıflamaya başladığını ortaya koymaktadır. Dizel ve LPG'li araçların artış hızının yavaşladığı, benzinli araçların ise dalgalı ancak sınırlı bir toparlanma sergilediği görülmektedir. Buna karşılık hibrit araçlar 2018 sonrası dönemde belirgin bir yükseliş eğilimine girmiş, tam elektrikli araçlar ise düşük bir tabandan başlayarak özellikle 2021 sonrasında hızlanan bir artış göstermiştir. Bu tablo, kısa vadede içten yanmalı araçların toplam stok içindeki ağırlığının süreceğine işaret etmekle birlikte, orta vadede hibrit ve elektrikli araçların Türkiye'de araç parkının yapısını kademeli ancak yönü net bir biçimde dönüştürmeye başladığını göstermektedir.



Şekil 2: Yakıt türlerine göre toplam araç sayısı (2004-2025) (TÜİK, 2025)

EKONOMİK DİNAMİKLER: NEDEN ELEKTRİKLİ ARACA GEÇİLİYOR?

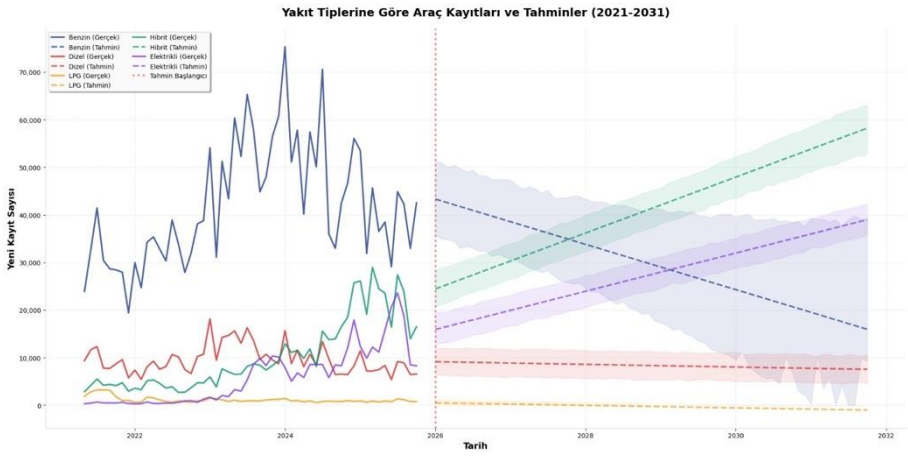
Türkiye'de elektrikli araçlara yönelimin temelinde, artan benzin ve dizel fiyatlarının hane bütçeleri üzerindeki baskısı ve buna karşılık elektrikli araçların özellikle şehir içi kullanımda sunduğu düşük işletme maliyeti yer almaktadır. İçten yanmalı motorlu araçların toplam sahip olma maliyetinin yükselmesi, dizel motorlara yönelik küresel regülasyon baskıları ve üreticilerin bu segmentten kademeli olarak çekilmesiyle birleşerek, dizel araçların uzun vadeli cazibesini azaltmaktadır. LPG'li araçlar ise geçmişteki maliyet avantajını büyük ölçüde kaybetmiş; dönüşüm, bakım ve performansla ilgili sınırlamalar nedeniyle "ekonomik çözüm" algısından uzaklaşmıştır. Bu ortamda hibrit ve plug-in hibrit araçlar, menzil ve şarj altyapısı endişelerini azaltan bir ara çözüm sunarak, tüketicilerin tam elektrikli araçlara geçişte algıladıkları riski düşürmekte ve dönüşüm sürecini kademeli hale getirmektedir (Öztürk, Tansu, & Uz, 2021; Sezen & İşler, 2017).

Elektrikli araçlara geçişin ekonomik temellerini güçlendirmek için politika yapıcıların yalnızca satın alma teşviklerine değil, toplam kullanım maliyetini düşüren bütüncül araçlara odaklanması gerekmektedir. Akaryakıt vergileri ile elektrikli araçlara yönelik vergi avantajları arasındaki farkın öngörülebilir biçimde korunması, şarj maliyetlerinin şeffaf ve rekabetçi tutulması ve hibrit–plug-in hibritlerin kontrollü biçimde "geçiş teknolojisi"

olarak konumlandırılması, dönüşümün hem sosyal kabulünü hem de piyasa istikrarını artıracaktır (Özbay, Közkurt, Dalcalı & Tektaş, 2020).

ORTA-UZUN VADELİ PROJEKSİYONLAR VE TÜRKİYE SENARYOSU

2021–2025 döneminde gözlenen eğilimler, Türkiye'de elektrikli araç pazarının düşük bir tabandan hızla büyüyen bir yapıya geçtiğini göstermektedir. Aylık yeni araç kayıtlarına dayalı tahminleri içeren Şekil 3, bu dönemde hibrit ve tam elektrikli araçların benzinli ve dizel araçlara kıyasla daha yüksek bir büyüme ivmesi yakaladığını ortaya koymaktadır. Özellikle 2023 sonrası dönemde elektrikli araç kayıtlarındaki artışın istatistiksel dalgalanmalara rağmen yukarı yönlü bir trend izlemesi, bu büyümenin geçici bir sıçrama değil, yapısal bir dönüşüm sürecinin parçası olduğuna işaret etmektedir. 2025 yılı istatistiklerinde elektrikli ve hibrit araçların yeni araç kayıtlarındaki payının %35-%45 arasında değiştiği gözlenmektedir. Aynı dönemde benzinli ve dizel araçların yeni kayıtlar içindeki payının azalma eğilimi ve LPG'li araçların marjinal bir düzeyde kalması, yakıt türleri arasındaki geçişin yönünü netleştirmektedir.

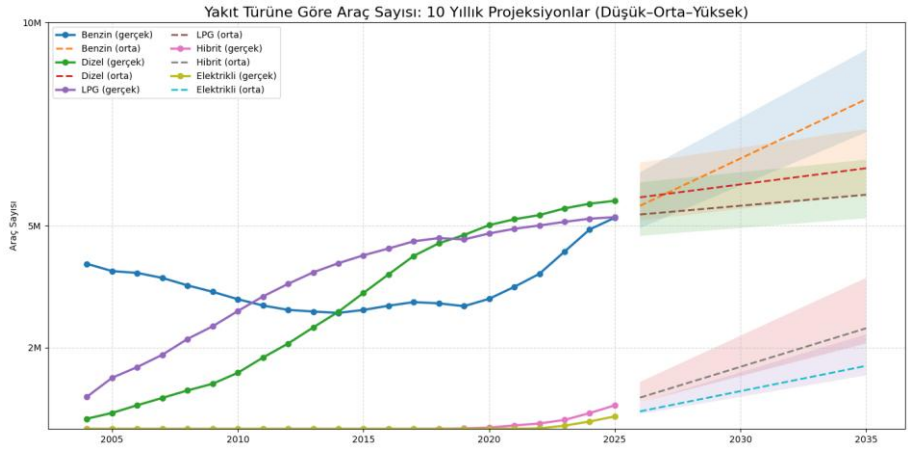


Şekil 3: Yakıt türlerine göre aylık yeni kayıt yapılan araç sayısı projeksiyonu

2030'a kadar olan dönemi kapsayan düşük, orta ve yüksek artımlı senaryolar, toplam araç parkının yakıt türlerine göre evriminde farklı hızlara işaret etse de, tüm senaryolarda ortak bir eğilim öne çıkmaktadır. Düşük

senaryoda dahi elektrikli ve hibrit araçların toplam stok içindeki payının düzenli biçimde artacağı; orta ve yüksek senaryolarda ise bu artışın çok daha belirgin hale geleceği görülmektedir. Benzinli ve dizel araçlar mutlak sayı olarak mevcut araç stokundaki varlığını sürdürmeye devam etse de, büyümenin ana bileşenlerinden ikisinin de hibrit ve elektrikli araçlar olduğu açık biçimde izlenmektedir. Bu durum, Türkiye'de dönüşümün ani bir ikame şeklinde değil, çoklu teknolojilerin bir arada bulunduğu kademeli bir geçiş modeli üzerinden ilerleyeceğini göstermektedir.

Elektrikli araçların toplam araç parkındaki payının evrimi açısından bakıldığında, 2030 perspektifi kritik bir eşik oluşturmaktadır. Şekil 4, elektrikli araçların stok içindeki payının 2025 sonrası dönemde ivmelenerek artacağını ve orta senaryoda park yapısında anlamlı bir ağırlık kazanacağını göstermektedir. Bu tablo, altyapı yatırımları, vergi politikaları ve tüketici davranışları arasındaki etkileşimin sürmesi halinde, elektrikli araçların Türkiye'de yalnızca yeni satışlarda değil, toplam araç parkında da belirleyici bir bileşen haline geleceğine işaret etmektedir. Dolayısıyla 2035'e uzanan projeksiyonlar, Türkiye'nin elektrikli araç dönüşümünde "erken benimseyen" ülkelerle tam bir yakınsama sağlamasa da, gecikmeli fakat hızlanan bir uyum sürecini başarıyla tamamlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 4: Yakıt türlerine göre toplam araç sayısı projeksiyonu (2025-2035)

TÜRKİYE'NİN ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇ ADAPTASYONUNDA ÖNEMLİ BİLEŞENLER

Türkiye'de elektrikli ve hibrit araç adaptasyonunun en kritik bileşenlerinden biri şarj altyapısının yaygınlığı ve işlevselliğidir. Son yıllarda AC ve DC şarj istasyonlarının sayısında belirgin bir artış yaşanmış; bu gelişme büyük ölçüde özel sektör yatırımlarıyla şekillenmiştir. Kamu otoriteleri ise daha çok lisanslama, teknik standartların belirlenmesi ve piyasanın düzenlenmesi rolünü üstlenmektedir (EPDK, 2025). Bununla birlikte altyapı gelişimi mekânsal olarak homojen değildir. Batı ve özellikle Kuzeybatı Türkiye'de şarj istasyonları daha yoğun ve erişilebilirken, iç ve doğu bölgelerde altyapı eksiklikleri sürmektedir. Kullanıcı deneyimi açısından bakıldığında ise istasyon arızaları, farklı uygulama ve ödeme sistemleri arasındaki uyumsuzluklar ve standartlaşma eksikliği, elektrikli araç kullanımını zorlaştıran temel operasyonel sorunlar olarak öne çıkmaktadır.

Elektrikli araçların kullanım avantajları ve sınırlılıkları, Türkiye'nin mekânsal yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Şehir içi kullanımda kısa mesafeler, rejeneratif frenleme ve düşük hız profilleri sayesinde elektrikli araçlar hem ekonomik hem de operasyonel açıdan avantaj sağlamaktadır. Buna karşılık uzun mesafeli yolculuklar, menzil kaygısı ve şarj planlama zorunluluğu nedeniyle kullanıcılar için daha karmaşık bir deneyim sunmaktadır. Türkiye'nin dağlık topoğrafyası, bölgesel mesafe dağılımları ve şehirler arası yolculuk kültürü, elektrikli araç kullanımını sadece teknik değil, mekânsal bir planlama meselesi haline getirmektedir. Bu nedenle şarj altyapısının yalnızca sayısal artışı değil, otoyol koridorları ve stratejik geçiş noktalarındaki konumlanması da kritik önem taşımaktadır (Demirdaş vd., 2021).

Türkiye'de elektrikli araçlar giderek geleneksel bir otomobilden ziyade, dijital bir teknolojik ürün olarak algılanmaktadır. Yazılım güncellemeleri, mobil uygulamalar, kullanıcı arayüzleri ve bağlantılı hizmetler, araç kullanım deneyiminin ayrılmaz parçaları haline gelmiştir. Ancak bu dönüşüm, dijital okuryazarlık düzeyinin sınırlı olduğu kullanıcı gruplarında çekince ve mesafe yaratabilmektedir. Elektrikli araçların teknik yapısına ilişkin bilgi eksikliği, kullanıcıların servis ve teknik desteklere yüksek derecede bağımlı hale gelmesine yol açmakta; yanlış kullanım ve gerçekçi olmayan beklentiler adaptasyon sürecini zorlaştırmaktadır (Darbinian, Osibo, Septime, & Meyrem, 2023). Dolayısıyla Türkiye'de elektrikli araç adaptasyonu, yalnızca

teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda bilgi, güven ve deneyim temelli bir toplumsal öğrenme süreci olarak değerlendirilmelidir.

Türkiye'nin güçlü yan sanayi ve otomotiv bakım-onarım geleneği, elektrikli araç dönüşümü açısından hem önemli fırsatlar hem de ciddi riskler barındırmaktadır. Elektrikli araçların mekanik parça sayısının azalması, geleneksel bakım ihtiyacını düşürürken; elektronik, batarya ve yazılım odaklı yeni bir uzmanlık alanını zorunlu kılmaktadır. Mevcut servis altyapısının bu dönüşüme yeterince hızlı uyum sağlayamaması durumunda, nitelikli teknik insan kaynağı eksikliği önemli bir darboğaz haline gelebilir. Öte yandan uygun eğitim ve sertifikasyon mekanizmalarıyla desteklenmesi halinde, Türkiye'nin yan sanayi kapasitesi elektrikli araç ekosistemine entegre olma ve yeni katma değer alanları yaratma potansiyeline sahiptir.

Elektrikli araç dönüşümünün sürdürülebilirliği, büyük ölçüde politika ve planlama çerçevesinin tutarlılığına bağlıdır. Türkiye'de teşvik mekanizmaları elektrikli araç satışlarını hızlandırmış olsa da, uzun vadeli ve bütüncül bir ulusal stratejinin eksikliği dikkat çekmektedir. Araç sayısındaki hızlı artış ile şarj altyapısının gelişim hızı arasındaki dengesizlik, gelecekte sistemik sorunlara yol açabilecek bir risk alanı oluşturmaktadır. Ayrıca yerel yönetimlerin şehir içi ulaşım, otopark politikaları ve şarj altyapısı planlamasıyla yeterince entegre edilmemesi, elektrikli araçların kentsel mobilite sistemlerine tam anlamıyla entegre olmasını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda elektrikli araş adaptasyonu, yalnızca otomotiv sektörü değil, ulaşım planlaması ve kentsel yönetişim meselesi olarak ele alınmalıdır.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Türkiye'de elektrikli araçlara geçiş süreci, gecikmeli başlamasına rağmen son yıllarda dikkat çekici bir hız kazanmış ve bu yönüyle birçok gelişmekte olan ülke için öğretici bir örnek sunmuştur. Ekonomik baskılar, özellikle akaryakıt fiyatlarının kullanıcılar üzerindeki etkisi, tüketicileri elektrikli ve hibrit araçlara yönelten önemli bir itici güç oluşturmuştur. Bununla birlikte, bu yönelimin büyük ölçüde maliyet avantajlarına dayanması, dönüşümün kırılgan bir yapıya sahip olabileceğini de düşündürmektedir. Vergi politikalarındaki ani değişimler veya enerji fiyatlarındaki oynaklık, tüketici davranışlarını hızla tersine çevirebilecek potansiyel riskler barındırmaktadır. Dolayısıyla Türkiye'de elektrikli araç

adaptasyonu, güçlü bir ivmeye sahip olmakla birlikte, uzun vadeli istikrar açısından halen desteklenmeye ve kurumsallaştırılmaya ihtiyaç duymaktadır.

Altyapı açısından bakıldığında, Türkiye son dönemde özellikle büyükşehirler ve ana ulaşım koridorlarında önemli ilerlemeler kaydetmiştir; ancak bu gelişme ülke geneline dengeli biçimde yayılmamıştır. Şarj altyapısındaki bölgesel eşitsizlikler, elektrikli araç kullanımını mekânsal olarak seçici hale getirmekte ve özellikle uzun mesafeli yolculuklarda kullanıcı deneyimini sınırlamaktadır. Ayrıca altyapı yatırımlarının büyük ölçüde özel sektör öncülüğünde ilerlemesi, hizmet kalitesi ve standartlaşma konularında tutarsızlıklara yol açmaktadır. Bu durum, altyapı gelişiminin niceliksel artışın ötesinde, koordinasyon, güvenilirlik ve kamusal yönlendirme boyutlarıyla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Aksi halde, araç sahipliğindeki hızlı artış ile altyapının taşıma kapasitesi arasında yapısal bir uyumsuzluk riski doğabilir.

Kültürel ve sosyolojik açıdan elektrikli araçlar, Türkiye'de yalnızca çevreci bir ulaşım seçeneği değil, aynı zamanda teknolojiye erişim, statü ve modernlik göstergesi olarak algılanmaktadır. Bu algı, özellikle yerli üretim vurgusuyla desteklenen markalar aracılığıyla güçlenmiş; sosyal çevrenin ve sembolik değerlerin benimseme sürecinde önemli rol oynamasına neden olmuştur. Ancak dijital okuryazarlık düzeyindeki farklılıklar, teknik bilgi eksikliği ve servis altyapısına duyulan güvensizlik, bu sürecin herkes için eşit ilerlemesini zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda politika yapıcılar açısından temel mesele, elektrikli araçları yalnızca ekonomik teşviklerle yaygınlaştırmak değil; altyapı planlamasını, teknik insan kaynağı gelişimini ve kullanıcı bilgilendirmesini birlikte ele alan bütüncül bir yönetişim çerçevesi oluşturmaktır. Böyle bir yaklaşım, Türkiye'nin elektrikli araç dönüşümünü kısa vadeli bir pazar başarısından, uzun vadeli ve toplumsal olarak kapsayıcı bir mobilite dönüşümüne taşıyacaktır.

REFERANSLAR

Anadolu Ajansı. (2025, December 3). Türkiye's Togg becomes top-selling electric car in Turkish auto market. Anadolu Ajansı. https://www.aa.com.tr/en/economy/turkiye-s-togg-becomes-top-selling-electric-car-in-turkish-auto-market/3767580 adresinden 5 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Counterpoint Research. (2025). Global electric vehicle market share: Quarterly. https://counterpointresearch.com/en/insights/global-electric-vehicle-market-share-quarterly adresinden 2 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Darbinian, K., Osibo, B. K., Septime, M. M. C., & Meyrem, H. (2023). Investigating the Barriers to Electric Vehicle Adoption among Older Adults using Grey Relational Analysis: A Cross-country Survey. Management Science and Business Decisions, 3(2), 18–34. https://doi.org/10.52812/msbd.80

Demirtaş, M., Yılmaz, E., Ünal, C., Küçükpehlivan, T., Ağaçsapan, B., & Aksoy, T. (2021). Elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarının konumlandırılması. GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies (AIST), 4(1), 11–32.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). Şarj hizmeti piyasası aylık istatistikleri: Temmuz 2025. EPDK.

EV Volumes. (2025). Global electric vehicle sales data, market trends & forecasts you can trust. https://ev-volumes.com/ adresinden 1 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Graham, E. (2025). The EV leapfrog: How emerging markets are driving a global EV boom. Ember. https://ember-energy.org/latest-insights/the-ev-leapfrog-how-emerging-markets-are-driving-a-global-ev-boom/ adresinden 6 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

International Energy Agency. (2025). Global EV outlook 2025: Expanding sales in diverse markets. IEA. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025 adresinden 3 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Kirmizigül, İ. E., & Baykal, B. (2023). Elektrikli araç tercihinde tüketici motivasyonu. Sosyal Bilimler Metinleri, 2023(2), 223–241. https://doi.org/10.56337/sbm.1352994

Reuters. (2024, July 8). China EV maker BYD to build $1-bln plant in Turkey. Reuters. https://www.reuters.com/business/autos-transportation/china-ev-maker-byd-build-1-bln-plant-turkey-2024-07-08/ adresinden 4 Kasım 2025 tarihinde alınmıştır.

Reuters. (2025, December 11). China says talks with EU on electric vehicle minimum price plan resumed. Reuters. https://www.reuters.com/sustainability/boards-

policy-regulation/china-says-talks-with-eu-electric-vehicle-minimum-price-plan-resumed-2025-12-11/ adresinden 10 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2020). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 3(1), 34–50.

Öztürk, G., Tansu, M. N., & Uz, U. (2021). Türkiye'de Hibrid ve Elektrikli Araçlara Eğilimin Araştırılması. EJONS International Journal of Mathematic Engineering and Natural Sciences, 5(20), 814–823. https://doi.org/10.38063/ejons.517

SETA. (2025, September 30). Turkey's new global face: Togg. SETA. https://www.setav.org/en/turkeys-new-global-face-togg adresinden 7 Kasım 2025 tarihinde alınmıştır.

Sezen, B., & İşler, A. U. (2017). Elektrikli Araçların Mevcut Durumu, Tercih Edilme ve Edilmeme Sebepleri. Turkish Journal Of Marketing, 2(2), 82–103. https://doi.org/10.30685/tujom.v2i2.21

SNE Research. (2025). Electric vehicle sales snapshot (Jan–Oct 2025). https://www.sneresearch.com/en/home/ adresinden 8 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). Motorlu kara taşıtları, Haziran 2025. https://data.tuik.gov.tr/ adresinden 1 Kasım 2025 tarihinde alınmıştır.

Virta. (2025). Global electric vehicle market overview. https://www.virta.global/global-electric-vehicle-market adresinden **9 Aralık 2025** tarihinde alınmıştır.

Tıbbi Atık Toplama Tesisi İçin Araç Rotalama Optimizasyonu

Ayten YILMAZ YALÇINER[1]

İlkan ŞENGÖZ [2]

1-Doç. Dr. : Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.
ayteny@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8160-812X
2. Endüstri Mühendisi.; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.
İlkan.sengoz@ogr.sakarya.edu.tr ORCID No: 0009-0006-2886-0733

ÖZET

Sağlık kuruluşları, laboratuvarlar ve farklı araştırma kuruluşlarının faaliyetlerinden ve yaptıkları işlemlerden ortaya çıkan atıkları ele alan tıbbi atık yönetimi, günümüzde önemli çevre sorunlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Enfekte malzemeler, patolojik atıklar, kimyasal içerikli atıklar, kesici-delici atıklar gibi miktar olarak az ama risk olarak yüksek oran içeren bu kategoride ele alınmaktadır. Tıbbi atıkların üretim aşamasından bertarafına kadar geçen süreçte, çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde toplanması, paketlenmesi, depolanması, sterilizasyon veya imha işlemleri için güvenli bir şekilde taşınması büyük bir öneme sahiptir. Tıbbi atıklar ayrı bir şekilde toplanıp imha edilmedikleri sürece temas edilmeleri halinde sağlık ve çevre alanında büyük problemlere sebebiyet verebilirler. Bu çalışmada, tıbbi atıkların en doğru şekilde ve uygun maliyet ve mesafe ile taşınmasına yönelik çözüm önerileri ele alınmıştır. Çalışmada, öncelikle tıbbi atık toplama kapsamında araç rotalama problemi araştırılmıştır. Daha sonra Sakarya'da bulunan bir tıbbi atık toplama merkezinden alınan veriler kullanılarak araç rotalama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın amacı, tıbbi atıkların toplanması için kullanılan araçların rotalarındaki mesafeyi en küçüklemek, rotayı optimize etmektir. Elde edilen yeni rotanın taşıma maliyetlerini de minimize etmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, araç rotalama problemlerinde sıklıkla kullanılan Clarke-Wright tasarruf algoritması tercih edilmiştir. Yapılan rotalama işleminin sonuçları analiz edilmiş, en nihayetinde sonuç bölümünde çalışmanın genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Clarke Wright Tasarruf Algoritması, Taşıma Mesafesi Minimizasyonu, Araç Rotalama Problemi, Lojistik, Tıbbi Atık.

GİRİŞ

Tersine Lojistik Kavramı

Tersine lojistik kavramı literatürde birçok farklı tanımlamalarla mevcuttur. En basit haliyle tersine lojistik, ürünlerin tüketicilerden veya perakendecilerden üretici veya üretim noktasına geri dönüşünü ifade eder. Bu süreç genellikle onarım, parça düzeltme, yeniden imalat, geri dönüşüm gibi işlemleri içerir. Tersine lojistik faaliyetleri, çevresel duyarlılık açısından önemli olmanın yanı sıra, aynı zamanda işletmeler ve işverenler için ekonomik anlamda da stratejik bir öneme sahiptir.

İşletmeleri tersine lojistik uygulamalarına yönlendiren çeşitli nedenler söz konusudur. Bunlar;

- Ekonomik nedenler
- Yasal nedenler
- Çevresel nedenler
- Kurumsal sorumluluk (Avarkan,2018)

Tersine lojistik ve ileri lojistik süreçlerinde temel bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bununla beraber tersine dağıtım ileri dağıtımın simetrik bir yansıması olmayabilir (Ayvaz, 2013). Aşağıdaki tabloda (Tablo1) ileri ve tersine lojistik faaliyetlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır:

Sağlık Sektöründe Tersine Lojistik

Sağlık sektöründe tersine lojistik, ürünlerin tüketiciye ulaştığı noktadan başlayarak, kullanım sonrası aşamalarda geri dönüşüm, geri kazanım veya uygun şekilde imha edilme süreçlerini içeren bir lojistik yaklaşımıdır. Bu süreç, ürünün tüketildikten sonra ortaya çıkan ambalaj atıkları, kullanılmış tıbbi malzemeler, ilaç şişeleri gibi unsurları ele alır. İşte sağlık sektöründeki tersine lojistikle ilgili bazı önemli unsurlar:
Tıbbi Atıkların Yönetimi: Tersine lojistik, kullanılmış tıbbi malzemelerin, ambalajların ve diğer atıkların etkili bir şekilde toplanmasını ve işlenmesini içerir. Bu süreç, çevresel etkileri en aza indirerek, atıkları düzenli bir şekilde geri dönüştürme veya imha etme amacını taşır.
İlaç Geri Dönüşümü: Sağlık sektöründe, son kullanma tarihi geçmiş veya kullanılmamış ilaçlar sıklıkla ortaya çıkar. Tersine lojistik, bu ilaçların toplanması, doğru bir şekilde sınıflandırılması ve uygun bir şekilde imha edilmesini veya geri dönüştürülmesini içerir.
Ambalaj Atıkları: Sağlık ürünleri genellikle özel ambalajlar içinde gelir. Tersine lojistik, bu ambalaj malzemelerinin geri dönüşüm süreçlerine entegre edilmesini sağlar. Ambalaj atıklarının azaltılması ve geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir.
Ürün İade ve Geri Çekme Operasyonları: Sağlık sektöründe, hatalı veya güvenlikle ilgili endişeler nedeniyle ürün iadeleri veya geri çekmeler sıkça yaşanabilir. Tersine lojistik, bu süreçleri düzenler ve geri alınan ürünlerin uygun bir şekilde yönetilmesini sağlar.
Yeniden İşleme ve Geri Kazanım: Tersine lojistik, kullanılan tıbbi cihazların veya ekipmanların uygun şekilde toplanmasını, temizlenmesini ve yeniden işlenmesini içerebilir. H em çevresel etkileri azaltmak hem de maliyetleri düşürmek için önemlidir.

Tablo 1: İleri lojistik ve Tersine Lojistik karşılaştırılması

İleri Lojistik	Tersine Lojistik
Ürün kalitesi standarttır.	Geri dönen ürünlerin kalitesi standart değildir.
İşlem seçenekleri açıktır.	İşlem seçenekleri açık değildir.
Ürün rotası kesin ve belirlidir.	Ürün rotası belirli değildir.
İleri dağıtım maliyetlerinin belirlenebilirliği daha kolaydır.	Tersine dağıtım maliyetlerinin belirlenebilirliği daha zordur.
Ürün fiyatları kesindir.	Ürün fiyatları kesin değildir.
Stok yönetimi tutarlıdır.	Stok yönetimi tutarlı değildir.
Ürün yaşam çevrimi yönetilebilirdir.	Ürün yaşam çevriminin yönetimi güçtür.
Finansal konular daha açıktır.	Finansal konular açık değildir.
Partiler arası tutarlılık daha açık ve anlaşılırdır.	Partiler arası tutarlılık karmaşıktır.
Hedef pazarın ve müşteri tipinin tanımlanması kolaydır.	Hedef pazar ve müşteri tipinin tanımlanması zordur.
Tüm süreçler daha şeffaftır.	Süreçler daha az şeffaftır.

Tersine lojistik, pazarda işe yaramayan ürünlerin geri dönüşümü ve doğaya zarar vermemesi için parçalara ayrılması ile yeniden üretim ortamına sokularak işlem görmesini de kapsamaktadır (Uslu ve Akçadağ, 2012). Bu kapsamda tersine lojistik uygulamaları, sağlık sektöründe sürdürülebilirlik ve çevresel etkiyi minimize etme açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu süreçler, atıkların etkili bir şekilde yönetilmesini, geri dönüşümün teşvik edilmesini ve sektörde sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasını destekler.

Sağlık Sektöründeki Atıkların Sınıflandırılması

Tıbbi Atıklar: Hastane ve sağlık kuruluşlarından kaynaklanan ve enfeksiyon riski taşıyan atıkları içerir. Tıbbi atıklar, kesici, delici ve emici özelliklere sahip olanlar, enfekte sıvı atıklar, ilaçlı atıklar, kullanılmış cerrahi malzemeler, laboratuvar atıkları gibi çeşitli malzemeleri kapsar. Bu atıklar, özel olarak tasarlanmış ve renk kodlu konteynerlerde toplanmalı ve özel bir şekilde imha edilmelidir.

Tehlikeli Atıklar: Kimyasal, biyolojik veya radyoaktif özelliklere sahip olan atıkları içerir. Bu atıklar genellikle laboratuvarlardan ve radyoloji birimlerinden kaynaklanabilir. Tehlikeli atıklar, özel

konteynerlerde toplanmalı, etiketlenmeli ve uygun biçimde imha edilmelidir.

Genel Atıklar (Evsel Atıklar): Sağlık sektöründe üretilen, ancak özel bir tehlike taşımayan atıkları kapsar. Bu, ofis atıkları, ambalaj malzemeleri ve benzerlerini içerir. Genel atıklar genellikle düzenli çöp kutularına atılabilir.

Tersine Lojistik Çalışmaları

Bayhan ve Görücü (2020)"Bir Sağlık İşletmesinin Atık Yönetiminde Tersine Lojistik Süreçleri" başlıklı projelerinde son yıllarda hammadde kaynaklarının azalması, çevresel kirlilik ve atık sahalarının artış göstermesi gibi faktörlerin, insan ve çevre güvenliğinin işletmeler için önemli bir öncelik haline gelmesini ele almaktadır. Çalışmanın amacı, tersine lojistik uygulamalarının hastane atık yönetimine etkilerini incelemektir. Araştırma, Denizli ilinde faaliyet gösteren özel bir hastanede gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler değerlendirilmiş ve bu sürecin olası etkileri ortaya konmuştur.

KorkusuzPolat (2019) çalışmasında aşı ve ilaç dağıtımı için araç rotalama uygulaması yapmıştır.

Yıldız (2021)"Türkiye'de Tersine Lojistiğin rolü" çalışmasında lojistik sektöründe giderek önem kazanan tersine lojistik kavramına odaklanmaktadır. Türkiye'deki tersine lojistik uygulama örneklerine vurgu yaparken, bu faaliyetin çevresel ve ekonomik açıdan stratejik bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Çakır ve Topal (2016)"Tersine Lojistik Kapsamında Tıbbi Atıkların Toplanması Üzerine Bir Uygulama" çalışmasında tersine lojistiğin ele aldığı konulardan biri olan atık yönetimini incelemiş ve tıbbi atıkların toplanması konusunu ele almışlardır. Bu problemin çözümünde Clarke-Wright Tasarruf Algoritması kullanmışlardır.

Ay (2018), "İlaç Sektöründe Lojistik Yönetimi ve Tersine Lojistik" başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında ülkemizde ilaç sanayinde aktif rol oynayan ilaç şirketleri, ecza depoları ve serbest eczanelerin ilaç lojistiği ve tersine lojistik uygulamaları araştırmıştır. Elde edilen bulgular ve olası sorunlara karşı çözüm önerileri sunmuştur.

Ertaş ve Güden (2019)"Hastanede Tıbbi Atık Yönetimi" çalışmasında günümüzdeki hızlı sanayileşmenin çevre sorunlarını artırdığı ve özellikle tıbbi atıkların çevre ve toplum sağlığı için ciddi riskler oluşturduğunu vurgulamaktadırlar. Nitel araştırma yöntemi kullanılarak yürütülen çalışma, güncel mevzuatlar ışığında literatür bilgileri üzerinden derleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Tıbbi atık yönetimi ve bertaraf yöntemlerinin bilinmesinin önemine vurgu yaparak bu alandaki sorunlara çözüm odaklı yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır.

Karadayı Usta (2022), kullanılmayan ve atık ilaçların tersine lojistik

faaliyetleri ile toplanmasına tüketicinin bakış açısını anlamayı, değerlendirmeyi ve çözüm önerileri geliştirmeyi amaçlayan çalışmasında anket yöntemi kullanmıştır. İlaç endüstrisi yetkililerine yol gösterici olmayı hedeflemiştir.

Aydın (2020)"Sağlık Sektöründe Ters Lojistik" adlı çalışmasında atık yönetimi ve ters lojistik sürecinin sağlık ilaç tedarik zincirine ve devlet hastanelerine finansal ve operasyonel avantajları olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte sağlık çalışanlarının ilaçları düzgün bir şekilde yönetebilmesi için ters lojistik faaliyetleri ve atık yönetimi ile ilgili uygulamaların yapılması gerektiğini vurgulamaktadır.

Alagöz ve Paksoy (2023), çalışmalarında dünyadan ve Türkiye'den farklı alanlardaki (atık yağ, akıllı çöp kutuları, renk kodu uygulamaları, cam ambalaj atığı, akıllı telefon tablet atıklarını getirme uygulaması vs) tersine lojistik örneklerini sunmuşlardır.

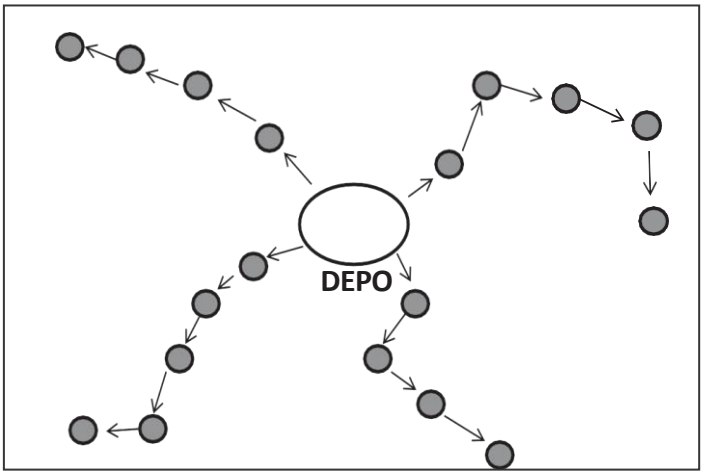
Erzurum şehrinde ortaya çıkan ambalaj atıklarının toplanması için bir tersine lojistik ağ tasarımı geliştirilen bir çalışmada geliştirilen model tasarımlarıyla geri dönüştürülebilecek ambalaj atık miktarının minimum ve maksimum değerleri ele alınmıştır. Şehrin ambalaj atıklarının geri kazanım çalışmalarına uygun modele karar vermek için geniş bir araştırma yapılmıştır (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010).

YÖNTEM: ARAÇ ROTALAMA

Araç rotalama problemi coğrafi olarak farklı yerlerdeki müşterilere bir veya birden fazla depodan hizmet vermek için yönlendirilen araçların dağıtım ve toplama güzergahlarının optimum olarak planlanması problemidir. (Eryavuz, Gencer, 2001) Araç rotalama probleminin amacı seyahat edilen minimum mesafeyi ve/veya araç sayısını bulmaktır. İlk olarak 1959 yılında servis istasyonlarına benzin teslimatı ile ilgili hayatımızdaki bir sorunu çözmek için Dantzig ve Ramser (1959) tarafından tanıtılmıştır. Bu nedenle, bu çalışma ARP literatüründeki ilk çalışmadır. Araç Rotalama Problemi için temel kısıtları belirlemişlerdir. (Farshchi, 2021)

- Müşteriler araçlar tarafından bir defa ziyaret edilmelidir.
- Tüm talepler karşılanmalıdır.
- Araçta taşınan yük miktarı araç kapasitesini aşmamalıdır.
- Araç rotaları depodan başlamalı ve depoda sonlanmalıdır.

Araç rotalama probleminde araçlar depodan başlayarak bütün müşterilere belirlenen sıraya göre uğrar ve devamında başlangıç merkezine geri gelir. Araçlar müşteriler ile eşleştirilirken araç kapasitesi göz önüne alınır. Toplam araç kapasitesi aşılmayacak şekilde araç rotalaması planlanmaktadır. Örnek araç rotalaması şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1: Araç Rotalama Probleminin Gösterimi

Araç rotalama problemi birden çok ve genellikle birbirleri ile çelişen hedefleri dikkate alır. ARP de en çok dikkat çeken hedefler şunlardır;

- Kullanılan araçların sabit maliyetlerine ve toplam katettiği mesafeye bağlı olan toplam taşıma maliyetlerini en küçüklemek
- Tüm müşterilere hizmet vermek için gereken toplam araç sayısını en aza indirmek
- Rotaları araç kapasitesi ve seyahat süresi açısından dengelemek
- Müşterilere parçalı dağıtım yapılması nedeniyle oluşan cezaları en küçüklemek (Atmaca, 2012)

Araç rotalama ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur:

Demircioğlu (2009) çalışmasında, zaman pencereli araç rotalama problemi ele alınmıştır. Araç rotalama problemi, yöneylem araştırması alanında önemli faydalar sağlamıştır. Problemin çözümü için sezgisel çözüm yöntemleri kullanılarak minimum dağıtım rotaları belirlenmiş ve bu dağıtım rotasının süre ve maliyetlere etkisi izlenmiştir.

Kısa vd. (2021) tarafından hazırlanan çalışmanın amacı, özellikle dağıtım faaliyetlerini yoğun bir şekilde kullanan işletmelerdeki karar vericilerin daha rasyonel kararlar alabilmesini sağlamaktır. Bu amaçla, öncelikle hangi tür dağıtım sisteminin işletmeler tarafından benimsenmesi gerektiği sorusuna cevap bulmak için Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi ve Kapasite Kısıtlı İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi karşılaştırılmıştır.

Golden, Wasil (2008) tarafından yapılan çalışma araç rotalama

problemlerinin son gelişmelerini ve yeni zorluklarını ele almaktadır. Farklı araç rotalama problemleri, optimizasyon yaklaşımları ve algoritma çözümleri hakkında genel bir inceleme sunmaktadır.

Salhi, Imran ve Wassan (2014) tarafından yapılan çalışmada çoklu deposu olan ve heterojen araç filosuyla yapılan araç rotalama problemini ele alınmıştır. Problem için matematiksel bir formülasyon geliştirilmiş ve değişken komşuluk arama adı verilen bir meta- sezgisel çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Sonuçları diğer mevcut çözüm yöntemleriyle karşılaştırarak, önerilen yaklaşımın yüksek kaliteli çözümler bulma konusundaki etkinliği kanıtlanmıştır.

Asghari, M. ve Al-e, S. M. J. M. (2021) tarafından yayımlanan bu çalışmada, yeşil araç rotalama probleminin mevcut durumunu ve son gelişmeleri incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın sonucunda, yeşil araç rotalama probleminin oldukça çok çeşitli uygulama alanları olduğunu ve birçok farklı yöntem ve modelin kullanıldığı görülmektedir.

Wang, Z., ve Sheu, J. B. (2019) tarafından yapılan çalışma klasik kapasiteli araç rotalama probleminde Drone kullanımının da yer aldığı genişletilmiş bir versiyonudur. Bu çalışmada, karışık tamsayılı programlama modeli önerilmekte ve dallandır ve fiyatlandırma algoritması geliştirilmektedir. Pratik bir ortamda rastgele oluşturulan örnekler üzerinde kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, önerilen algoritmanın iyi bir hesaplama performansına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bir çözümün toplam maliyetini etkileyebilecek önemli bir faktör üzerinde duyarlılık analizi yapılmıştır.

KorkusuzPolat (2019) çalışmasında lojistik sektöründe faaliyet gösteren bir firma için araç rotalama problemini milk-run uygulaması ile çözmüştür.

Hanum ve arkadaşları (2019), çalışmalarında endüstriyel gıda üreticilerinin düşük gelirli hanelere pirinç dağıtımını optimize etmek için araç rotalama problemleri ele alınmıştır. Araştırmada, bir pirinç üreticisi tarafından kullanılan bir dağıtım sistemi modellenmiş ve bir genetik algoritma kullanılarak çözüm elde edilmiştir. Aynı zamanda bu çalışma, düşük gelirli hanelere yardım amacıyla yapılan diğer gıda dağıtım projelerinde de faydalı olabilecek bir yaklaşım sunmaktadır.

Araç Rotalama Problemi Çeşitleri

Yöneylem araştırması alanında çok çeşitli araştırmaları yapılan araç rotalama probleminin tüketim alışkanlıklarının gelişmesi, ekonomik faktörler, teknolojik yenilikler vb. nedenlerin etkisi ile üzerindeki ilgisi gün geçtikçe artmaktadır. Uluslararası ekonomik ilişkilerin gelişmesi araç rotalama probleminin çeşitliliğini ve boyutunu arttırmaktadır (Semiha, 2019).

Aşağıda bazı araç rotalama problem çeşitleri tanımlanmaktadır:

Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi: İşletmelerin belirli

sayıda müşteriye ulaşması için yükleme kapasitesi kısıtlı araçlarla rota planlaması yapması gereken bir problemdir. Bu problemde, araçların kapasitelerini aşmamak kaydıyla taleplerin karşılandığı rotalardan oluşan toplam talep miktarı, aracın kapasitesini aşmamalıdır.

Mesafe Kısıtlı Araç Rotalama Problemi : Araçların rotaları, süre ya da mesafe bazında limit ile sınırlıdır. Sürücünün çalışma zamanı kısıtlı olabilir.

Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi: Müşterilerin belirlenmiş bir zaman aralığında taleplerinin karşılanması gerektiği bir araç rotalama problemini ifade eder. Bu problem, zaman pencerelerine göre iki farklı kategoride incelenir: Sıkı Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi ve Esnek Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi.

Topla-Dağıt Araç Rotalama Problemi : Müşterilerin hem toplama hem de dağıtım taleplerinin olabildiği araç rotalama problemidir. Araç rotalama toplama ve dağıtım işlemlerinin gerçekleşme sırasına göre üçe ayrılmaktadır ;

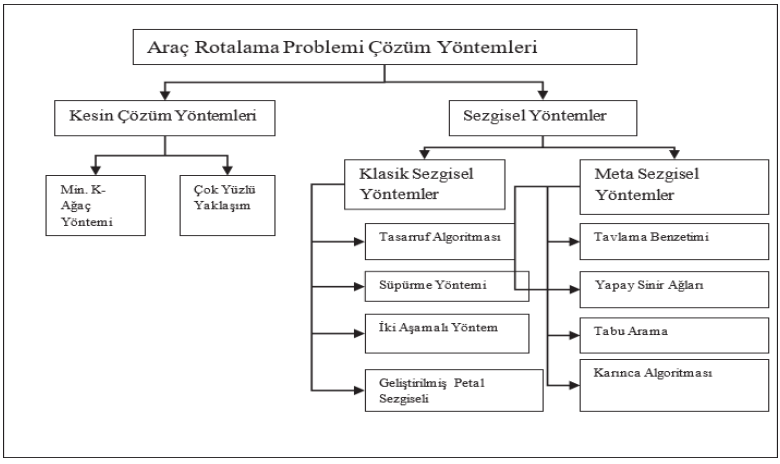
Önce karışık dağıtım toplama, dağıtım sonra toplama, eş zamanlı dağıtım ve toplama bu sayede müşterilere bir kez gidilmiş olunur.

Çok Depolu Araç Rotalama Problemi : Müşterilere tanımlı birden fazla depodan hizmet verilebilir. Taşıma yapan her aracın tur sonunda kendi deposuna dönmesi gerekir.

Açık Uçlu Araç Rotalama Problemi : Taleplerin karşılanması için depodan çıkan aracın tur sonunda depoya dönme zorunluluğunun olmadığı problem çeşididir.

Dinamik Araç Rotalama Problemi : Gerçekleştirilen hizmet süresi boyunca şartların değişiklik gösterdiği araç rotalama problemidir.

Stokastik Araç Rotalama Problemi : Kısıtlarda belirsizlik söz konusudur. Veriler olasılık dağılımları ile tanımlanmıştır.



Şekil 2: Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemleri

Bu çalışmada Sezgisel Yöntemlerden Clarke-Wright Tasarruf algoritması kullanılmıştır.

Clarke-Wright Tassarruf Algoritması

Clarke & Wright Tasarruf Algoritması, G. Clarke ve J. W. Wright tarafından 1964 yılında klasik araç rotalama problemlerine çözüm olarak geliştirilmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu sezgisel yöntem, geliştirilmesinin ilk dönemlerinde Wright-Fletcher-Clarke Algoritması ya da Fletcher-Clarke-Wright Algoritması olarak da anılmıştır. Bu algoritma, araç rotalama sorunlarının çözümünde etkili ve pratik bir yaklaşım sunar.

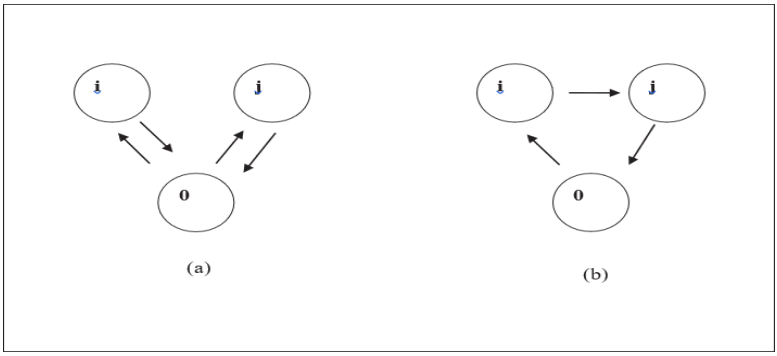
Clarke & Wright Tasarruf Algoritması, uygulama kolaylığı ve hızlı hesaplama yeteneği sayesinde, Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemlerinin çözümünde en sık tercih edilen sezgisel yöntemlerden biridir .1964 yılında geliştirilen bu algoritma, günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, sezgisel bir yöntem olması nedeniyle her zaman en iyi çözümü garanti edemez. (Çakır, 2016)

Clarke & Wright, diğer sezgisel yöntemler gibi, sonuçların kesinliğini veya kanıtlanabilirliğini hedeflemez. Sezgisel algoritmaların temel amacı, mümkün olan en kısa sürede iyiye yakın çözümler üretmektir. Bu tür bir yöntem, her zaman en iyi sonucu sunamayabilir ancak makul bir sürede tatmin edici bir çözüm sağlamayı amaçlar.

G. Clarke ve J.W. Wright (1964), tasarruf algoritmasını aşağıdaki gibi formüle etmiştir:

Xi: Araç Sayısı
Cİ: Kapasite (i=1…n)
qi: Yük
Pj: Dağıtım Noktası (j=1…M)
P0: Depo
dy,z: Verilen İki Nokta Arası Uzaklık olmak üzere;

P0 depo noktasından, Pj dağıtım noktalarına, uygun kapasiteli ve dağıtım noktalarının gereksinimlerini karşılayacak yükteki Xi adet aracın kat edeceği mesafeyi minimize etmek amaçlanır. Tasarruf algoritması, sezgisel bir algoritmadır ve bu nedenle araç rotalama problemlerine kesin çözümler sunmaz. Şekil 3 ’ de tasarruf kavramı basitçe gösterilmektedir.



Şekil 3: Clarke-Wright Tassarruf Algoritması gösterimi

Şekil 3(a)'de, i ve j müşterilerinin ayrı rotalarla ziyaret edildiği, Şekil 3 (b)'de ise bu müşterilerin tek bir rotada birleştirildiği gösterilmektedir. Tasarruf kavramı, iki ayrı rotanın toplam taşımacılık maliyeti ile bu rotaların birleştirilerek oluşturduğu tek rotanın taşımacılık maliyeti arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

$$Sij = ci0 + c0j - cij$$

Bu çalışma kapsamında Sakarya ilinde bulunan tıbbi atık toplama ve sterilizasyon merkezi için toplam minimum mesafeyi bulmak amacıyla araç rotalaması üzerinde çalışılmıştır. Clarke-Wright tasarruf algoritması kullanılarak araçların kullanacağı yakıt miktarlarını azaltmak ve optimum rotayı bulmak hedeflenmiştir. Belirli ilçeler için ayrı araç bulunmaktadır ve atıkları toplamak için kullanılan araçların kapasiteleri kısıtlıdır.

UYGULAMA

Verilerin Elde Edilmesi:

Çalışmada tıbbi atık toplama ve sterilizasyon merkezinden alınan 1 aylık veriler üzerine uygulanmıştır.İşletmeden alınan veriler işletme çalışanlarından ve Sakarya Büyükşehir Belediyesi mühendislerinin onayı tarafından alınmıştır. Uygulamanın yapılması için elde edilen veriler şunlardır:

- Tıbbi atık toplama hizmeti verilen sağlık kuruluşları
- Sağlık kuruluşlarından ne kadar miktarda atık toplandığının bilgisi,
- Kullanılan araç sayısı
- Araçların kapasiteleri
- Atık toplama merkezinin açık adresi

- Her bir aracın atık toplama rotaları

Tıbbi atık toplama ve sterilizasyon işletmesi, tıbbi atık toplama hizmetini, her biri 3.5 ton taşıma kapasiteli 3 adet araçla gerçekleştirmektedir. Her bir sağlık kuruluşundan toplanan tıbbi atık miktarları, kilogram ve paketler halinde toplanmaktadır.

Tablo 1: Veri setinden örnek tablo

Araç	Birim	Gün	Miktar	Latitude	Longitude	Sırası
1	AKYAZI DEVLET HASTANESİ	Salı	221	40,666485	30,594698	1
1	HENDEK DEVLET HASTANESİ	Salı	450	40,7699407	40,7699407	2
1	SEAH MERKEZ	Perşembe	451	40,757094	30,389898	1
1	ÖZEL BEYHEKİM HASTANESİ	Perşembe	606	40,767012	30,413659	3
1	İNCİ GÖZ HASTANESİ	Perşembe	792	40,773213	30,404945	2
1	SAKARYA BÜYÜKŞEHİR TIP MERKEZİ	Perşembe	730	40,7777422	30,4031759	4
1	ÖZEL ÖZSA DİYALİZ MERKEZİ	Pazartesi	313	40,75731	30,3941434	8
1	SEAH MERKEZ	Pazartesi	822	40,757094	30,389898	4
1	SEAH KADIN DOĞUM	Pazartesi	634	40,757988	30,388567	5
1	SEAH 100 YATAKLI	Pazartesi	838	40,772148	30,393581	6
1	ÖZEL NEFROMED DİYALİZ MER	Pazartesi	395	40,7573381	30,3941879	7

Tablo 1'deki veri setinin örnek tablosunda araç sayısı, sağlık kuruluşların ismi, hangi gün toplandığı, ne kadar miktarda toplandığı, sağlık kuruluşlarının koordinatları ve araç rotalama sırası gösterilmiştir.

Mesafeler Matrisinin oluşturulması:

Tıbbi atık toplanan sağlık kuruluşlarının arasındaki mesafe matrislerini içermektedir. Bu mesafeler Google Maps'ten enlem ve boylam koordinatları alınarak hesaplanmıştır.Uzaklık matrisi, her bir sağlık kuruluşunun birbirine uzaklığı Öklid bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bu mesafeler ilerleyen adımda Tasarruf matrisinde kullanılacaktır.

Tablo 2: Örnek mesafe matrisi (km)

Mesafeler Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	SEAH MERKEZ	ÖZEL BEYHEKİM HASTANESİ	İNCİ GÖZ HASTANESİ	SAKARYA BÜYÜKŞEHİR TIP MERKEZİ
ERA ÇEVRE	0	0.0203427	0.0200465	0.00952982	0.00728262
SEAH MERKEZ	0.0203427	0	0.0257479	0.0220507	0.0245489
ÖZEL BEYHEKİM HASTANESİ	0.0200465	0.0257479	0	0.0106951	0.0150011
İNCİ GÖZ HASTANESİ	0.00952982	0.0220507	0.0106951	0	0.00486244
SAKARYA BÜYÜKŞEHİR TIP MERKEZİ	0.00728262	0.0245489	0.0150011	0.00486244	0

Tablo 2'de 1. Araç için Perşembe günü tıbbi atık toplama rotasının mesafe matrisi gösterilmiştir.

Tasarruf Matrisinin oluşturulması:

Clark-Wright tasarruf algoritması, farklı atık toplama alanları arasındaki mesafe tasarruflarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu algoritma, başlangıçta her atık toplama alanının bağımsız olarak ele alınmasını sağlar ve daha sonra en büyük tasarruf sağlayan rotalar birleştirilir. Tasarruf matrisinin nasıl hesaplandığı giriş kısmında belirtilmiştir.

Tablo 3: Örnek Tasarruf Matrisi

Tasarruf Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	SEAH MERKEZ	ÖZEL BEYHEKİM HASTANESİ	İNCİ GÖZ HASTANESİ	SAKARYA BÜYÜKŞEHİR TIP MERKEZİ
ERA ÇEVRE	nan	nan	nan	nan	-
SEAH MERKEZ	0	nan	nan	nan	-
ÖZEL BEYHEKİM HASTANESİ	0	0.0146414	nan	nan	-
İNCİ GÖZ HASTANESİ	0	0.00782184	0.0188812	nan	-
SAKARYA BÜYÜKŞEHİR TIP MERKEZİ	0	0.00307642	0.012328	0.01195	-

Tablo 3'de 1. Araç için Perşembe günü tıbbi atık toplama rotasının tasarruf matrisi gösterilmiştir.

Problemin Çözümü ve Sonuçlar

Tablo 4: 1.Araç Pazartesi günü

1	ÖZEL ÖZSA DİYALİZ MERKEZİ	Pazartesi	313	40,75731	30,3941434	8
1	SEAH MERKEZ	Pazartesi	822	40,757094	30,389898	4
1	SEAH KADIN DOĞUM	Pazartesi	634	40,757988	30,388567	5
1	SEAH 100 YATAKLI	Pazartesi	838	40,772148	30,393581	6
1	ÖZEL NEFROMED DİYALİZ MER	Pazartesi	395	40,7573381	30,3941879	7
1	ADA DİYALİZ MERKEZİ	Pazartesi	376	40,7789972	30,3979718	1
1	MARMARA GÖZ HASTANESİ	Pazartesi	242	40,7790183	30,3982407	2
1	ÖZEL BİLGE HASTANESİ	Pazartesi	496	40,7814046	30,4002015	3

Tablo 4’te 1.aracın Pazartesi günü toplanılan atık miktarları, sağlık kuruluşları ve koordinatları ve rotasının sırası verilmiştir. Bu veriler üzerinden mesafeler matrisi, tasarruf matrisi ve bunun sonucunda yeni rota bulunacaktır.

Tablo 5: 1.Araç Pazartesi günü mesafe matrisi

1. Araç ve Pazartesi Günü için rota inceleniyor

Mesafeler Matrisi:

Birim	EBA ÇEVRE	ÖZEL ÜÇSA DİYALİZ MERKEZİ	SEAH MERKEZ	SEAH KADIN DOĞUM	SEAH 100 YATAKLI	ÖZEL MEFKONED DİYALİZ MER	ADA DİYALİZ MERKEZİ	MARMARA GÖZ HASTANESİ	ÖZEL BİLGE HASTANESİ
EBA ÇEVRE	0	0.0192796	0.0203427	0.0199485	0.0049791	0.0192474	0.00319102	0.00337864	0.00645015
ÖZEL ÜÇSA DİYALİZ MERKEZİ	0.0192796	0	0.00425889	0.00501747	0.0148487	5.26259e-05	0.0228225	0.0226916	0.0248445
SEAH MERKEZ	0.0203427	0.00425889	0	0.00158337	0.015498	0.00429684	0.0233439	0.023458	0.0264839
SEAH KADIN DOĞUM	0.0199485	0.00501747	0.00158337	0	0.0150215	0.00555835	0.0230182	0.0231485	0.0261476
SEAH 100 YATAKLI	0.0049791	0.0148467	0.015498	0.0150215	0	0.0148223	0.00815576	0.00838144	0.0113885
ÖZEL MEFKONED DİYALİZ MER	0.0192474	5.2625e-05	0.00429684	0.00555835	0.0148223	0	0.0219871	0.0226556	0.0248864
ADA DİYALİZ MERKEZİ	0.00319102	0.0228225	0.0233439	0.0230182	0.00815576	0.0219871	0	0.00626979727	0.00328133
MARMARA GÖZ HASTANESİ	0.00337864	0.0226916	0.023458	0.0231485	0.00838144	0.0226556	0.00626979727	0	0.00308855
ÖZEL BİLGE HASTANESİ	0.00645015	0.0248445	0.0264839	0.0261476	0.0113885	0.0248864	0.00328133	0.00308855	0

Tablo 5’de 1. Aracın pazartesi günü olan rotasının mesafe matrisi verilmiştir. Bu mesafe matrisi sayesinde tasarruf matrisi bulunacaktır.

Tablo 6: 1.Araç Pazartesi Günü Tasarruf Matrisi

Tasarruf Matrisi:

Birim	EBA ÇEVRE	ÖZEL ÜÇSA DİYALİZ MERKEZİ	SEAH MERKEZ	SEAH KADIN DOĞUM	SEAH 100 YATAKLI	ÖZEL MEFKONED DİYALİZ MER	ADA DİYALİZ MERKEZİ	MARMARA GÖZ HASTANESİ	ÖZEL BİLGE HASTANESİ
EBA ÇEVRE	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	-
ÖZEL ÜÇSA DİYALİZ MERKEZİ	0	nan	nan	nan	nan	nan	nan	nan	-
SEAH MERKEZ	0	0.0353715	nan	nan	nan	nan	nan	nan	-
SEAH KADIN DOĞUM	0	0.0359207	0.0198079	nan	nan	nan	nan	nan	-
SEAH 100 YATAKLI	0	0.0694895	0.0698287	0.0698612	nan	nan	nan	nan	-
ÖZEL MEFKONED DİYALİZ MER	0	0.0356744	0.0352833	0.0353576	0.0894947	nan	nan	nan	-
ADA DİYALİZ MERKEZİ	0	0.0894399866	0.0900109665	0.0900112165	2.51021e-05	0.0894242872	nan	nan	-
MARMARA GÖZ HASTANESİ	0	0.0895530858	0.0900155621	0.0900178046	4.3589e-05	0.0895654245	0.0062626264	nan	-
ÖZEL BİLGE HASTANESİ	0	0.0899893225	0.0900359497	0.0900358041	5.57501e-05	0.0899899866	0.0062655664	0.0057444	-

Tablo 6'da mesafe matrisi sayesinde bulunan tasarruf matrisi sonuçları bulunmuştur. Bu tasarruf matrisinde bulunan değerler büyükten küçüğe azalan bir şekilde taşıma kapasiteleri de hesaba katılarak sıralanır ve yeni rotayı oluşturur.

Şekil 4: 1.araç Pazartesi günü yeni rota

```
Routes found are:
[[0, 3, 4, 2, 1, 5, 0], [0, 8, 6, 7, 0]]
ERA ÇEVRE->SEAH KADIN DOĞUM->SEAH 100 YATAKLI ->SEAH MERKEZ->ÖZEL ÖZSA DİYALİZ MERKEZİ->ÖZEL NEFROMED DİYALİZ MER->ERA ÇEVRE
ERA ÇEVRE->ÖZEL BİLGE HASTANESİ->ADA DİYALİZ MERKEZİ->MARMARA GÖZ HASTANESİ->ERA ÇEVRE
```

Şekil 4'te oluşturulan yeni rota gösterilmiştir. Pazartesi günü 1.araç toplam 56,5 km giderken yeni rotada toplam 53,7 km yol gidecektir.

Tablo 7:2.araç Pazartesi günü

2	ADATIP HASTANESİ	Pazartesi	678	40,79171	40,79171	4
2	TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI	Pazartesi	351	40,855484	30,285141	3
2	YENİKENT MERKEZ	Pazartesi	795	40,8500531	30,3458193	2
2	SEAH KORUCUK	Pazartesi	608	40,8505775	30,2915175	1

Tablo 7'de 2.araç Pazartesi günü toplanılan atık miktarları, sağlık kuruluşları ve koordinatları ve rotasının sırası verilmiştir. Bu veriler üzerinden mesafeler matrisi, tasarruf matrisi ve bunun sonucunda yeni rota bulunacaktır.

Tablo 8: 2.araç Pazartesi günü mesafe matrisi

Mesafeler Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	ADATIP HASTANESİ	TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI	YENİKENT MERKEZ	SEAH KORUCUK
ERA ÇEVRE	0	10.3957	0.136118	0.0890402	0.128078
ADATIP HASTANESİ	10.3957	0	10.5068	10.4461	10.5004
TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI	0.136118	10.5068	0	0.0609209	0.00804571
YENİKENT MERKEZ	0.0890402	10.4461	0.0609209	0	0.0543043
SEAH KORUCUK	0.128078	10.5004	0.00804571	0.0543043	0

Tablo 8'de 1. Aracın pazartesi günü olan rotasının mesafe matrisi verilmiştir. Bu mesafe matrisi sayesinde tasarruf matrisi bulunacaktır.

Tablo 9: 2.araç Pazartesi günü tasarruf matrisi

Tasarruf Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	ADATIP HASTANESİ	TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI	YENİKENT MERKEZ	SEAH KORUCUK
ERA ÇEVRE	nan	nan	nan	nan	-
ADATIP HASTANESİ	0	nan	nan	nan	-
TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI	0	0.0250769	nan	nan	-
YENİKENT MERKEZ	0	0.0387077	0.164238	nan	-
SEAH KORUCUK	0	0.023442	0.256151	0.162814	-

Tablo 9 mesafe matrisi sayesinde bulunan tasarruf matrisi sonuçları bulunmuştur. Bu tasarruf matrisinde bulunan değerler büyükten küçüğe azalan bir şekilde taşıma kapasiteleri de hesaba katılarak sıralanır ve yeni rotayı oluşturur.

```
Routes found are:
[[0, 4, 2, 3, 1, 0]]
ERA ÇEVRE->SEAH KORUCUK->TURMED SAKARYA HALK SAĞLIĞI LABORATUVARI->YENİKENT MERKEZ->ADATIP HASTANESİ->ERA ÇEVRE
```

Şekil 5: 2.araç Pazartesi günü yeni rota

Şekil 5'te yeni rota oluşturulmuştur. Pazartesi günü 2.araç toplam 55,2 km giderken yeni rota sonrası 46,9 km yol gidecektir.

Tablo 10: 3.araç Pazartesi günü

3	SEAH SERDİVAN ŞUBESİ	Pazartesi	515	40,7567172	30,3908125	3
3	SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE	Pazartesi	788	40,7590621	30,3600242	2
3	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	Pazartesi	124	40,7605897	30,362291	1
3	SAKARYA KIZILAY KAN MERKE	Pazartesi	871	40,7749822	30,3834205	4

Tablo 10'da 3.araç Pazartesi günü toplanılan atık miktarları, sağlık kuruluşları ve koordinatları ve rotasının sırası verilmiştir. Bu veriler üzerinden mesafeler matrisi, tasarruf matrisi ve bunun sonucunda yeni rota bulunacaktır.

Tablo 11: 3.araç Pazartesi günü mesafe matrisi

3. Araç ve Pazartesi Günü için rota inceleniyor

Mesafeler Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	SEAH SERDİVAN ŞUBESİ	SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	SAKARYA KIZILAY KAN MERKE
ERA ÇEVRE	0	0.0204516	0.0399792	0.0372751	0.0126707
SEAH SERDİVAN ŞUBESİ	0.0204516	0	0.0308775	0.0287832	0.0197041
SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE	0.0399792	0.0308775	0	0.00273349	0.0282991
ÖZEL MEDAR HASTANESİ	0.0372751	0.0287832	0.00273349	0	0.0255656
SAKARYA KIZILAY KAN MERKE	0.0126707	0.0197041	0.0282991	0.0255656	0

Tablo 11'de 1. Aracın pazartesi günü olan rotasının mesafe matrisi verilmiştir. Bu mesafe matrisi sayesinde tasarruf matrisi bulunacaktır.

Tablo 12: 3.araç Pazartesi günü tasarruf matrisi

Tasarruf Matrisi:

Birim	ERA ÇEVRE	SEAH SERDİVAN ŞUBESİ	SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE	ÖZEL MEDAR HASTANESİ	SAKARYA KIZILAY KAN MERKE
ERA ÇEVRE	nan	nan	nan	nan	-
SEAH SERDİVAN ŞUBESİ	0	nan	nan	nan	-
SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE	0	0.0295534	nan	nan	-
ÖZEL MEDAR HASTANESİ	0	0.0289436	0.0745209	nan	-
SAKARYA KIZILAY KAN MERKE	0	0.0134183	0.0243509	0.0243803	-

Tablo 10'da mesafe matrisi sayesinde bulunan tasarruf matrisi sonuçları bulunmuştur. Bu tasarruf matrisinde bulunan değerler büyükten küçüğe azalan bir şekilde taşıma kapasiteleri de hesaba katılarak sıralanır ve yeni rotayı oluşturur.

```
Routes found are:
[[0, 3, 4, 2, 1, 0]]
ERA ÇEVRE->ÖZEL MEDAR HASTANESİ->SAKARYA KIZILAY KAN MERKE->SAKARYA AĞIZ VE DİŞ MERKE->SEAH SERDİVAN ŞUBESİ->ERA ÇEVRE
```

Şekil 6: 3.araç Pazartesi günü yeni rota

Şekil 6'da yeni rota oluşturulmuştur. Pazartesi günü 3.araç toplam 38,4 km giderken yeni rota sonrası 33.44 km yol gidecektir. Pazartesi günü 3 araç mevcut rota ile toplam 150,1 km yol giderken yeni rota ile 134,04 km yol gidecektir.

Aynı uygulamalar haftanın diğer günleri içinde yapılmıştır. Bunun sonucunda mevcut rotalarda haftalık toplam 950,3km giderken yeni rotalarda 761 km yol hesaplanmıştır. Haftalık 190,3 km yıllık 9895,6 km tasarruf edilmiştir.

SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Tarihsel süreçteki değişime bakıldığında; tarımdaki ilerlemeler, endüstrileşme, tıptaki gelişmeler, teknolojideki yenilikler ve güvenli, yeterli su imkânlarının artışı, dünya nüfusunun hızla artmasına neden olmuştur. Nüfustaki bu hızlı artış, endüstri faaliyetlerinin ivmelenmesine ve buna bağlı olarak tüketimin sürekli artmasına yol açmıştır.

Sanayi Devrimi'yle başlayan bu hızlı nüfus artışı, üretim ve tüketim faaliyetlerinin çoğalmasını beraberinde getirirken, ortaya çıkan atık miktarları da önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, atık yönetimini, günümüzün en kritik çevre sorunlarından biri haline getirmiştir.

Tersine lojistiğin bir faaliyet alanı olan atık yönetimi; atıkların kaynağında azaltılması, türlerine göre ayrılması, doğru şekilde toplanması, depolanması, taşınması ve nihayetinde geri kazanılması veya bertaraf edilmesi aşamalarını içerir. Etkili bir atık yönetimi, bu süreçlerin tamamının eksiksiz ve uygun şekilde uygulanmasıyla mümkün olur.

Sağlık merkezlerinde yapılan işlemler sonucunda ortaya çıkan evsel, enfeksiyöz, patolojik, kesici-delici gibi çeşitli atıklar, tıbbi atık kategorisinde değerlendirilir. Tıbbi atıklar, çevre ve insan sağlığı için ciddi tehdit oluşturan atık türlerindendir. Bu nedenle, bu atıkların toplanması, taşınması, geri kazanımı veya imhası süreçleri son derece önemlidir ve bu aşamalar yasal düzenlemelerle kontrol altına alınmıştır.

Artan nüfus ve endüstrileşme, sınırlı doğal kaynakların hızla tükenmesine de yol açmaktadır. Araştırmalar, son 40 yılda doğal kaynak kullanım oranının birkaç kat arttığını göstermektedir. Hayati öneme sahip bu kaynakların azalması, canlıların yaşam alanlarını daraltmakta ve iklim değişikliği gibi felaketlere zemin hazırlamaktadır.

İnsan ihtiyaçları devam ettiği sürece lojistik faaliyetler de sürdürülecektir. Ancak, lojistik faaliyetlerin gerçekleşmesi için doğal kaynak kullanımı kaçınılmazdır. Lojistik sadece taşımacılık faaliyeti yönüyle ele alındığında bile, bu süreçlerin zaman, enerji ve finansal kaynak gerektirdiği açıktır.

Araç Rotalama Problemi (ARP), toplam taşımacılık maliyetlerini en aza indirmeyi hedefleyen bir optimizasyon problemidir. En az kaynak kullanımıyla en fazla dağıtım ve/veya toplama yapılmasını amaçlar. Taşımacılık maliyetleri büyük ölçüde zaman ve enerji kullanımına dayandığından, bu maliyetleri düşürmeye yönelik çalışmalar, aynı zamanda doğal kaynak kullanımını da azaltmaktadır.

Bu çalışmanın uygulama bölümünde, tıbbi atıkların toplanması sırasında kat edilen mesafenin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Mesafenin azaltılması, taşımacılık için harcanan enerji, zaman ve maliyetlerin minimize edilmesini sağlayacaktır. Daha uzun vadede, taşımacılıkta kat edilen mesafenin ve enerji tüketiminin azalması, hava kirliliği ve küresel

ısınmanın temel nedenlerinden biri olan karbondioksit emisyonunun da düşürülmesine katkıda bulunması da beklenen çıktılar arasındadır.

Araç rotalamalarının optimize edilerek seyahat mesafelerinin azaltılması ile birlikte daha az yakıt tüketimiyle çevresel etkileri en aza indirilebilir. Aynı zamanda elektrikli, hibrit veya alternatif yakıtlı araçlar da rotalama planına dahil edilerek çevresel sorunların etkisi azaltılabilir.

Yapılan çalışma ekonomik açıdan değerlendirildiğinde uygun araç rotalamasının yapılmaması ile birlikte tıbbi atıkların taşınması sırasında fazla yakıt tüketimi ve işçilik maliyetleri çıkar bu durum da taşıma maliyetlerini arttırır. Yeterli sayıdan fazla araç kullanılması durumunda araç maliyetleri artar. Aynı zamanda rotaların planlaması ve yönetimi yapan kısımda ekstra zaman ve maliyet harcanmış olur. Bu gibi durumlar atık toplama merkezine maddi olarak yük oluşturacaktır.

REFERANSLAR

Alagöz, M., & Paksoy, H. (2023). Tersine lojistiğin önemi ve iyi uygulama örnekleri. Selçuk Üniversitesi Akşehir Meslek Yüksekokulu Sosyal Bilimler Dergisi(15), 103- 112.

Asghari, M., & Al-e, S. M. J. M. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. International Journal of Production Economics, 231, 107899.

Ay, E. (2018). İlaç sektöründe lojistik yönetimi ve tersine lojistik. Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli.

Ayvaz, B. 2013. Miktar ve kalite belirsizliği altında tersine lojistik ağ tasarımı için bir stokastik programlama örneği: Elektronik atık sektöründe bir uygulama. İTÜ, Doktora Tezi

Aydın, N. (2020). Sağlık Sektöründe Ters Lojistik. Balkan ve Yakın Doğu Sosyal Bilimler Dergisi, 6(Özel Sayı), 142–148.

Avarkan, D., 2018, E-Ticarette Tersine Lojistik Faaliyetlerinin Müşteri Memnuniyetine Etkisi, Yayınlanmış doktora tezi, Yalova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 4(1).

Bayhan, M., & Görücü, M. (2020). Bir Sağlık İşletmesinin Atık Yönetiminde Tersine Lojistik Süreçleri. Pamukkale Üniversitesi İşletme Araştırmaları Dergisi, 7(2), 412-430. https://doi.org/10.47097/piar.833360

Çakır, T.E. (2016). Bir tersine lojistik faaliyeti olarak tıbbi atıkların toplanmasında araç rotalama uygulaması, Sakarya Üniversitesi SBE, Yüksek Lisans Tez.

Çakır, A. G. T. E., & Topal, B. (2016). Tersine lojistik kapsamında tıbbi atıkların toplanması üzerine bir uygulama. IMUCO 2016, 770.

Ertaş, H., & Güden, M. A. (2019). Hastanelerde tıbbi atık yönetimi. Sosyal Araştırmalar Ve Yönetim Dergisi(1), 53-67. https://doi.org/10.35375/sayod.541876

Eryavuz, M., & Gencer, C. (2001). Araç Rotalama Problemine Ait Bir Uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6(1).

Farshchi, M. (2021). The capacitated vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows in the sustainable food supply chains. PhD thesis, METU, Ankara.

Hanum, F., Hadi, M., Aman, A., & Bakhtiar, T. (2019). Vehicle routing problems in rice-for- the-poor distribution. Decision Science Letters, 8(3), 323-338.
Kaçtıoğlu, S., & Şengül, Ü. (2011). Erzurum kenti ambalaj atıklarının geri dönüşümü için tersine lojistik ağı tasarımı ve bir karma. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, Cilt: 24, Sayı: 1, 2010
Karadayı Usta, S. (2022). Kullanılmayan ve Atık İlaçların Tersine Lojistik Faaliyetleri ile Toplanmasına Tüketicinin Bakış Açısının Değerlendirilmesi. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 34(4), 517-532.
Kısa Toğrul, E., Atıcı, K. B., Ulucan, A. İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi: Temel Yaklaşımlar ve Konvansiyonel Araç Rotalama Problemi ile Karşılaştırmalar, Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, DOI: 10.17065/huniibf.948698
KorkusuzPolat, T., 2019, "A Vehicle Routing Problem for a Logistics Company: The Milk-Run Application", International Agean Symposium on Innovative Interdisciplinary Scientific Researches, 26-27 March, İzmir, Turkey,
https://ac3df0a8-a5fe-4ca3-93da-632c835c1bbb.filesusr.com/ugd/614b1f_d86f14dcd9e34805a489cd8cf9282305.pdf
Salhi, S., Imran, A., Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation,. Computers & Operations Research, Volume 52, Part B, Pages 315-325, ISSN 0305-0548, https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.05.011
Semiha, E. (2019). Tam sayılı doğrusal programlama ile araç rotalama problemi çözümü ve bir servis ağında uygulaması. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi).Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
Uslu, Ş., & Akçadağ, M. (2012). İlaç Sektöründe Tersine Lojistik ve Dağıtımın Rolü: Bir Uygulama. Niğde Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 5(1), 149-158.
Yıldız, D. (2021). Türkiye'de Tersine Lojistiğin Rolü. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 11(1), 136-144. https://doi.org/10.48146/odusobiad.863504
Wang, Z., Sheu, J. B. (2019). Vehicle routing problem with drones, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 122, Pages 350-364, ISSN 0191-2615, https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005.

Elektrik Güç Sistemlerinde Koruma: Temel İlkeler ve Klasik Uygulama Yöntemleri

İbrahim ARSLANOĞLU[1]

İsmail Hakkı ALTAŞ[2]

1- Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, ibrahimarslanoglu@ktu.edu.tr , https://orcid.org/0000-0002-8213-8278
2- Ostim Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, ismailhakki.altas@ostimteknik.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-9298-4091

ÖZET

Elektrik güç sistemlerinde koruma, arıza koşullarının hızlı ve seçici biçimde algılanarak sistem güvenliğinin sağlanmasını amaçlayan temel bir mühendislik alanıdır. Özellikle klasik güç sistemlerinde, yüksek kısa devre akımları ve merkezi üretim yapısı nedeniyle koruma sistemlerinin doğru tasarlanması ve koordine edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kitap bölümünde, elektrik güç sistemlerinde kullanılan klasik koruma yaklaşımları kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır.

Çalışmada öncelikle klasik şebekelerde koruma felsefesinin dayandığı temel ilkeler açıklanmış, ardından koruma sistemini oluşturan ölçü transformatörleri, koruma röleleri, devre kesiciler ve yardımcı ekipmanlar değerlendirilmiştir. Devamında, klasik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan aşırı akım ve yönlü aşırı akım koruması ayrıntılı biçimde incelenmiş; bu koruma yöntemlerinin avantajları ve sınırlamaları ortaya konulmuştur. Diferansiyel koruma ve mesafe koruması ise iç arızalara ve iletim hattı arızalarına karşı sağladıkları yüksek hız ve seçicilik özellikleri açısından ele alınmıştır.

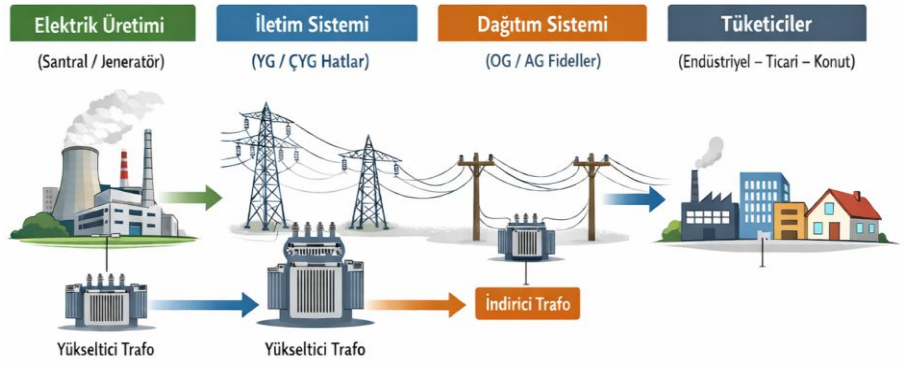
Bölüm boyunca, klasik güç sistemlerinde koruma yöntemlerinin uygulama esasları, koordinasyon gereksinimleri ve işletme koşulları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu kitap bölümü, klasik elektrik güç sistemlerinde koruma alanında çalışan mühendisler, araştırmacılar ve lisansüstü öğrenciler için temel bir başvuru kaynağı niteliği taşımakta; ileride yapılacak daha ileri seviye ve farklı şebeke yapılarının ele alındığı çalışmalara sağlam bir teorik zemin sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Elektrik güç sistemleri, Güç sistemi koruması, Klasik şebekeler, Aşırı akım koruması, Diferansiyel koruma, Mesafe koruması

GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinin güvenli, kararlı ve süreklilik arz edecek biçimde işletilebilmesi, etkin bir koruma sisteminin varlığına doğrudan bağlıdır. Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devreler, aşırı yüklenmeler ve yalıtım hataları gibi arıza durumları; yalnızca ilgili ekipmanlar için değil, aynı zamanda sistemin tamamı için ciddi güvenlik ve işletme riskleri doğurabilmektedir. Bu nedenle koruma sistemleri, elektrik güç sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olarak, arızaların hızlı bir şekilde algılanmasını ve yalnızca arızalı bölümün sistemden izole edilmesini amaçlamaktadır.

Elektrik enerjisinin güvenli, sürekli ve kaliteli biçimde sunulabilmesi; üretim, iletim ve dağıtım aşamalarından oluşan yapının uyumlu ve koordineli biçimde işletilmesine bağlıdır. Klasik elektrik güç sistemleri, santrallerde üretilen enerjinin yükseltici trafolar aracılığıyla iletim seviyesine taşındığı, ardından indirici trafolar üzerinden dağıtım sistemlerine aktarılarak son kullanıcılara ulaştırıldığı; üretim, iletim ve dağıtım süreçlerinin tamamını kapsayan hiyerarşik bir yapı olarak tanımlanmaktadır. Bu yapı kapsamında, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi, dağıtılması ve tüketilmesi amacıyla kurulan jeneratörler, transformatörler, iletim ve dağıtım hatları ile tüketici tesislerinin tamamı elektrik tesisleri olarak adlandırılmakta; aynı anma gerilim seviyesinde çalışmak üzere birbirine bağlanan tesisler ise şebeke kavramı ile ifade edilmektedir. Klasik bir elektrik güç sisteminin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarını içeren genel yapısı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Klasik bir elektrik güç sisteminin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarını içeren genel şematik gösterimi

Klasik elektrik güç sistemleri; merkezi üretim yapısı, yüksek kısa devre akımları ve büyük ölçekli iletim–dağıtım altyapıları ile karakterize edilmektedir. Bu tür sistemlerde koruma felsefesi; seçicilik, hız, güvenilirlik ve ekonomi ilkeleri doğrultusunda şekillenmiş, uzun yıllar boyunca saha deneyimleriyle olgunlaşmış yöntemlere dayanmaktadır. Aşırı akım, yönlü aşırı akım, diferansiyel ve mesafe koruması gibi geleneksel koruma yaklaşımları, klasik güç sistemlerinde halen yaygın olarak kullanılmakta ve sistem güvenliğinin sağlanmasında temel rol oynamaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Bununla birlikte, enterkonnekte yapıların yaygınlaşması ve işletme koşullarının çeşitlenmesi, klasik koruma yaklaşımlarının tasarımında daha dikkatli koordinasyon gereksinimlerini beraberinde getirmiştir. Özellikle aşırı akım temelli koruma sistemlerinde arıza akımlarının yön ve büyüklük açısından değişkenlik göstermesi, koruma ayarlarının hassasiyetini artırmaktadır. Bu durum, klasik koruma prensiplerinin sınırlarının doğru şekilde anlaşılmasını ve uygun uygulama yaklaşımlarının benimsenmesini gerekli kılmaktadır.

Bu kitap bölümünde, elektrik güç sistemlerinde koruma konusu klasik şebekeler çerçevesinde ele alınmıştır. Öncelikle klasik güç sistemlerinde koruma yaklaşımlarının temel ilkeleri açıklanmış; ardından koruma sistemini oluşturan ekipmanlar ve yaygın olarak kullanılan koruma yöntemleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Aşırı akım ve yönlü aşırı akım koruması, diferansiyel koruma ve mesafe koruması gibi temel koruma teknikleri; çalışma prensipleri, avantajları ve sınırlamalarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Böylece klasik güç sistemlerinde koruma alanına yönelik bütüncül ve sistematik bir bakış açısı sunulması amaçlanmıştır.

Bu kitap bölümünün literatüre ve uygulamaya sağladığı başlıca katkılar aşağıda özetlenmiştir:

- Klasik elektrik güç sistemlerinde koruma felsefesinin dayandığı temel ilkeler, mühendislik uygulamalarıyla ilişkilendirilerek sistematik bir çerçevede sunulmuştur.
- Aşırı akım, yönlü aşırı akım, diferansiyel ve mesafe koruması gibi geleneksel koruma yöntemleri; yalnızca teorik yönleriyle değil, uygulama esasları ve pratik sınırlamalarıyla birlikte ele alınmıştır.
- Röle koordinasyonu, seçicilik ve koordinasyon zaman aralığı (CTI) gibi kritik kavramlar, saha uygulamalarında karşılaşılan tipik sorunlar ışığında açıklanmıştır.
- Ölçü transformatörleri, koruma röleleri ve devre kesiciler gibi koruma sistemi ekipmanlarının, sistem performansı üzerindeki etkileri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

- Klasik şebekelerde kullanılan koruma yaklaşımlarının güçlü ve zayıf yönleri ortaya konularak, ilerleyen çalışmalarda farklı şebeke yapıları ve gelişmiş koruma stratejilerinin karşılaştırılmasına temel oluşturacak teorik bir altyapı sunulmuştur.
-

1. KLASİK ŞEBEKELERDE KORUMA YAKLAŞIMLARI

Elektrik güç sistemlerinde koruma, üretimden tüketime kadar olan süreçte meydana gelebilecek arızaların, sistemin geri kalanını etkilemeden en kısa sürede temizlenmesini amaçlayan temel bir işletme ve güvenlik mekanizmasıdır. Klasik elektrik şebekeleri; merkezi üretim yapıları, yüksek kısa devre akımları ve büyük ölçüde sabit şebeke topolojileri ile karakterize edilmektedir. Bu özellikler, koruma sistemlerinin deterministik prensiplere dayalı olarak tasarlanmasını ve uzun yıllardır uygulamada kabul görmüş yöntemlerin kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Rajalwal & Ghosh, 2020).

Klasik şebekelerde koruma sistemlerinin temel amacı; arıza durumunda yalnızca arızalı fider veya ekipmanın devre dışı bırakılması, arızasız bölümlerin ise enerjili kalmasının sağlanmasıdır. Bu yaklaşım, enerji arz sürekliliğinin korunması ve ekipmanların termik ve dinamik zorlanmalara karşı güvenliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Saygılı & Tezcan, 2019; Yıldız, 2022).

1.1. Koruma Felsefesi ve Temel İlkeler

Klasik güç sistemlerinde koruma felsefesi, uygulamada genel kabul görmüş seçicilik, hız, güvenilirlik, yedeklilik ve ekonomi ilkeleri üzerine kuruludur (Yıldız, 2022). Seçicilik ilkesi, arızanın meydana geldiği noktaya en yakın koruma elemanının çalışarak arızalı bölgeyi izole etmesini ve sistemin geri kalanının işletmede kalmasını ifade eder. Bu ilke, özellikle radyal ve yarı-enterkonnekte klasik şebekelerde röle zaman ayarlarının kademeli olarak düzenlenmesini gerektirir.

Hız ilkesi, arızanın sistemde kalma süresinin azaltılarak ekipman hasarlarının ve kararsızlık riskinin düşürülmesini amaçlarken; güvenilirlik ilkesi, koruma sisteminin arıza anında doğru ve tutarlı şekilde çalışmasını ifade eder. Yedeklilik, primer korumanın herhangi bir nedenle devreye girememesi durumunda, arızanın yedek koruma elemanları tarafından temizlenmesini garanti altına alır. Ekonomi ilkesi ise minimum maliyetle maksimum koruma fonksiyonunun sağlanmasını hedefler (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Yıldız, 2022).

Bu ilkelerin ihlali, uygulamada genellikle açma yapmama, yanlış açma veya gereksiz açma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Açma yapmama durumunda

arıza temizlenememekte ve ekipmanlar ciddi hasarlara maruz kalabilmektedir. Yanlış veya gereksiz açmalar ise enerji sürekliliğini bozarak geniş çaplı kesintilere yol açmaktadır. Bu nedenle klasik şebekelerde koruma sistemlerinin tasarımı, bu üç riskin en aza indirileceği şekilde yapılmalıdır (Saygılı & Tezcan, 2019; Yıldız, 2022).

1.2. Klasik Şebekelerde Kullanılan Temel Koruma Yaklaşımları

Klasik elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan koruma yöntemleri; aşırı akım, diferansiyel, yönlü aşırı akım ve mesafe koruması olarak sınıflandırılmaktadır. Klasik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan temel koruma yöntemleri, uygulama alanları ve başlıca özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu yöntemler, yüksek kısa devre akımlarının belirgin olduğu klasik sistemlerde arıza tespitinin güvenilir biçimde yapılmasına olanak tanımaktadır (Kılıçkıran et al., 2018; Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Aşırı akım koruması, sistemde herhangi bir nedenle normal değerin üzerinde akım geçmesi durumunda, ilgili fiderin veya ekipmanın zarar görmemesi için en kısa sürede devreden çıkarılmasını amaçlayan en temel koruma yöntemidir. Aşırı akım röleleri, sabit zaman gecikmeli veya ters zaman–akım karakteristiklerine göre çalışmakta olup, özellikle dağıtım ve alt iletim seviyelerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Akdağ & Yeroğlu, 2019; Yıldız, 2022).

Tablo 1. Klasik Güç Sistemlerinde Temel Koruma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Koruma yöntemi	Temel ilke	Tipik uygulama alanları	Başlıca avantajlar	Başlıca sınırlılıklar / dikkat noktaları
Aşırı akım koruması	Akımın ayar değerini aşmasıyla çalışır (DTOC/IDMT)	Dağıtım/alt iletim fiderleri, hatlar, bazı trafolar	Basit, ekonomik, ayarı ve bakımı görece kolay; geniş saha tecrübesi	Arıza akımı düşükse hassasiyet düşer; koordinasyon gerektirir, topoloji/işletme koşulu değişimlerinde ayar duyarlıdır
Yönlü aşırı akım koruması	Akım büyüklüğüne ek olarak **yön** tayini (I–V faz ilişkisi)	Ring/enterkonnekte fiderler, paralel beslemeli hatlar	Çok kaynaklı beslemede seçiciliği korur; yanlış açmaları azaltır	VT/PT ölçümü ve MTA ayarı kritik; koordinasyon daha karmaşık, gerilim çökmesi/ölçü hataları etkileyebilir
Diferansiyel koruma	Korunan bölgeye giren–çıkan akımların farkı (Idiff)	Trafo, jeneratör, bara; kısa mesafeli hatlar	Çok hızlı ve yüksek seçicilik; iç arızalara hassas	CT doygunluğu/ölçüm hataları etkiler; trafo inrush için bloke/harmonik kısıtlama gerekir;

Koruma yöntemi	Temel ilke	Tipik uygulama alanları	Başlıca avantajlar	Başlıca sınırlılıklar / dikkat noktaları
				maliyet ve uygulama karmaşıklığı daha yüksek
Mesafe koruması	V/I'den hat empedansı ölçülerek arıza "mesafesi" belirlenir	İletim hatları	Hızlı ve seçici; çok bölgeli yapı ile güçlü yedeklilik	Ark direnci, yük akımı ve ölçü hataları empedans ölçümünü etkileyebilir; bölge ayarları dikkat ister
Koruma koordinasyonu (yaklaşım)	Primer–yedek rölelerin CTI ile kademeli ayarlanması	Radyal ve yarı enterkonnekte klasik şebekeler	Seçicilik ve yedekliliği sistematik sağlar	CTI çok küçükse yanlış açma, çok büyükse gereksiz gecikme; ayarlar değişen işletmede güncellenmelidir
Merkezi koordinasyon yaklaşımı (tamamlayıcı)	Merkezi karar/koordinasyon mantığıyla seçici açma	DG etkisiyle koordinasyonun zorlaştığı dağıtım yapıları	Klasik korumanın yetersiz kaldığı durumlarda seçiciliği iyileştirmeye katkı sağlar	Haberleşme/altyapı gereksinimi ve uygulama karmaşıklığı; kapsam net tanımlanmalıdır

1.3. Röle Koordinasyonu ve Seçiciliğin Sağlanması

Klasik şebekelerde seçiciliğin pratikte sağlanabilmesi için röle koordinasyonu kritik bir tasarım aşamasıdır. Röle koordinasyonu, primer ve yedek koruma elemanları arasında belirli bir koordinasyon zaman aralığı (CTI) bırakılarak gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, arıza noktasına en yakın rölenin öncelikli olarak çalışmasını, başarısız olması durumunda ise yedek rölenin devreye girmesini sağlar (Yıldız, 2022).

Sabit zaman gecikmeli (DTOC) ve ters zaman–akım karakteristikli (IDMT) röleler, klasik şebekelerde koordinasyonun sağlanmasında temel araçlardır. Özellikle IDMT röleler, arıza akımı büyüdükçe daha kısa sürede açma yaparak hem seçiciliğin hem de hız gereksiniminin karşılanmasına katkı sağlamaktadır (Gupta & Deep, 2020; Özgüner & Seyyarer, 2023).

1.4. Ring ve Enterkonnekte Şebekelerde Yönlü Koruma

Klasik güç sistemleri her zaman saf radyal yapıda olmayabilir. Ring veya enterkonnekte şebekelerde arıza akımları birden fazla kaynaktan beslendiği için, yalnızca akım büyüklüğüne dayalı koruma yaklaşımları yetersiz kalabilmektedir. Bu tür yapılarda yönlü aşırı akım röleleri, arıza akımının

yön bilgisini de dikkate alarak seçiciliğin korunmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Yeroğlu & Akdağ, 2022; Alamshah et al., 2024).
Yönlü aşırı akım rölelerinde yön tayini yapılabilmesi için gerilim bilgisinden de yararlanılmakta; maksimum tork açısı uygun şekilde ayarlanarak endüktif karakterli arıza akımlarının daha hassas biçimde algılanması sağlanmaktadır. Türkiye gibi iletim ve dağıtım şebekelerinde endüktif etkinin baskın olduğu sistemlerde, yönlü koruma klasik koruma felsefesinin tamamlayıcı bir unsuru olarak değerlendirilmektedir (Yıldız, 2022).

1.5. Dijital Röleler ve Klasik Koruma Yaklaşımlarının Güncel Uygulamaları

Günümüzde klasik güç sistemlerinde kullanılan koruma röleleri büyük ölçüde dijital yapıya sahiptir. Dijital aşırı akım röleleri, çok sayıda koruma fonksiyonunu tek bir cihazda barındırmakta; ayar esnekliği, izleme ve kayıt olanakları sunmaktadır. Bununla birlikte, bu rölelerin klasik şebekelerdeki temel işlevi, koruma felsefesini değiştirmekten ziyade; aşırı akım ve yönlü koruma gibi geleneksel yaklaşımların daha etkin ve güvenilir şekilde uygulanmasını sağlamaktır (Kılıçkıran et al., 2018; Oğuz et al., 2019).

2. ARIZA TÜRLERİ VE KORUMA STRATEJİLERİ

Elektrik güç sistemlerinde meydana gelen arızalar, sistemin normal işletme koşullarından sapmasına neden olan ve enerji sürekliliğini, ekipman güvenliğini ve sistem kararlılığını doğrudan etkileyen olaylar olarak tanımlanmaktadır. Klasik güç sistemlerinde koruma stratejilerinin doğru şekilde tasarlanabilmesi için, arıza türlerinin fiziksel nedenleri, karakteristikleri ve sistem üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması gerekmektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Saygılı & Tezcan, 2019).

Arızalar genel olarak kısa devre arızaları ve aşırı yük koşulları olmak üzere iki ana grupta ele alınmaktadır. Kısa devre arızaları, sistem empedansının ani olarak düşmesi sonucu yüksek akımların oluşmasına neden olurken; aşırı yük durumları daha düşük seviyede fakat uzun süreli termik zorlanmalar meydana getirmektedir. Bu iki arıza türü, klasik şebekelerde farklı koruma stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir (Yıldız, 2022).

2.1. Kısa Devre Arızalarının Sınıflandırılması

Kısa devre arızaları, faz iletkenleri ve toprak arasındaki istenmeyen elektriksel temaslar sonucu oluşmaktadır. Klasik güç sistemlerinde bu arızalar genellikle simetrik (üç fazlı) ve asimetrik (tek faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak) arızalar olarak sınıflandırılmaktadır. Uygulamada en yüksek kısa devre akımları üç fazlı arızalarda görülmekle birlikte, en sık karşılaşılan arıza türü tek faz-toprak arızalarıdır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Saygılı & Tezcan, 2019).

Asimetrik arızalar, sistemde dengesiz akım ve gerilimlere yol açarak negatif ve sıfır bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle döner makinelerde aşırı ısınma ve titreşim gibi mekanik zorlanmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle klasik şebekelerde koruma sistemleri, farklı arıza türlerini ayırt edebilecek şekilde tasarlanmaktadır (Yıldız, 2022).

2.2. Aşırı Yük ve Termik Zorlanmalar

Aşırı yük durumları, kısa devre arızalarından farklı olarak ani ve yüksek akımlar yerine, uzun süreli ve görece daha düşük seviyede akımların oluşmasıyla karakterizedir. Bu tür durumlar genellikle yük artışı, hat kapasitesinin aşılması veya işletme koşullarındaki değişiklikler sonucu ortaya çıkmaktadır. Aşırı yükler, doğrudan kısa devre kadar yıkıcı olmamakla birlikte, ekipmanların termik sınırlarının aşılmasına ve izolasyon ömrünün kısalmasına neden olmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Klasik güç sistemlerinde aşırı yük koruması, çoğunlukla ters zaman–akım karakteristikli aşırı akım röleleri veya termik koruma fonksiyonları kullanılarak sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, kısa süreli geçici yük artışlarının tolere edilmesine, ancak sürekli aşırı yüklerin güvenli biçimde sınırlandırılmasına olanak tanımaktadır (Akdağ & Yeroğlu, 2019; Yıldız, 2022).

2.3. Arıza Akımlarının Koruma Açısından Değerlendirilmesi

Arıza akımlarının büyüklüğü ve yönü, klasik şebekelerde uygulanacak koruma stratejilerinin belirlenmesinde temel parametrelerdir. Kısa devre akımının büyüklüğü; kaynak gücü, hat empedansı, trafo bağlantı grupları ve topraklama yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle koruma sistemlerinin tasarımında, farklı arıza senaryoları için hesaplanan kısa devre akımları dikkate alınmalıdır (Saygılı & Tezcan, 2019).

Özellikle ring ve enterkonnekte yapılarda arıza akımları birden fazla yönden beslenebildiğinden, yalnızca akım büyüklüğüne dayalı koruma yaklaşımları yetersiz kalabilmektedir. Bu tür durumlarda yön bilgisi de dikkate alınarak çalışan yönlü aşırı akım röleleri, klasik koruma stratejilerinin önemli bir tamamlayıcısı hâline gelmektedir (Yeroğlu & Akdağ, 2022).

2.4. Arıza Türlerine Göre Koruma Stratejileri

Klasik güç sistemlerinde koruma stratejileri, arıza türüne ve korunan ekipmanın özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Hat ve fider korumasında çoğunlukla aşırı akım ve yönlü aşırı akım röleleri tercih edilirken, transformatör ve jeneratör gibi kritik ekipmanlarda diferansiyel koruma yaygın olarak kullanılmaktadır. Diferansiyel koruma, korunan bölgeye giren ve çıkan akımların karşılaştırılmasına dayandığı için iç

arızalara karşı yüksek hassasiyet sağlamaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Mesafe koruması ise özellikle iletim hatlarında, arıza noktasına olan empedansın ölçülmesine dayalı olarak çalışan bir yöntemdir. Çok bölgeli yapısı sayesinde hızlı ve seçici koruma sağlayan mesafe röleleri, klasik iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer temel koruma yaklaşımıdır (Saygılı & Tezcan, 2019).

2.5. Klasik Koruma Stratejilerinin Sınırları

Klasik güç sistemlerinde uygulanan koruma stratejileri, yüksek kısa devre akımları ve sabit şebeke topolojileri altında uzun yıllar boyunca etkin biçimde kullanılmaktadır. Ancak şebeke karmaşıklığının artması, enterkonnekte yapıların yaygınlaşması ve işletme koşullarının çeşitlenmesi, bazı durumlarda koruma koordinasyonunun zorlaşmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda literatürde, klasik koruma yaklaşımlarının performans sınırlarının değerlendirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yer almaktadır (Rajalwal & Ghosh, 2020; Özgüner & Seyyarer, 2023).

Bununla birlikte, klasik şebekelerde koruma felsefesinin temel ilkeleri geçerliliğini korumakta; geliştirilen yeni teknikler çoğunlukla bu temel yapıların üzerine inşa edilmektedir.

3. KORUMA SİSTEMİ EKİPMANLARI

Elektrik güç sistemlerinde koruma işlevinin etkin bir şekilde yerine getirilebilmesi, yalnızca doğru koruma felsefesinin benimsenmesine değil; aynı zamanda uygun koruma ekipmanlarının seçilmesine ve bu ekipmanların birbiriyle uyumlu şekilde çalışmasına bağlıdır. Klasik güç sistemlerinde koruma sistemleri; ölçme, algılama, karar verme ve açma işlemlerini gerçekleştiren ekipmanların bütünleşik çalışmasıyla oluşturulmaktadır. Bu ekipmanlar temel olarak ölçü transformatörleri, koruma röleleri, devre kesiciler ve yardımcı ekipmanlar şeklinde sınıflandırılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Saygılı & Tezcan, 2019). Koruma sisteminin herhangi bir bileşeninde meydana gelebilecek hata veya uyumsuzluk, arızanın doğru algılanamamasına ya da zamanında temizlenememesine neden olabilmektedir. Bu nedenle klasik güç sistemlerinde koruma ekipmanları, sistemin tamamı göz önünde bulundurularak bütüncül bir yaklaşımla tasarlanmalı ve işletilmelidir (Yıldız, 2022).

3.1. Ölçü Transformatörleri (Akım ve Gerilim Transformatörleri)

Klasik güç sistemlerinde koruma röleleri, doğrudan yüksek akım ve gerilim seviyelerinde çalıştırılmamaktadır. Bu nedenle sistemdeki akım ve gerilim bilgileri, akım transformatörleri (CT) ve gerilim transformatörleri (VT/PT) aracılığıyla ölçülerek rölelere iletilmektedir. Ölçü transformatörleri hem

ölçüm güvenliğini sağlamakta hem de koruma rölelerinin standart giriş seviyelerinde çalışmasına olanak tanımaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

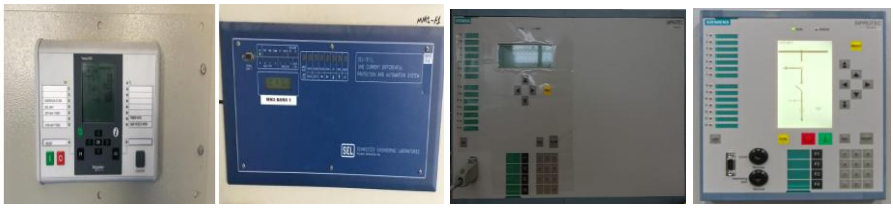
Akım transformatörlerinin doğruluk sınıfı ve doygunluk özellikleri, özellikle kısa devre arızalarında koruma performansını doğrudan etkilemektedir. CT doygunluğu, röleye iletilen akım bilgisinin bozulmasına ve bazı durumlarda koruma fonksiyonlarının gecikmesine veya yanlış çalışmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle klasik şebekelerde CT seçimi, röle ayarlarıyla birlikte değerlendirilmesi gereken kritik bir tasarım parametresidir (Yıldız, 2022).

Gerilim transformatörleri ise yönlü aşırı akım ve mesafe koruması gibi uygulamalarda referans gerilim bilgisinin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Özellikle yönlü rölelerin doğru çalışabilmesi için güvenilir gerilim ölçümü zorunludur (Yeroğlu & Akdağ, 2022).

3.2. Koruma Röleleri

Koruma röleleri, ölçü transformatörlerinden alınan akım ve gerilim bilgilerini, önceden belirlenmiş eşik değerleri ve zaman ayarları ile karşılaştırarak arıza durumunda devre kesicilere açma komutu gönderen temel karar elemanlarıdır. Klasik güç sistemlerinde kullanılan koruma röleleri; aşırı akım, yönlü aşırı akım, diferansiyel ve mesafe röleleri gibi farklı fonksiyonlara sahip olabilmektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Günümüzde klasik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan koruma röleleri, çoğunlukla dijital yapıda olup farklı üreticilere ait çeşitli donanım ve yazılım özelliklerine sahip çözümler sunmaktadır. Şekil 2'de, farklı markalar tarafından geliştirilen ve klasik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bazı koruma rölelerine örnekler verilmiştir.



Şekil 2. Farklı markalara ait koruma röleleri

Aşırı akım röleleri, belirli bir akım seviyesinin aşılması durumunda çalışmakta; ters zaman–akım karakteristikli röleler ise arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak değişken açma süreleri sunmaktadır. Bu özellik,

klasik şebekelerde seçiciliğin ve hız gereksiniminin birlikte sağlanmasına katkı sunmaktadır (Akdağ & Yeroğlu, 2019; Özgüner & Seyyarer, 2023).

Yönlü aşırı akım röleleri ise akım büyüklüğüne ek olarak akım–gerilim faz ilişkisini de dikkate alarak arızanın yönünü belirlemektedir. Bu röleler, ring ve enterkonnekte şebekelerde seçiciliğin korunmasında önemli bir role sahiptir (Yeroğlu & Akdağ, 2022).

3.3. Dijital Koruma Röleleri ve Klasik Sistemlerdeki Yeri

Günümüzde klasik güç sistemlerinde kullanılan koruma rölelerinin büyük bir bölümü dijital yapıya sahiptir. Dijital koruma röleleri, çok sayıda koruma fonksiyonunu tek bir cihazda barındırmakta; ayar esnekliği, olay kayıtları ve uzaktan izleme olanakları sunmaktadır. Bununla birlikte, klasik şebekelerde dijital rölelerin temel rolü, koruma felsefesini değiştirmekten ziyade; geleneksel koruma yaklaşımlarının daha etkin ve güvenilir biçimde uygulanmasını sağlamaktır (Kılıçkıran et al., 2018; Oğuz et al., 2019).

Dijital rölelerin sunduğu kayıt ve analiz imkânları, arıza sonrası değerlendirmelerin yapılmasını kolaylaştırmakta ve koruma sistemlerinin işletme performansının izlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu özellikler, klasik koruma sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Oğuz et al., 2019).

3.4. Devre Kesiciler

Devre kesiciler, koruma rölelerinden gelen açma komutlarını fiziksel olarak yerine getiren anahtarlama elemanlarıdır. Klasik güç sistemlerinde devre kesicilerin açma süresi, kesme kapasitesi ve güvenilirliği, koruma sisteminin toplam tepki süresini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle röle–devre kesici koordinasyonu, koruma sistemlerinin tasarımında kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Devre kesicilerin arıza akımını güvenli bir şekilde kesebilmesi için, sistemde oluşabilecek maksimum kısa devre akımlarına uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Aksi hâlde, açma başarısızlığı sistem güvenliği açısından ciddi riskler doğurabilmektedir (Saygılı & Tezcan, 2019).

3.5. Yardımcı Ekipmanlar ve İşletme Güvenilirliği

Koruma sistemlerinde yardımcı ekipmanlar; kilitleme devreleri, yardımcı röleler, sinyalizasyon elemanları ve haberleşme donanımlarını kapsamaktadır. Bu ekipmanlar, koruma sisteminin güvenli ve kontrollü biçimde işletilmesini sağlamakta; bakım ve arıza analiz süreçlerini desteklemektedir (Saygılı & Tezcan, 2019).

Klasik güç sistemlerinde koruma ekipmanlarının güvenilirliği, yalnızca teorik ayar hesaplarıyla değil; düzenli bakım, test ve saha deneyimleriyle de

yakından ilişkilidir. Bu nedenle koruma sistemi ekipmanlarının işletme koşulları ve bakım süreçleri, koruma sisteminin bütüncül performansının ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır (Rajalwal & Ghosh, 2020; Yıldız, 2022).

4. AŞIRI AKIM VE YÖNLÜ AŞIRI AKIM KORUMASI

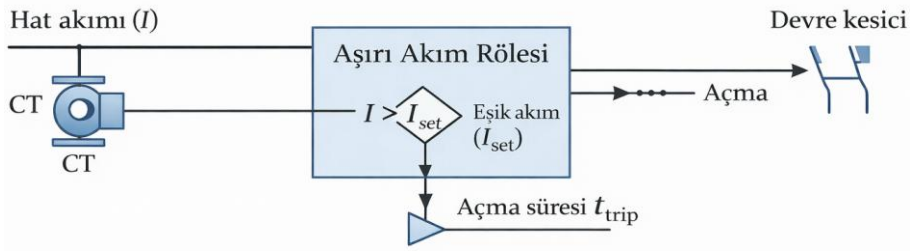
Aşırı akım koruması, klasik elektrik güç sistemlerinde en yaygın ve en temel koruma yöntemlerinden biridir. Bu koruma yaklaşımı, sistemde meydana gelen arızalar sonucunda akımın normal işletme değerlerinin üzerine çıkması esasına dayanmakta ve belirlenen eşik değerlerin aşılması durumunda arızalı bölümün devre dışı bırakılmasını amaçlamaktadır. Yüksek kısa devre akımlarının karakteristik olarak belirgin olduğu klasik şebekelerde, aşırı akım koruması uzun yıllardır güvenilir ve ekonomik bir çözüm olarak kullanılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Akdağ & Yeroğlu, 2019).

Aşırı akım röleleri, özellikle dağıtım ve alt iletim seviyelerinde; fiderler, transformatörler ve bazı durumlarda jeneratörlerin korunmasında temel koruma elemanı olarak görev yapmaktadır. Bu röleler hem arızaların hızlı şekilde temizlenmesini hem de sistemin geri kalanının işletmede kalmasını sağlayacak şekilde koordine edilmektedir (Saygılı & Tezcan, 2019).

4.1. Aşırı Akım Rölelerinin Çalışma Prensibi

Aşırı akım röleleri, ölçü transformatörleri (CT) aracılığıyla elde edilen hat akımı bilgisini (I), önceden belirlenmiş eşik akım değeri (I_set) ile karşılaştırarak çalışmaktadır. Ölçülen akım değerinin röle ayarlarında tanımlanan eşik seviyesini aşması durumunda (I > I_set), rölenin zamanlayıcısı devreye girmekte ve ayarlanan açma süresi (t_trip) sonunda devre kesiciye açma komutu gönderilmektedir. Bu temel çalışma prensibi, Şekil 3'te tek-hat (single-line) şema üzerinde şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapı, klasik şebekelerde arıza akımlarının yük akımlarından belirgin şekilde ayrışması sayesinde güvenilir biçimde uygulanabilmektedir (Yıldız, 2022).

Uygulamada aşırı akım röleleri, sabit zaman gecikmeli (*Definite Time Overcurrent – DTOC*) ve ters zaman–akım karakteristikli (*Inverse Definite Minimum Time – IDMT*) olmak üzere iki temel grupta ele alınmaktadır. DTOC rölelerde açma süresi, arıza akımının büyüklüğünden bağımsız olarak sabit bir değere ayarlanırken, IDMT rölelerde açma süresi arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Bu özellik, özellikle ardışık fider yapılarında daha hassas bir seçicilik ve daha etkin bir koruma koordinasyonu sağlamaktadır (Akdağ & Yeroğlu, 2019; Gupta & Deep, 2020).



Şekil 3. Aşırı akım rölesinin zaman gecikmeli açma prensibi

4.2. Zaman–Akım Karakteristikleri ve Röle Ayarları

Ters zaman–akım karakteristikli aşırı akım rölelerinde açma süresi; zaman çarpanı (TMS/TDS) ve akım ayar değeri (pickup current) gibi parametreler ile belirlenmektedir. Bu parametrelerin doğru seçilmesi, primer ve yedek koruma elemanları arasındaki koordinasyonun sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Klasik şebekelerde röle ayarları genellikle en yakın röleden uzağa doğru artan açma süreleri esas alınarak yapılmaktadır (Yıldız, 2022; Özgüner & Seyyarer, 2023).

Koordinasyon sürecinde kullanılan koordinasyon zaman aralığı (CTI), birincil koruma elemanının başarısız olması durumunda yedek rölenin güvenli şekilde devreye girmesini sağlayacak minimum zaman farkını ifade etmektedir. CTI değerinin çok küçük seçilmesi yanlış açmalara, çok büyük seçilmesi ise gereksiz gecikmelere neden olabilmektedir. Bu nedenle klasik şebekelerde CTI değeri, saha deneyimleri ve işletme koşulları dikkate alınarak belirlenmektedir (Akdağ & Yeroğlu, 2019). Aşırı akım rölelerinin koordinasyonunda kullanılan temel parametreler ve kavramlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Röle Koordinasyonu ve Ayar Parametreleri: Temel Kavramlar

Terim / Parametre	**Açılımı ve Teknik Tanımı**	**Neyi Etkiler?**	**Pratik Mühendislik Notu**	**Yanlış Ayar Durumunda Olası Sonuç**
Primer Röle	Arızaya en yakın konumda bulunan ve arıza durumunda ilk çalışması beklenen koruma rölesi	Seçicilik, arıza temizleme süresi	En kısa açma süresine sahip olacak şekilde ayarlanır	Geç açma → ekipman hasarı, termik zorlanma
Yedek (Backup) Röle	Primer rölenin çalışmaması durumunda arızayı temizlemek üzere devreye giren ikincil koruma rölesi	Güvenilirlik, sistem emniyeti	Primerden sonra çalışacak şekilde zaman gecikmeli ayarlanır	Erken açma → gereksiz geniş alanlı kesinti

Terim / Parametre	Açılımı ve Teknik Tanımı	Neyi Etkiler?	Pratik Mühendislik Notu	Yanlış Ayar Durumunda Olası Sonuç
CTI (Coordination Time Interval)	Primer ve yedek rölelerin açma zamanları arasında bırakılan minimum güvenlik zaman farkı	Seçicilik, yanlış açma riski	Uygulamada genellikle 0.2–0.4 s aralığında seçilir	Küçük CTI → çakışan açmalar; büyük CTI → gereksiz gecikme
DTOC (Definite Time Overcurrent)	**Definite Time Overcurrent**: Akım büyüklüğünden bağımsız, sabit zaman gecikmesiyle çalışan aşırı akım koruması	Açma süresi	Basit ve öngörülebilir yapı; seçicilik zaman kademelendirmesine dayanır	Yüksek gecikme → yavaş arıza temizleme
IDMT (Inverse Definite Minimum Time)	Arıza akımı arttıkça açma süresi azalan, minimum zaman sınırı bulunan ters zaman–akım karakteristiği	Hız ve seçicilik dengesi	Dağıtım sistemlerinde en yaygın kullanılan karakteristik	Yanlış TMS/TDS → koordinasyon bozulması
Ipickup / PS (Pickup Current / Plug Setting)	Rölenin çalışmaya başladığı eşik akım değeri	Hassasiyet (duyarlılık)	Yük akımının üzerinde, minimum arıza akımının altında seçilir	Düşük ayar → gereksiz açma; yüksek ayar → arıza kaçırma
TMS / TDS (Time Multiplier Setting / Time Dial Setting)	IDMT eğrisi üzerinde açma süresini ölçeklendiren zaman ayar parametresi	Açma süresi, koordinasyon	Koordinasyonun en kritik ayar parametrelerinden biridir	Büyük TMS → aşırı gecikme; küçük TMS → çakışan açma
MTA (Maximum Torque Angle)	Yönlü rölelerde en hassas yön tayininin yapıldığı akım–gerilim faz açısı	Yön tayini doğruluğu	Hat empedans açısına yakın seçilmelidir	Yanlış yön tayini → hatalı açma
Koruma Bölgesi (Zone)	Mesafe rölelerinde arıza kapsama alanını belirleyen empedans bölgesi (Zone-1, Zone-2, Zone-3)	Hız ve yedeklilik	Zone-1 hızlı; Zone-2 ve Zone-3 zaman gecikmelidir	Yanlış bölge ayarı → yedek koruma kaybı
Seçicilik	Sadece arızalı bölümün sistemden ayrılması prensibi	Kesinti alanı	Korumanın temel kalite ölçütlerinden biridir	Seçicilik kaybı → geniş çaplı kesinti
Güvenilirlik	Koruma sisteminin doğru zamanda, doğru elemanla çalışabilme yeteneği	Sistem emniyeti	Yanlış açma ve açmama olasılığı düşük olmalıdır	Güvenilirlik kaybı → sistem kararsızlığı

4.3. Yönlü Aşırı Akım Korumasının Gerekliliği

Klasik güç sistemleri her zaman saf radyal yapıda olmayabilir. Ring ve enterkonnekte şebekelerde arıza akımları birden fazla kaynaktan beslendiğinden, yalnızca akım büyüklüğüne dayalı aşırı akım koruması seçiciliği sağlamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu tür yapılarda yönlü aşırı akım koruması, arıza akımının yön bilgisini de dikkate alarak doğru koruma kararının verilmesini sağlamaktadır (Yeroğlu & Akdağ, 2022; Alamshah et al., 2024).

Yönlü aşırı akım röleleri, akım ve gerilim bilgilerini birlikte kullanarak arızanın röleye göre ileri (forward) veya geri (reverse) yönde meydana gelip gelmediğini belirlemektedir. Bu sayede yalnızca istenilen yönde meydana gelen arızalar için açma yapılmakta, komşu fider veya hatlardaki arızalar için yanlış açmalar önlenmektedir (Yeroğlu & Akdağ, 2022).

4.4. Yönlü Aşırı Akım Rölelerinin Ayarları ve Uygulama Esasları

Yönlü aşırı akım rölelerinin doğru çalışabilmesi için maksimum tork açısı (MTA) ve gerilim referanslarının uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Endüktif karakterin baskın olduğu klasik iletim ve dağıtım şebekelerinde, MTA değeri genellikle hat empedans açısına yakın seçilmektedir. Bu yaklaşım, arıza akımlarının daha hassas biçimde algılanmasını sağlamaktadır (Yıldız, 2022).

Ring şebekelerde yönlü rölelerin koordinasyonu, radyal yapılara kıyasla daha karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle yönlü aşırı akım röleleri çoğu zaman aşırı akım koruması ile birlikte değerlendirilmekte ve uygun koordinasyon stratejileri geliştirilmektedir (Alamshah et al., 2024).

4.5. Aşırı Akım ve Yönlü Korumanın Avantajları ve Sınırları

Aşırı akım ve yönlü aşırı akım koruması, klasik güç sistemlerinde basitlik, ekonomi ve uygulama kolaylığı gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Röle ayarlarının nispeten anlaşılır olması ve bakım süreçlerinin kolaylığı, bu koruma yöntemlerinin yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Bununla birlikte, arıza akımlarının düşük olduğu veya besleme yönlerinin sık değiştiği durumlarda aşırı akım temelli koruma yaklaşımlarının performansı sınırlanabilmektedir. Bu tür durumlar, özellikle enterkonnekte yapıların yaygınlaştığı klasik şebekelerde daha dikkatli bir koordinasyon gerektirmektedir (Rajalwal & Ghosh, 2020).

Literatürde, bu sınırlamaların aşılmasına yönelik olarak merkezi karar mekanizmalarına dayanan tamamlayıcı koruma yaklaşımları da ele

alınmıştır. Nuroğlu ve Arsoy (2015), dağıtılmış üretim içeren dağıtım sistemleri için önerdikleri merkezi koordinasyon rölesi yapısı ile arıza yerinin belirlenmesi ve uygun kesicilerin seçici olarak açtırılmasının mümkün olduğunu göstermiştir. Bu tür yaklaşımlar, klasik aşırı akım ve yönlü koruma prensiplerinin yetersiz kaldığı durumlarda sistem güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlayabilecek alternatif çözümler sunmaktadır.

5. DİFERANSİYEL KORUMA

Diferansiyel koruma, elektrik güç sistemlerinde belirli bir ekipman veya koruma bölgesi içerisinde meydana gelen iç arızaların hızlı ve seçici biçimde algılanmasını amaçlayan temel bir koruma yöntemidir. Bu yaklaşım, korunan bölgeye giren ve bu bölgeden çıkan akımların karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Normal işletme koşullarında bu akımların eşit olması beklenirken, bölge içinde meydana gelen bir arıza durumunda akımlar arasında belirgin bir fark oluşmaktadır. Diferansiyel koruma röleleri, bu farkı algılayarak devre kesiciye açma komutu göndermektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Saygılı & Tezcan, 2019).

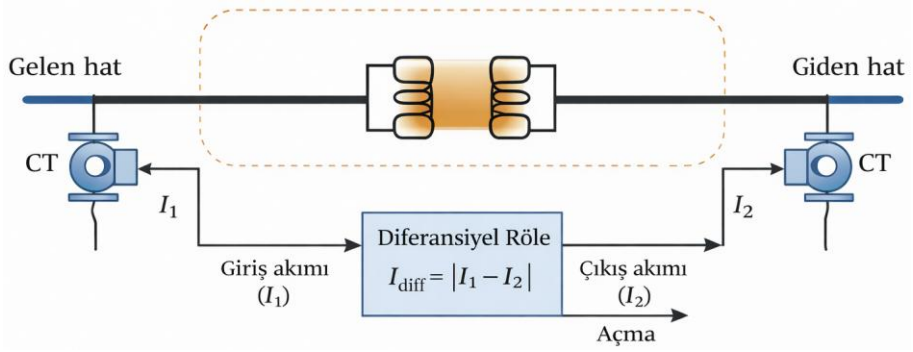
Diferansiyel koruma, klasik güç sistemlerinde özellikle güç transformatörleri, jeneratörler, baralar ve kısa mesafeli iletim hatları gibi kritik ekipmanların korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ekipmanların arıza durumunda hızlı biçimde sistemden ayrılması hem ekipman hasarlarının önlenmesi hem de sistem kararlılığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır (Yıldız, 2022).

5.1. Diferansiyel Korumanın Çalışma Prensibi

Diferansiyel koruma sistemlerinde, korunan ekipmanın giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilen akım transformatörleri aracılığıyla ölçülen akımlar karşılaştırılmaktadır. Bu akımlar arasındaki fark, diferansiyel akım olarak tanımlanmakta ve rölenin temel çalışma kriterini oluşturmaktadır. Diferansiyel röle, giriş akımı (I_1) ile çıkış akımı (I_2) arasındaki farkı $I_diff = |I_1 - I_2|$ bağıntısı ile hesaplamakta; bu diferansiyel akımın önceden belirlenen eşik değerini aşması durumunda devre kesiciye açma komutu göndermektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Normal işletme koşullarında veya koruma bölgesi dışındaki arızalarda giriş ve çıkış akımları birbirine yaklaşık olarak eşit olduğundan ($I_1 \approx I_2$), diferansiyel akım sıfıra yakın olmakta ve röle çalışmamaktadır. Buna karşılık, koruma bölgesi içerisinde meydana gelen bir iç arıza durumunda I_1 ve I_2 akımları arasındaki fark artmakta, diferansiyel akım eşik değerini aşarak rölenin hızlı bir şekilde çalışmasına neden olmaktadır. Bu çalışma prensibi, Şekil 4'te giriş ve çıkış akımlarının karşılaştırılmasına dayalı olarak şematik biçimde gösterilmiştir.

Bu yöntemin en önemli avantajı, arıza akımının büyüklüğünden bağımsız olarak yalnızca arızanın konumuna odaklanmasıdır. Bu sayede diferansiyel koruma, iç arızalara karşı yüksek hız, mutlak seçicilik ve yüksek hassasiyet sağlayarak klasik güç sistemlerinde kritik ekipmanların korunmasında etkin bir performans sunmaktadır (Saygılı & Tezcan, 2019).



Şekil 4. Diferansiyel koruma sisteminin genel çalışma prensibi

5.2. Transformatör Diferansiyel Koruması

Klasik güç sistemlerinde diferansiyel korumanın en yaygın uygulama alanlarından biri güç transformatörleridir. Transformatör iç arızaları, sargı hasarları ve izolasyon bozulmaları gibi ciddi sonuçlar doğurabildiğinden, bu ekipmanların hızlı ve güvenilir şekilde korunması gerekmektedir. Transformatör diferansiyel korumasında, primer ve sekonder taraftan ölçülen akımlar uygun dönüşüm oranları dikkate alınarak karşılaştırılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Ancak transformatörlerin manyetik özellikleri nedeniyle, ilk enerjilendirme akımları (inrush) diferansiyel koruma sistemlerinde yanlış açmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle klasik uygulamalarda diferansiyel röleler, inrush akımlarını bastırmaya yönelik bloke veya filtreleme mekanizmaları ile donatılmaktadır (Yıldız, 2022).

5.3. Bara ve Jeneratör Diferansiyel Koruması

Bara diferansiyel koruması, birden fazla hat ve fiderin bağlandığı baralarda meydana gelebilecek iç arızaların hızlı şekilde izole edilmesini amaçlamaktadır. Bara arızaları, kısa sürede çok yüksek arıza akımlarına neden olabildiğinden, diferansiyel koruma bu tür uygulamalarda kritik bir rol üstlenmektedir. Klasik şebekelerde bara diferansiyel koruması, yüksek hız ve mutlak seçicilik avantajları nedeniyle tercih edilmektedir (Saygılı & Tezcan, 2019).

Jeneratör diferansiyel koruması ise stator sargılarında meydana gelebilecek iç arızaların algılanmasına yönelik olarak uygulanmaktadır. Jeneratörlerin sistem kararlılığı açısından kritik öneme sahip olması, bu ekipmanların diferansiyel koruma ile korunmasını gerekli kılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

5.4. Diferansiyel Korumanın Avantajları ve Sınırlamaları

Diferansiyel korumanın en önemli avantajları arasında yüksek hız, mutlak seçicilik ve iç arızalara karşı yüksek hassasiyet yer almaktadır. Bu özellikler, diferansiyel korumayı klasik güç sistemlerinde vazgeçilmez bir koruma yöntemi hâline getirmektedir (Saygılı & Tezcan, 2019). Bununla birlikte ölçü transformatörlerindeki doygunluk, ölçüm hataları ve geçici rejimler diferansiyel koruma performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle diferansiyel koruma sistemlerinin tasarımında CT seçimi, eşik değerleri ve bloke mekanizmaları dikkatle değerlendirilmelidir (Yıldız, 2022).

6. MESAFE RÖLELERİ VE İLETİM HATLARINDA KORUMA

İletim hatları, elektrik güç sistemlerinde en fazla arızaya maruz kalan ve arıza etkilerinin sistem geneline hızla yayılabildiği bileşenler arasında yer almaktadır. Uzun mesafeler boyunca açık ortamda işletilmeleri nedeniyle yıldırım, rüzgâr, buz yükü ve dış etkenlere karşı hassas olan bu hatların korunmasında hızlı, seçici ve güvenilir koruma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Klasik güç sistemlerinde bu gereksinimleri karşılayan temel koruma yaklaşımlarından biri mesafe korumasıdır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013; Saygılı & Tezcan, 2019). Mesafe koruması, arıza noktasının koruma rölesine olan elektriksel uzaklığını, başka bir ifadeyle hat empedansını esas alan bir yöntemdir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek ve çok yüksek gerilim seviyelerinde çalışan iletim hatlarında yaygın olarak uygulanmaktadır (Yıldız, 2022).

6.1. Mesafe Korumasının Çalışma Prensibi

Mesafe röleleri, arıza anında ölçülen gerilim ve akım değerlerinden hat empedansını hesaplamakta ve bu değeri önceden tanımlanmış eşiklerle karşılaştırmaktadır. Ölçülen empedans değeri, ayarlanan koruma bölgesinin sınırları içerisine düştüğünde röle açma komutu üretmektedir. Hat empedansının uzunlukla doğru orantılı olması, arıza yerinin mesafe röleleri tarafından güvenilir biçimde belirlenmesini mümkün kılmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013). Bu yöntemin temel avantajı, arıza akımının büyüklüğünden ziyade arıza konumuna dayalı bir karar mekanizması sunmasıdır. Bu sayede mesafe koruması, değişken işletme koşulları altında dahi seçiciliğini büyük ölçüde koruyabilmektedir (Saygılı & Tezcan, 2019).

6.2. R–X Düzleminde Mesafe Rölesi Karakteristikleri

Mesafe rölelerinin çalışma davranışı, çoğunlukla R–X empedans düzlemi üzerinde tanımlanan karakteristikler yardımıyla açıklanmaktadır. Bu düzlemde yatay eksen direnç (R), düşey eksen ise reaktans (X) bileşenini temsil etmektedir. Arıza sırasında ölçülen empedans noktası, röle karakteristiğinin içine düştüğünde röle çalışmaktadır (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Klasik mesafe rölelerinde yaygın olarak kullanılan başlıca karakteristik tipleri şunlardır: Empedans (dairesel) karakteristiği,Reaktans karakteristiği, Mho (admitans) karakteristiği.

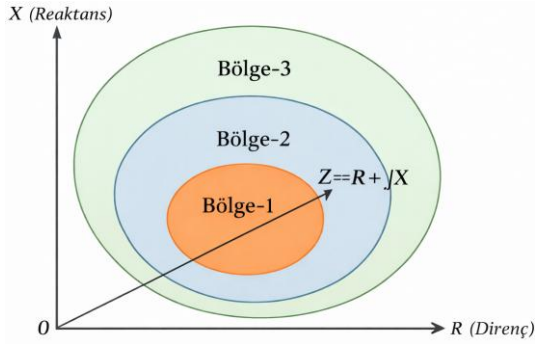
Empedans karakteristiği, basit yapısı nedeniyle tercih edilirken; mho karakteristiği yönlü yapısı sayesinde özellikle iletim hatlarında daha kararlı bir performans sunmaktadır. Reaktans karakteristiği ise ark direncinden daha az etkilenmesi nedeniyle belirli uygulamalarda avantaj sağlamaktadır (Yıldız, 2022).

6.3. Mesafe Korumasında Koruma Bölgeleri

Klasik iletim sistemlerinde mesafe röleleri, arıza yerinin röleye olan elektriksel uzaklığının güvenilir ve seçici biçimde belirlenebilmesi amacıyla birden fazla koruma bölgesi tanımlanarak çalıştırılmaktadır. Bu koruma bölgeleri, hem arızaların hızlı bir şekilde temizlenmesini hem de yedekliliğin sağlanmasını temin edecek şekilde kademeli olarak ayarlanmaktadır. Şekil 5'te, mesafe koruma rölesine ait koruma bölgelerinin R–X empedans düzlemi üzerindeki karakteristik gösterimi verilmiştir.

Bu kapsamda, Bölge-1, korunan hattın yaklaşık %80–90'ını kapsayacak şekilde ayarlanmakta ve zamansız (anlık) açma yaparak primer ve en hızlı koruma işlevini üstlenmektedir. Bölge-2, hattın tamamını ve komşu hattın bir kısmını kapsayan zaman gecikmeli bir yedek koruma bölgesi olarak görev yapmakta ve Bölge-1'in çalışmadığı durumlarda devreye girmektedir. Bölge-3 ise daha geniş bir alanı kapsayan uzak yedek koruma bölgesi olup, en uzun gecikme süresiyle çalışarak sistem genelinde yedeklilik sağlamaktadır.

Bu çok bölgeli yapı sayesinde, birincil koruma elemanının herhangi bir nedenle çalışmaması durumunda, yedek koruma bölgeleri sırasıyla devreye girerek arızanın güvenli biçimde temizlenmesi sağlanmakta ve sistem güvenliği korunmaktadır (Saygılı & Tezcan, 2019; Yıldız, 2022).



Şekil 5. Mesafe koruma rölesinde R–X empedans düzleminde tanımlanan koruma bölgeleri

6.4. Yönlü Mesafe Röleleri

Klasik enterkonnekte güç sistemlerinde, arıza akımları birden fazla kaynaktan beslenebilmektedir. Bu durum, mesafe rölelerinin yalnızca empedans büyüklüğüne değil; aynı zamanda arıza yönüne de duyarlı olmasını gerektirmektedir. Yönlü mesafe röleleri, ileri (forward) yönde meydana gelen arızalar için çalışırken, geri yöndeki arızalar için bloke olacak şekilde tasarlanmaktadır (Yeroğlu & Akdağ, 2022). Yönlü mesafe koruması, özellikle paralel hatların bulunduğu iletim sistemlerinde ve karmaşık topolojilere sahip enterkonnekte yapılarda yanlış açmaların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu rölelerin doğru çalışabilmesi için hat empedans parametrelerinin ve gerilim referanslarının doğru biçimde belirlenmesi gerekmektedir (Yıldız, 2022).

6.5. Mesafe Korumasının Avantajları ve Sınırlamaları

Mesafe korumasının başlıca avantajları arasında yüksek hız, seçicilik ve uzun mesafelerde güvenilir çalışma yeteneği yer almaktadır. Bu özellikler, mesafe rölelerini klasik iletim sistemlerinde vazgeçilmez bir koruma elemanı hâline getirmektedir (Gençaydın & Tanrıöven, 2013).

Bununla birlikte ark direnci, ölçü transformatörü hataları ve yük akımı etkileri, ölçülen empedans değerinde sapmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle mesafe rölelerinin ayarları yapılırken, işletme koşulları ve sistem parametreleri dikkatle değerlendirilmelidir (Rajalwal & Ghosh, 2020).

7. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Elektrik güç sistemlerinin güvenli, kararlı ve süreklilik arz edecek şekilde işletilebilmesi, etkin bir koruma sisteminin varlığına doğrudan bağlıdır. Klasik güç sistemleri; merkezi üretim yapıları, yüksek kısa devre akımları ve büyük ölçekli iletim–dağıtım altyapıları nedeniyle arızalara karşı hassas bir işletme ortamı sunmaktadır. Bu nedenle koruma sistemleri, yalnızca arıza anında devreye giren bir güvenlik unsuru değil; aynı zamanda sistemin bütünsel işletme güvenilirliğini belirleyen temel bir mühendislik bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Bu kitap bölümünde, elektrik güç sistemlerinde koruma konusu klasik şebekeler çerçevesinde ele alınmış; koruma felsefesinin dayandığı temel ilkeler, arıza türleri ve bu arızalara karşı geliştirilen başlıca koruma yaklaşımları bütüncül bir bakış açısıyla incelenmiştir. Öncelikle klasik şebekelerde koruma yaklaşımlarının temel dayanakları açıklanmış; ardından kısa devre ve aşırı yük arızalarının sistem üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Devamında, koruma sistemini oluşturan ekipmanlar ve bu ekipmanların birbirleriyle olan etkileşimi ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Aşırı akım ve yönlü aşırı akım koruması, klasik güç sistemlerinde basitlik, ekonomi ve uygulama kolaylığı açısından en yaygın kullanılan koruma yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Röle koordinasyonu ve zaman–akım karakteristiklerine dayalı seçicilik yaklaşımı, özellikle dağıtım ve alt iletim seviyelerinde uzun yıllardır başarıyla uygulanmaktadır. Ring ve enterkonnekte yapılarda ise yönlü aşırı akım koruması, seçiciliğin korunmasında tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Diferansiyel koruma, iç arızalara karşı sağladığı yüksek hız ve mutlak seçicilik özellikleri sayesinde transformatörler, jeneratörler ve baralar gibi kritik ekipmanların korunmasında vazgeçilmez bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Mesafe koruması ise iletim hatlarında arıza yerinin empedans temelli olarak belirlenmesine olanak tanıyarak, çok bölgeli yapısı sayesinde hem hızlı hem de yedekli bir koruma sağlamaktadır. Bu yöntemlerin her biri, klasik güç sistemlerinin karakteristik özelliklerine uygun çözümler sunmaktadır.

Klasik güç sistemlerinde koruma yaklaşımlarının en önemli avantajlarından biri, sistem davranışının büyük ölçüde öngörülebilir olmasıdır. Yüksek ve belirgin kısa devre akımları, deterministik koruma algoritmalarının güvenilir biçimde uygulanmasını mümkün kılmakta; röle ayarlarının uzun süre geçerliliğini korumasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, enterkonnekte yapıların yaygınlaşması ve işletme koşullarının çeşitlenmesi, koruma sistemlerinin tasarımında daha dikkatli koordinasyon ve değerlendirme gereksinimini beraberinde getirmektedir.

Sonuç olarak, klasik elektrik güç sistemlerinde koruma; seçicilik, hız, güvenilirlik ve ekonomi ilkeleri doğrultusunda şekillenmiş, uzun yıllar boyunca uygulamada başarısı kanıtlanmış yöntemler bütünüdür. Bu kitap bölümünde sunulan teorik altyapı ve uygulama yaklaşımları, güç sistemlerinde koruma alanında çalışan mühendisler, araştırmacılar ve lisansüstü öğrenciler için temel bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır. Ayrıca bu kapsam, ilerleyen çalışmalarda farklı şebeke yapıları ve yeni nesil koruma yaklaşımlarının değerlendirilmesine yönelik karşılaştırmalı analizler için sağlam bir referans zemini oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Alamshah, A., Ramli, S. P., Mansor, N. N., Usama, M., Mokhlis, H., Suyono, H., & Hasanah, R. N. (2024). Recent developments of directional overcurrent relay coordination in ring distribution network based on hybrid optimization techniques. *IEEE Access.*

Gençaydın, E., & Tanrıöven, M. (2013). Yüksek gerilim iletim sistemlerinde koruma sistemleri için güvenilirlik değerlendirmesi üzerine bir derleme. *Sigma, 5*, 86–102.

Gupta, S., & Deep, K. (2020). Optimal coordination of overcurrent relays using improved leadership-based grey wolf optimizer. *Arabian Journal for Science and Engineering, 45*(3), 2081–2091. https://doi.org/10.1007/s13369-019-04025-z

Kılıçkıran, H. C., Şengör, İ., Akdemir, H., Kekezoğlu, B., Erdinç, O., & Paterakis, N. G. (2018). Power system protection with digital overcurrent relays: A review of non-standard characteristics. *Electric Power Systems Research, 164*, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.013

Nuroğlu, F. M., & Arsoy, A. B. (2015) Central coordination relay for distribution systems with distributed generation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, *23*.

Oğuz, E., Ateş, Y., & Hekimoğlu, M. (2019). Yeni nesil elektrik dağıtım şebekeleri için çok fonksiyonlu dijital aşırı akım rölesi tasarımı ve geliştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 915–924.

Özgüner, Ö., & Seyyarer, E. (2023). Aşırı akım röle optimizasyonunda optimizasyon algoritmalarının karşılaştırmalı analizi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi, 12*(4), 25–32.

Rajalwal, N. K., & Ghosh, D. (2020). Recent trends in integrity protection of power system: A literature review. *International Transactions on Electrical Energy Systems, 30*(10), e12523. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12523

Saygılı, M., & Tezcan, S. (2019). Protection modelling and analysis of energy transmission lines and implementation for Ankara region. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 303–316.

Yeroğlu, C., & Akdağ, O. (2022). Yönlü aşırı akım röleleri koordinasyon problemi için arıza akımı sınırlama mekanizmalı adaptif koruma yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37*(4), 1751–1766. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.739949

Yıldız, A. (2022). *Elektrik güç sistemlerinde aşırı akım rölelerinin koordinasyonu ve optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.

Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye'nin Büyükbaş Atık Kaynaklı Biyogaz ve Yeşil Hidrojen Potansiyelinin Hesabı

Veli Gökhan DEMİR

1- Dr. Öğretim Üyesi; Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. veligokhandemir@balikesir.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5667-1909

ÖZET

Artan küresel çaptaki çevresel kaygılar ve enerji arzındaki belirsizlikler, fosil yakıtların bir an önce terk edilip yenilenebilir enerjiye geçişi zorunlu kılmaktadır. Güneş, rüzgar ve biyokütle bakımından zengin kaynaklara sahip Türkiye, enerjide dışa bağımlılığın azaltılması ve 2053 net-sıfır hedefi için yenilenebilir enerji üretimini her yıl artırmaya devam etmektedir. Tarım ve hayvancılıkta büyük bir potansiyele sahip Türkiye için tarım ve gübre atıklarından üretilebilen biyogaz, çevresel kirliliğin önlenmesi ve yerel enerji üretimi bakımından büyük öneme sahiptir. Bunun yanında üretilen biyogazın yeşil hidrojene (H_2) dönüştürülmesiyle çok daha çevre dostu ve stratejik bir enerji kaynağı elde edilebilmektedir. Yeşil H_2'nin güneş ve rüzgar gibi kesintili elektrik üretim sistemlerinde sağladığı şebeke esnekliği ve mevsimsel enerji depolama özelliği, enerji yoğun sektörlerde dekarbonizasyon imkanı ve hem konvansiyonel enerji sistemlerinde hem de yüksek teknolojinin kullanıldığı modern sektörlerde (uzay vb.) kullanılabilirliği, bu enerji kaynağının kısa ve uzun vadeli sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde kilit rol oynayacağını göstermektedir. Bu kapsamda hazırlanan çalışmada, güncel istatistiksel veriler kullanılarak Bigadiç ilçesi, Balıkesir ili ve Türkiye ölçeğinde büyükbaş hayvan gübrelerinin anaerobik çürütme süreciyle oluşturacağı biyogaz miktarları teorik kütle-enerji denklikleri üzerinden bulunmuştur. Elde edilen verilerden, dönüşüm verimleri dikkate alınarak yeşil H_2 üretim potansiyelleri nicel olarak hesaplanmış ve bölgelerin yenilenebilir enerji arzına olası katkıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; Türkiye genelindeki büyükbaş atıklarından yıllık 23 TWh teknik yeşil H_2 enerjisi üretilebileceği; ulusal kapasitenin %3,4'ünü barındıran Balıkesir'e bağlı Bigadiç ilçesinin yıllık 120 646 MWh yeşil H_2 üretim potansiyeline sahip olduğu ve bu kapasitenin yakıt pilleriyle elektriğe dönüştürülmesi durumunda ilçenin yıllık evsel elektrik ihtiyacının tamamının karşılanabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Yenilenebilir enerji, Büyükbaş atık, Biyogaz, Yeşil hidrojen

GİRİŞ

Modern üretim süreçlerinin artan enerji talebi, ağırlıklı olarak fosil kökenli yakıtlara dayansa da bu kaynakların sınırlı rezerv ömrü ve ithalat bağımlılığı yaratan dengesiz dağılımı, mevcut enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir (Özman & Karadaş, 2023). Fosil yakıt kaynaklı problemlerin diğer bir yönü ise yanma sonunda üretilen sera gazlarının küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmasıdır (Soeder 2020; Yıldız ve ark, 2020). Bunun dışında fosil yakıtların neden olduğu asit yağmurları ve bölgesel kirlilik gibi küresel iklim sorunları, ekolojik dengenin bozulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çevresel tahribatın boyutlarının

anlaşılması, enerji politikalarında temiz ve yenilenebilir kaynakların daha fazla desteklenmesini zorunlu kılmıştır. Enerji arzında yüksek oranda dışa bağımlı olan Türkiye için yerli ve yenilenebilir kaynakların kullanımı stratejik bir zorunluluktur. Ülkenin hidrolik, güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle gibi zengin potansiyeline rağmen, mevcut enerji karmasında hidrolik dışındaki yenilenebilir kaynakların payı henüz istenen seviyede değildir. Ancak, son yıllarda gerek enerji arz güvenliğini sağlama, gerekse AB üyelik süreci kapsamındaki çevresel standartları yakalama hedefiyle (2053 Net Sıfır Hedefi), yenilenebilir kaynaklara yönelik yatırımlar ivme kazanmıştır (Öymen, 2020).

Yenilenebilir enerji çeşitleri arasında önemli bir yere sahip olan biyogaz; başta hayvansal gübreler olmak üzere, enerji bitkileri ve çeşitli organik atıkların anaerobik koşullarda mikrobiyal fermantasyonu (biyolojik bozunumu) yoluyla elde edilmektedir (Deviren, 2017). Fiziksel olarak renksiz, kokusuz ve havadan hafif bir yapıya sahip olan biyogaz, parlak mavi bir alevle yanma karakteristiği gösterir. Biyogaz, baskın olarak %54-80 oranında metan (CH_4) ve %20-46 oranında karbondioksit (CO_2) içerir; bunun yanında %0-2 oranında hidrojen sülfür (H_2S) ile eser miktarda azot (N_2) ve hidrojen (H_2) ihtiva eder (Hesar, 2021). Ayrıca, biyogaz üretimi sırasında oluşan katı ve sıvı organik atıklar, tarımda gübre olarak kullanılarak toprağın verimliliğini yükseltmektedir. Anaerobik fermantasyonun başlıca üstünlüklerinden biri de bu süreçte patojen mikroorganizmaların büyük ölçüde yok edilmesidir (Nkoa, 2014; Sahlstrom, 2003). Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Altıncı Değerlendirme Raporu'na göre, CH_4 gazının küresel ısınma potansiyeli, CO_2'e kıyasla 27 kat daha yüksektir. Bu bağlamda, hayvansal, bitkisel ve endüstriyel atıkların biyogaz üretiminde değerlendirilmesi, yalnızca ekonomik katma değer ve etkili bir atık yönetimi sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir önem teşkil etmektedir (Yaşar ve Güngörmüş, 2025).

Biyogazın konvansiyonel enerji sistemlerinde yenilenebilir CH_4 şeklinde kullanılması birçok avantaj sağlasa da biyogazın dönüştürülerek H_2 (Yeşil H_2) olarak kullanılması, karbon yakalama ve depolama teknolojileri ile entegre edildiğinde 'karbon-negatif' bir enerji kullanımını da mümkün kılar (Wang ve ark, 2025). Hidrojen enerjisi üretim kaynaklarına göre yeşil, mavi, gri ve kahverengi (siyah) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada; yenilenebilir enerjiden elde edilen Yeşil H_2 en temiz kaynak olarak nitelendirilirken, doğalgaz tabanlı Mavi H_2 düşük karbonlu bir alternatif sunmaktadır. Ancak, günümüzdeki H_2 üretiminin büyük çoğunluğu, yüksek karbon emisyonuna neden olan Gri (doğalgaz) ve Kahverengi (kömür) H_2 gibi fosil yakıt kaynaklı yöntemlere dayanmaktadır (Gençer, 2021). Yeşil H_2; elektrifikasyonun teknik veya ekonomik açıdan sınırlı kaldığı ağır sanayi ve uzun menzilli ulaşım gibi emisyon azaltımı zor sektörlerde dekarbonizasyonu sağlaması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili arzına karşı şebeke dengesini sağlayan büyük ölçekli ve mevsimsel bir enerji depolama ortamı

sunması, elektrik ve gaz şebekeleri arasında köprü kurarak sektörel entegrasyonu gerçekleştirmesi ve yerel üretim potansiyeli sayesinde dışa bağımlılığı azaltarak enerji arz güvenliğini teminat altına alması nedenleriyle, geleceğin yenilenebilir enerji sistemine geçişte vazgeçilmez ve stratejik bir rol üstleneceği öngörülmektedir (Oliveira vd., 2021; El-Emam ve Özcan, 2019).

Türkiye, TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" kapsamında 2030'a kadar 2 GW, 2035'e kadar 5 GW, 2053'e kadar ise 70 GW H_2 üretim kapasitesine hedefi belirlemiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023). Bu çalışmada, büyükbaş hayvan varlığı esas alınarak Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye genelindeki biyogaz ve yeşil H_2 üretim potansiyeli hesaplanmış, bölgesel ve ulusal ölçekte değerlendirmeler yapılmıştır.

BİGADİÇ, BALIKESİR VE TÜRKİYE'NİN BİYOGAZ ve YEŞİL HİDROJEN POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Potansiyel Biyogaz Enerjisi Hesabı

Büyükbaş hayvanlardan kaynaklanabilecek yaş gübre miktarı (YG) ile bu gübreden anaerobik çürütme prosesiyle üretilebilecek biyogaz enerji potansiyelinin (ME) belirlenmesinde; birim hayvan başına gübre üretim miktarı, gübrenin kuru madde içeriği, uçucu kuru madde oranı, metan üretim kapasitesine ilişkin parametreler ve oluşan gübrenin kullanılabilirlik durumu dikkate alınmış olup, hesaplamalar Ekinci ve ark. (2010) tarafından önerilen yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre:

YG - Yaş gübre miktarı (kg/yıl) hesabı:

$$\mathrm{YG} = \mathrm{HS} \times \mathrm{MYG} \times 365 \quad (1)$$

Burada:

HS: Büyükbaş Sayısı (adet)

MYG: Büyükbaş Başına Ortalama Günlük Gübre Üretimi (kg/gün-hayvan)

ME - Elde edilebilir metan gazının (net CH_4) enerji değeri hesabı:

$$\mathrm{ME} = YG \times KM \times UKM \times MO \times Kullanım\ Yüzdesi \quad (2)$$

Burada:

YG: Yaş Gübre Miktarı (kg/yıl)

KM: Katı Madde Oranı (%)

UKM: Uçucu Kuru Madde Oranı (%)

MO: Hammadde özgül metan üretim oranı (m^3 CH_4/kg UKM)

Tablo 1. Biyogaz üretiminde kullanılan ve hayvan cinsine göre değişen ortalama gübre miktarı ve özellikleri (Ekinci et al., 2010).

Hayvan Cinsi	Birim hayvan başına gübre üretimi (kg/hayvan-gün)	Kuru Madde (KM) (%)	Hammadde özgül metan üretim oranı (m^3CH_4/kg UKM)	Uçucu Kuru Madde (UKM) (%)	Gübrenin Kullanılabilirlik Oranı (%)
Et Sığırı	29,00	14,66	0,33	84,65	50
Süt Sığırı	43,00	13,95	0,18	83,36	50

Potansiyel Hidrojen Enerjisi Hesabı

Gübreden elde edilen ham biyogazın, yüksek enerji yoğunluğuna sahip saf yeşil hidrojene (H_2) dönüştürülmesinde; teknolojik olgunluk seviyesi (TRL), maliyet etkinliği ve yüksek H_2 verimi nedeniyle Buhar Metan Reformlama (Steam Methane Reforming - SMR) yöntemi yaygın kullanılan bir yöntemdir (Noussan ve ark., 2022; Morgado ve ark. 2023). Bu termokimyasal proseste, biyogaz içerisindeki metan (CH_4), yüksek sıcaklık (700-1000°C) ve nikel bazlı katalizörler varlığında su buharı ile endotermik reaksiyona sokularak hidrojence zengin sentez gazına dönüştürülmektedir. İdeal şartlarda 1 mol CH_4, 4 mol H_2 üretir. Ancak sistem verimi (η) de hesaba katılmalıdır. Buna göre;

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (3)$$

Teknik Hidrojen hacmi (V_{H2}) hesabı:

$$V_{H2} = V_{CH4} \times 4 \times \eta_{SMR} \quad (4)$$

Burada:

4: Stokiyometrik katsayı (1 birim – mol- CH_4 için 4 birim H_2),

η_{SMR}: Reformlama sistem verimi. endüstriyel tesisler için %70 - %85 aralığında değişmektedir (Dincer ve Acar, 2015). Çalışmamızda, yaşanabilecek azami kayıplar göz önünde bulundurularak bu değer %70 (0,7) olarak kullanılmıştır.

H_2'den elde edilecek toplam enerji hesabı için H_2'nin alt ısıl değeri kullanılır.

$$E_{H2}\,(MJ) = V_{H2}\,(m^3) \times LHV_{H2} \quad (5)$$

Burada:

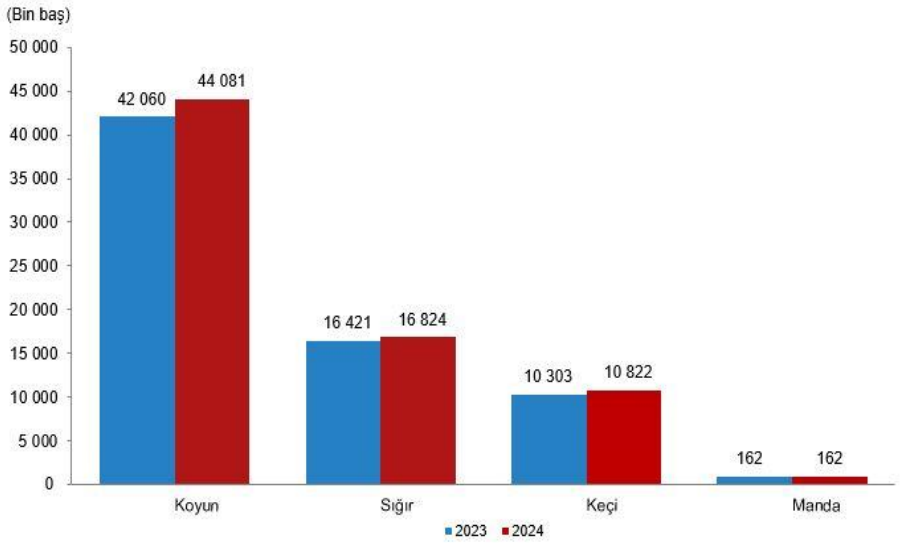
LHV_{H2}: H_2'nin alt ısıl değeri (≈10,8 MJ/m^3 veya 3 kWh/ m^3)

Canlı Büyükbaş Sayısının Belirlenmesi

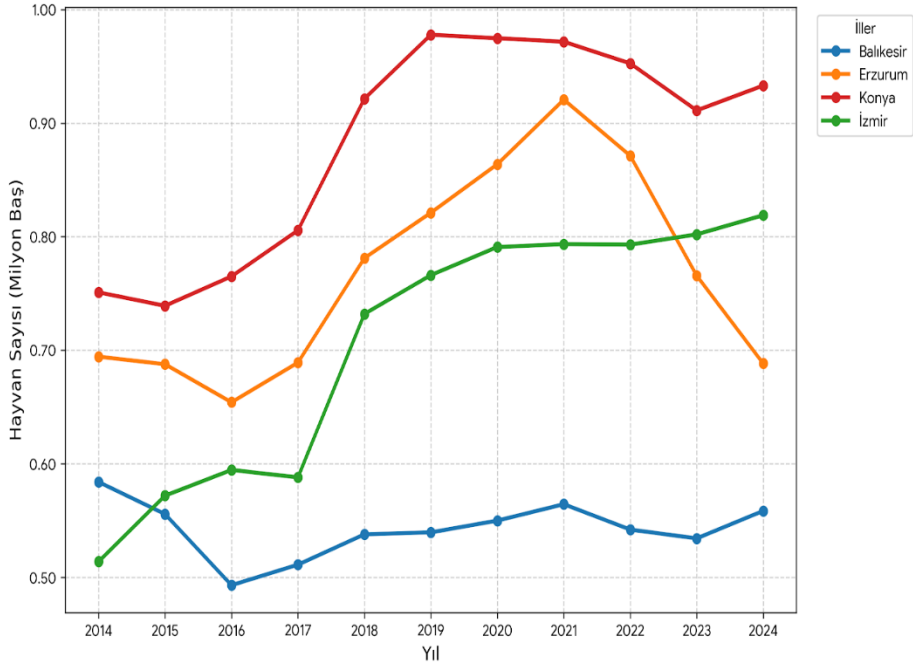
Bir bölgeye ait büyükbaş hayvan gübresi kaynaklı potansiyel biyogaz enerjisinin hesabı için o bölgenin sahip olduğu güncel hayvan sayısının belirlenmesi gerekir.

Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye genelinde sahip olunan potansiyel biyogaz enerjisi için TUİK Canlı Hayvan Sayısı (Baş) İstatistikleri (TUİK, 2024) kullanılmıştır. TÜİK (2024) verileri incelendiğinde, Türkiye'nin son 10 yıllık döneminde en yüksek büyükbaş hayvan sayısına (18,61 milyon baş) ulaşıldığı yılın 2020 yılı olduğu (kapasite artış dönemi), 2020 sonrası ise sektörde daralmanın başladığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında, 2024 yılında Türkiye genelindeki sığır sayısı bir önceki yıla göre %2,5 artarak 16 milyon 824 bin başa, manda sayısı ise bir önceki yıla göre %0,2 artarak 162 bin 51 başa; toplam sayı (büyükbaş hayvan sayısı) ise 16 milyon 986 bin 259 başa ulaşmıştır.

İller bazında büyükbaş hayvan sayısı verileri incelendiğince ise birinci sıradaki ilin 944 bin 838 baş ile Konya, ikinci sıradaki ilin 883 bin 647 baş ile İzmir, üçüncü sıradaki ilin 709 bin 861 baş ile Erzurum olduğu, Balıkesir'in ise 575 bin 562 baş ile en fazla büyükbaş hayvanın yetiştirildiği yedinci il olduğu görülmektedir. Bu illerin 2014-2024 yılları arasındaki hayvan sayısı Şekil 2'de verilmiştir. Türkiye'nin büyükbaş hayvancılık envanterinin önemli bir kısmını barındıran Konya, İzmir, Erzurum ve Balıkesir illerinin 2023-2024 dönemi büyükbaş hayvan sayısında en büyük artış %4,53 ile Balıkesir ilinde, %2,40 ile Konya'da ve %2,10 ile İzmir'de yaşanmıştır. En büyük üçüncü büyükbaş hayvan sayısına sahip Erzurum ise bu dönemde %10,10 gibi dikkate değer bir oranda düşüş sergilemiştir. Balıkesir'de son 5 yılda yakalanan istikrarlı büyüme oranı ve son yılda elde edilen %4,5'luk önemli artış, Balıkesir'in mevcut kapasitesini koruma ve nitelikli üretim odaklı bir hayvancılık üretimi gerçekleştirdiğine işaret etmektedir. Bu sürecin devamı ile önümüzdeki yıllarda Balıkesir ilinde büyükbaş sayısında artışın devam edeceği söylenebilir.



Şekil 1. Türkiye'de 2023-2024 yıllarına ait hayvan sayıları (TUİK, 2024).



Şekil 2. Konya, İzmir, Erzurum ve Balıkesir'in yıllara bağlı büyükbaş hayvan sayısındaki değişim (TUİK, 2024).

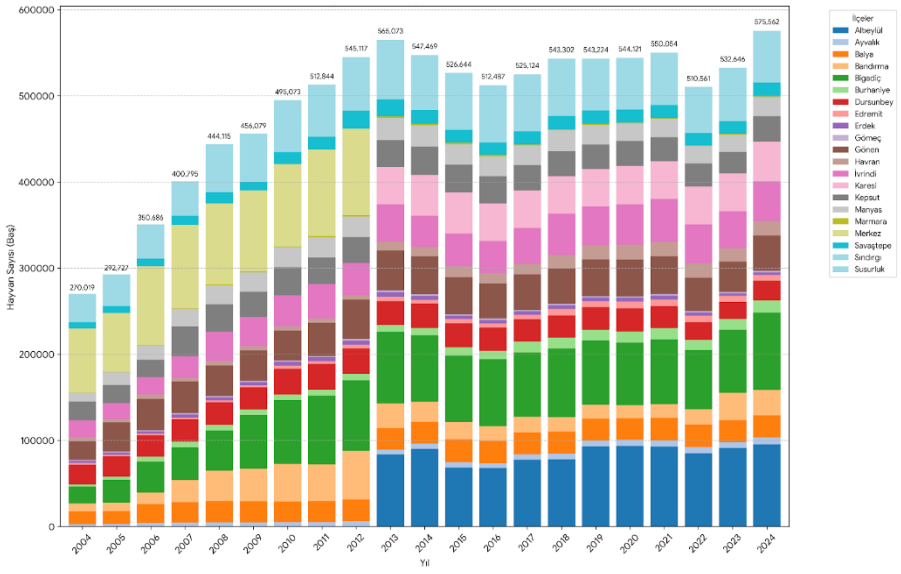
Balıkesir ili, tüm ilçeleri dahil edildiğinde yaklaşık 576 bin baş büyükbaş hayvan varlığı ile Türkiye genelinde büyükbaş hayvan sayısı açısından ilk yedi il arasında yer almakta; ayrıca yüksek verimli sığır kültür ırkı hayvan sayısı bakımından Türkiye'de üçüncü sırada bulunmaktadır. Şekil 3'te sunulduğu üzere, Balıkesir ilinde merkez ilçeler (Altıeylül ve Karesi) hariç tutulduğunda Bigadiç, 89 bin 554 baş ile tüm ilçeler içerisinde en fazla büyükbaş hayvan sayısına sahip ilçe konumundadır. Bu sayı, Yalova, Rize, Tunceli gibi Türkiye'deki birçok ilin toplam büyükbaş varlığından daha yüksektir. Bigadiç'in 2004 – 2024 yılları arasındaki toplam büyükbaş hayvan sayısına bakıldığında, 2014-2019 aralığında 20– 30 bin baş bandında dalgalı ancak yatay bir seyir izlediği, ancak 2020 yılına gelindiğinde bir önceki yıla kıyasla üç kattan fazla bir artışla bu sayının 72 bin seviyelerine yükseldiği, 2023'e kadar büyüme trendinin devam ettiği, son yılda ise dramatik bir büyüme ile 89 bin 554 sayısına ulaştığı anlaşılmaktadır. Son dönemde gerçekleşen bu büyüme Türkiye ve Balıkesir ortalamasının oldukça üzerindedir.

2024 yılı Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye geneli toplam canlı büyükbaş hayvan sayısı Tablo 2'de verilmiştir. Bu verilere ilave olarak şunu da belirtmek gerekir ki Bigadiç'teki büyükbaş hayvanların yarısından fazlasının (45 012 baş) yetişkin süt sığırı olması, bölgenin yoğun süt üretim karakterini göstermektedir. Biyogaz üretimi açısından bu durum, süt sığırlarının gübre

veriminin (43 kg/gün) et sığırlarına (29 kg/gün) göre daha yüksek olduğu göz önüne alındığında, Bigadiç'in teknik olarak çok yüksek bir enerji potansiyeline sahip olduğuna işarettir.

Tablo 2. Türkiye geneli canlı büyükbaş hayvan sayısı.

	Sayı (Baş)		
Hayvan Türü	Bigadiç	Balıkesir	Türkiye
Et Sığırları (Erkek Sığırlar ve Erkek Mandalar > 1 yaş)	23 633	74 825	2.968.220
Süt Sığırları (Dişi Sığırlar ve Dişi Mandalar > 1 yaş)	45 012	329 312	9.889.483
1 Yaş Altı Et Sığırları (Yavru)	11 055	89 987	2.079.291
1 Yaş Altı Süt Sığırları (Yavru)	9 854	81 438	2.049.265

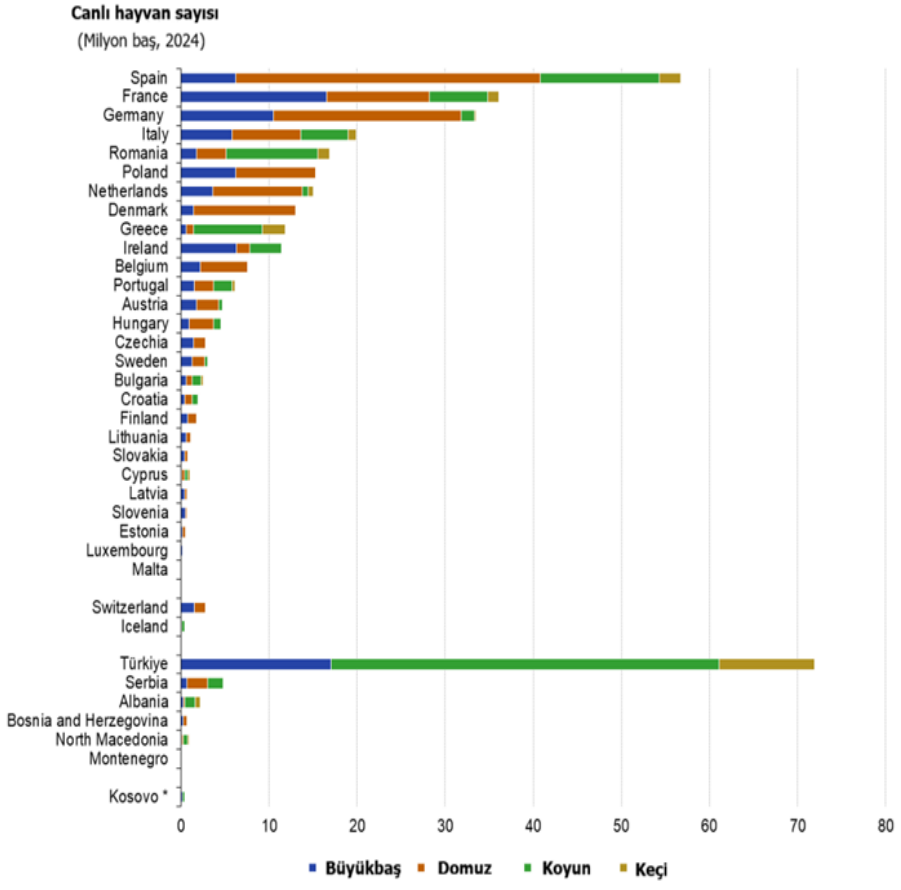


Şekil 3. Balıkesir ilinin ilçeleriyle birlikte toplam büyükbaş hayvan sayısının yıllara göre değişimi (TUİK, 2024).

Eurostat (Avrupa İstatistik Ofisi) tarafından yayınlanan 2024 canlı hayvan sayısı verilerinden oluşturulan grafik Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre 2024 yılının sonunda AB'de 132 milyon domuz, 72 milyon büyükbaş hayvan

ve 67 milyon koyun ve keçi mevcuttur (Eurostat, 2024). TUİK ve Eurostat verileri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, 2024 yılı sonu itibariyle Türkiye, büyükbaş (sığır) envanteri bakımından Avrupa Birliği (AB-27) ülkeleri arasında en üst sıradadır. Büyükbaş hayvan popülasyonunda uzun yıllardır lider olan Fransa 16.4 milyon ile ikinci, 10,4 milyon ile Almanya ise üçüncü büyük AB hayvan üreticisi ülke durumdadır. Küresel ölçekte ise Brezilya (~234 milyon), Hindistan (~193 milyon) ve ABD (~92 milyon) büyükbaş sayısı ile en büyük sığı yetiştiricisi ülkelerdir (USDAa, 2024a; USDAb, 2024).

Türkiye et ve süt üretimi potansiyeli bakımından dünya genelinde önemli bir konumda, hayvan başına verimlilikte (et/süt verimi) ise Avrupa ortalamalarının gerisinde kalmaktadır. Bununla birlikte toplam hayvan sayısı (biyokütle kaynağı) bakımından üst sıralardadır. Bu durum, Türkiye'nin hayvansal atık kaynaklı yenilenebilir enerji potansiyelinin teorik olarak Dünya ortalamasının ve Avrupa'daki rakiplerinden (Almanya, Fransa) daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Avrupa ülkeleri karşılaştırmalı canlı hayvancılık popülasyonları.

BULGULAR

Gübre miktarı hesaplamalarında 1 yaş altı büyükbaş hayvan grubunun günlük gübre üretimi; grubun yıl içindeki canlı ağırlık artışı ve ortalama kütlesi (~200-250 kg) dikkate alınarak ve ASABE D384.2 standartlarındaki 'Genç Sığır/Düve' verilerine dayanarak 20 kg/baş/gün olarak kabul edilmiştir (ASABE, 2014). Buna göre Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye'ye ait potansiyel gübre, biyogaz ve H_2 üretim miktarları aşağıdaki gibi ayrı ayrı hesaplanmış; elde edilen tüm veriler Tablo 3'te sunulmuştur:

Bigadiç:
Hayvan varlığının yıllık ürettiği toplam yaş gübre kütlesi:

YG = Hayvan sayısı × Günlük gübre miktarı × 365:

- Süt Sığırı: 45 012 × 43 × 365 = 706 463 340 kg
- Et Sığırı: 23 633 × 29 × 365 = 250 155 305 kg
- Yavru: 20 909 × 20 × 365 = 152 635 700 kg
- Toplam gübre miktarı: 1 109 254 kg

Yıllık üretilen biyogaz (net CH_4) ve enerji miktarı:

ME = 1 109 254(YG) × 0,13(KM) × 0,83(UKM) × 0,24(MO) × 0,5 (KY)

- ME: 14 362 625 m^3
- ME Enerji Değeri (LHV: 9,94 kWh/m^3) için: 142 764 MWh

Yıllık üretilen H_2 ve enerji miktarı:

V_{H2} = 14 362 625 (V_{CH4}) × 4 (Katsayı) × 0,7 (η_{SMR})

- V_{H2}: 40 215 350 m^3
- H_2 Enerji Değeri (LHV: 10,8 kWh/m^3) için: 120 646 MWh

Balıkesir:
Hayvan varlığının yıllık ürettiği toplam yaş gübre kütlesi:

YG = Hayvan sayısı × Günlük gübre miktarı × 365:

- Süt Sığırı: 329 312 × 43 × 365 = 5 168 551 840 kg
- Et Sığırı: 74 825 × × 29 × 365 = 792 022 625 kg
- Yavru: 171 425 × 20 × 365 = 1 251 402 500 kg
- Toplam gübre miktarı: 7 211 976 965 kg

Yıllık üretilen biyogaz (net CH_4) ve enerji miktarı:

ME = 7211976965(YG)×0,13(KM)×0,83(UKM)×0,24(MO)×0,5 (KY)

- ME: 93 380 678 m^3
- ME Enerji Değeri (LHV: 9,94 kWh/m^3) için: 928 204 MWh

Yıllık üretilen H_2 ve enerji miktarı:

V_{H2} = 93 380 678 (V_{CH4}) × 4 (Katsayı) × 0,7 (η_{SMR})

- V_{H2}: 261 465 898 m^3

- H_2 Enerji Değeri (LHV: 10,8 kWh/m^3) için: 784 398 MWh

Türkiye:
Hayvan varlığının yıllık ürettiği toplam yaş gübre kütlesi:

YG = Hayvan sayısı × Günlük gübre miktarı × 365:

- Süt Sığırı: 9 667 797 × 43 × 365 = 151 736 073 915 kg
- Besi Sığırı: 2 855 157 × 29 × 365 = 30 221 836 845 kg
- Yavru: 4 031 728 × 20 × 365 = 29 431 614 400 kg
- Toplam gübre miktarı: 211 389 525 160 kg

Yıllık üretilen biyogaz (net CH_4) ve enerji miktarı:

ME = 211389525160 (YG)×0,13(KM)×0,83(UKM)×0,24(MO)×0,5 (KY)

- ME: 2 737 071 572 m^3
- ME Enerji Değeri (LHV: 9,94 kWh/m^3) için: 27 206 491 MWh

Yıllık üretilen H_2 ve enerji miktarı:

V_{H2} = 2 737 071 572 (V_{CH4}) × 4 (Katsayı) × 0,7 (η_{SMR})

- V_{H2}: 7 663 800 401 m^3
- H_2 Enerji Değeri (LHV: 10,8 kWh/m^3) için: 22 991 401 MWh

Tablo 3. Bigadiç, Balıkesir ve Türkiye'ye ait potansiyel gübre, biyogaz ve hidrojen üretim miktarları.

	Hayvan Varlığı (Baş)	Toplam Gübre (Ton/Yıl)	Net CH_4 Hacmi (m^3/Yıl)	Net CH_4 Enerjisi (MWh/Yıl)	Net H_2 Hacmi (m^3/Yıl)	Net H_2 Enerjisi (MWh/Yıl)
Bigadiç	89554	1109254	14362625	142764	40215351	120646
Balıkesir	575562	7211977	93380678	928204	261465898	784398
Türkiye	16554682	211389525	2737071572	27206491	7663800401	22991401

SONUÇ

Bu çalışmada, TUİK 2024 yılı güncel hayvan varlığı verileri ve ASABE (2014) standartları kullanılarak; Bigadiç ilçesi, Balıkesir ili ve Türkiye geneli için büyükbaş hayvan gübresi kaynaklı teknik enerji (Biyogaz ve Yeşil H_2) potansiyeli hesaplanmıştır. Sahada toplanabilir atık oranının %50 ve SMR (Buhar Metan Reformlama) veriminin %70 kabul edildiği kabulüyle elde edilen bulgular aşağıdaki özetlenmiştir:

- Türkiye geneli için Biyogaz (CH_4) formundaki enerji potansiyeli 27,2 TWh iken, H_2'ye dönüşüm sonrası bu değer 23,0 TWh seviyesine gerilemiştir. Ancak, elde edilen 23 TWh'lik yerli biyo-H_2 (yeşil H_2) potansiyeli; depolanabilirlik ve ağır sanayi/ulaşım sektörlerinde kullanım esnekliği açısından biyogazdan daha yüksek bir katma değer sunmaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin 2053 net sıfır iklim hedefleri açısından yeşil H_2 üretimi oldukça büyük önem taşımaktadır.
- Sonuçlar, Balıkesir'in Türkiye'nin biyokütle enerjisi potansiyeli içerisinde stratejik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. İl genelinde hesaplanan yıllık 7,21 milyon ton büyükbaş gübre potansiyeli, Türkiye toplam kapasitesinin (211,4 milyon ton) yaklaşık %3,4'ünü oluşturmaktadır. Özellikle Bigadiç ilçesinin, tek başına sağladığı 1,1 milyon tonluk hayvansal atık kapasitesi ve 120 646 MWh'lik (0,12 TWh) teknik H_2 enerjisi potansiyeli, Bigadiç'in yerel ölçekli yeşil H_2 üretimi için en ideal bir yerleşim bölgesi olduğunu göstermiştir.
- Bigadiç'te üretilen H_2'nin yakıt pili teknolojisi kullanılarak %50 verim ile elektriğe çevrildiği durumda elde edilen elektik enerjisi ortalama 60 323 MWh'e ulaşmaktadır. 4 kişilik bir ailenin asgari yaşam standardındaki yıllık elektrik tüketimi ortalama 3 MWh olarak (3MWh/yıl/hane) kabul edildiği durumda; nüfusu yaklaşık 50 000 olan Bigadiç'in evsel elektrik ihtiyacının (37 500 MWh) tamamının karşılanabileceği söylenebilir.

REFERANSLAR

American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2014). Manure production and characteristics (ASABE Standard D384.2). St. Joseph, MI: ASABE.

Ekinci, K., Kulcu, R., Kaya, D., Yaldız, O., Ertekin, C., & Ozturk, H. H. (2010). The Prospective of Potential Biogas Plants That Can Utilize Animal Manure in Turkey. Energy Exploration & Exploitation, 28(3), 187–205. https://doi.org/10.1260/0144-5987.28.3.187

Deviren, H., İlkılıç, C., & Aydın, S. (2017). Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller ve Biyogazın Kullanım Alanları. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2/2), 79-89.

Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. International Journal of Hydrogen Energy, 40(34), 11094–11111. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035

El-Emam, R. S., & Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale hydrogen production with solar energy. Journal of Cleaner Production, 220, 593-609.

Eurostat. (2024). Bovine population - annual data [Data set]. European Commission. Erişim tarihi: 23 Aralık 2025, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/apro_mt_lscatl/default/table?lang=en

Gençer, Emre (2021), "Priority Areas for a National Hydrogen Strategy for Turkey", Energy Policy Researc Center, MIT Energy Initiative, 2021.

Hesar, L., Gürdil, G., & Demirel, B. (2021). Türkiye'de Çiftlik Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyeli. Erciyes Tarım Ve Hayvan Bilimleri Dergisi, 4(1), 27-32.

Morgado, N. F., & Mota-Lemos, F. (2023). Hydrogen production technologies: An overview. Clean Technologies, 5(4), 1238–1256. https://doi.org/10.3390/cleantechnol5040061

Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. Agronomy for Sustainable Development, 34(2), 473-492.

Noussan, M., Raimondi, P. P., & Scita, R. (2021). The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective. Sustainability, 13(1), 298. https://doi.org/10.3390/su13010298

Oliveira, A. M., Beswick, R. R., & Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. Current Opinion in Chemical Engineering, 33, 100701. https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100701

Öymen, G. (2020). Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerindeki rolü. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 19(39), 1069-1087. https://doi.org/10.46928/iticusbe.769022

Özman, K., & Karadaş, H. A. (2023). Yenilenebilir Enerji, Ekonomik Büyüme ve CO_2 Salınımı Arasındaki İlişki. Uluslararası Güncel Sosyal Bilimler Dergisi, 2(1), 38-45.

Sahlström, L. (2003). A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste during anaerobic digestion. Bioresource Technology, 87(2), 161-171.

Soeder, D. J. (2020). Fossil fuels and climate change. In Fracking and the Environment: A scientific assessment of the environmental risks from hydraulic fracturing and fossil fuels (pp. 155-185). Cham: Springer International Publishing.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Türkiye hidrojen teknolojileri stratejisi ve yol haritası. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/SGB/tr/Kurumsal_Politikalar/HSP/ETKB_Hidrojen_Stratejik_Plan2023.pdf

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. (2023). Türkiye elektrik enerjisi istatistikleri raporu. EMO Yayınları.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). Hayvansal üretim istatistikleri, 2024. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayvansal-%C3%9Cretim-%C4%B0statistikleri-2024-53935&dil=1

United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2024a). Livestock and poultry: World markets and trade. https://fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade

United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2024b). Livestock and products annual: Brazil (Report No. BR2024-0026). https://fas.usda.gov/data/brazil-livestock-and-products-annual-9

United States Department of Energy (DOE). (2016). Fuel Cell Technologies Market Report. Energy Efficiency & Renewable Energy.

Wang, B., Shao, Y., Yang, L., Guo, K., Li, X., Sun, M., & Hao, Y. (2025). Sustainable Hydrogen Production with Negative Carbon Emission Through Thermochemical Conversion of Biogas/Biomethane. Energies, 18(7), 1804.

Yaşar, M., & Güngörmüş, B. (2025). Yeşil Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Biyogaz Üretiminde Alternatif Enerji Kaynakları. Sürdürülebilir Çevre Dergisi, 5(1), 39-55. https://doi.org/10.62816/cevder.1637011

Yıldız, Ö. F., Yılmaz, M., Çelik, A., İmik, E. (2020). Havalimanlarında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması. Journal of Aviation, 4(1), 162-174. https://doi.org/10.30518/jav.695210

Su–Atık–İklim Etkileşimi: Entegre, Ölçek Duyarlı ve Yönetişim Temelli Bir Çerçeve

Züleyha REÇBER[1]

1- Doç. Dr.; Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
zuleyha.recber@igdir.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2472-9077

ÖZET

Su kaynakları, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki karşılıklı etkileşimler, çevresel sistemlerin giderek daha karmaşık ve kırılgan bir yapıya bürünmesine neden olmaktadır. Bu kitap bölümü, su–atık–iklim nexus yaklaşımını temel alarak, söz konusu sistemler arasındaki çok yönlü ilişkileri kavramsal, mekânsal ve yönetişim boyutlarıyla birlikte ele almaktadır. İklim değişikliğinin hidrolojik döngü üzerindeki etkileri, su miktarı ve kalitesi üzerinde baskı oluştururken; atık yönetimi süreçleri de hem sucul ekosistemler hem de iklim sistemi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler yaratmaktadır. Bölüm kapsamında, nexus etkileşimlerinin havza, kentsel ve kırsal ölçeklerde nasıl farklılaştığı tartışılmakta; sosyal, ekonomik ve kurumsal boyutların çevresel yönetim süreçlerindeki belirleyici rolü vurgulanmaktadır. Ayrıca, politika ve planlama perspektifinden bakıldığında, parçalı yönetim yaklaşımlarının sınırlılıkları ortaya konulmakta ve entegre, ölçek duyarlı ve veri temelli çevre yönetimi yaklaşımlarının gerekliliği değerlendirilmektedir. Bu çerçevede sunulan değerlendirmeler, su–atık–iklim nexus yaklaşımının sürdürülebilir çevre yönetimi ve iklim değişikliğine uyum politikaları açısından bütüncül bir rehber sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Su–atık–iklim nexus; entegre çevre yönetimi; iklim değişikliği; atık yönetimi; su ekosistemleri; çok aktörlü yönetişim; sürdürülebilirlik

GİRİŞ

Küresel ölçekte çevresel sorunların karmaşıklığı, doğal sistemler üzerindeki baskının yalnızca tek bir faktörle açıklanamayacağını açıkça ortaya koymaktadır. Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve tüketim alışkanlıklarındaki değişimler; su kaynakları, atık yönetimi ve iklim sistemi üzerinde eş zamanlı ve etkileşimli baskılar oluşturmaktadır (Rockström vd., 2009:472). Bu bağlamda çevresel problemlerin sektörel ve parçalı yaklaşımlarla ele alınması, sürdürülebilir çözümler üretme konusunda yetersiz kalmaktadır.

İklim değişikliği, hidrolojik döngüyü doğrudan etkileyerek yağış rejimlerinde düzensizliklere, kuraklık ve taşkın olaylarının sıklığında artışa neden olmaktadır (IPCC, 2021:88-89). Bu değişimler, yüzey ve yeraltı sularının miktarını ve kalitesini etkilerken, aynı zamanda atık yönetimi altyapıları üzerinde de önemli baskılar oluşturmaktadır. Özellikle aşırı yağış olayları sırasında düzenli depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı sularının alıcı ortamlara taşınması, su ekosistemlerinde kimyasal ve biyolojik kirlilik risklerini artırmaktadır (Kjeldsen vd., 2002:304-305).

Atık yönetimi süreçleri ise yalnızca yerel çevresel etkilerle sınırlı olmayıp, küresel ölçekte sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Atıkların toplanması, taşınması, bertarafı ve geri dönüşümü süreçlerinde

ortaya çıkan karbon dioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) emisyonları, iklim değişikliğini besleyen önemli kaynaklar arasında yer almaktadır (Bogner vd., 2007:587). Özellikle organik atıkların düzenli depolama sahalarında anaerobik koşullar altında ayrışması sonucu açığa çıkan metan gazı, yüksek küresel ısınma potansiyeli nedeniyle kritik bir çevresel sorun oluşturmaktadır.

Su kaynakları, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki bu çok yönlü ilişkiler, çevre mühendisliğinde entegrasyon temelli yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Literatürde "nexus" yaklaşımı olarak adlandırılan bu bakış açısı; su, enerji, gıda ve atık gibi sistemlerin birbirinden bağımsız değil, aksine karşılıklı etkileşim içinde değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır (Hoff, 2011:7). Su–atık–iklim etkileşimi özelinde ele alındığında, bu sistemler arasındaki geri besleme mekanizmaları çevresel risklerin büyüklüğünü ve yönetim karmaşıklığını artırmaktadır.

Geleneksel çevre yönetimi anlayışında, su kalitesi yönetimi, atık yönetimi ve iklim politikaları çoğunlukla ayrı kurumsal ve yasal çerçeveler içinde ele alınmaktadır. Ancak bu parçalı yapı, iklim uyum politikaları ile su ve atık yönetimi uygulamaları arasında koordinasyon eksikliğine yol açmakta ve dolaylı çevresel etkilerin göz ardı edilmesine neden olabilmektedir (Pahl-Wostl vd., 2020:24). Benzer şekilde, atık yönetiminde uygulanan politikaların karbon ayak izi ve iklim hedefleriyle yeterince bütünleştirilmemesi, sürdürülebilirlik açısından önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu kitap bölümünün amacı; su kaynakları, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki etkileşimleri bütüncül bir çerçeve içinde ele alarak, çevre mühendisliği perspektifinden entegre yönetim yaklaşımlarını tartışmaktır. Bölüm kapsamında öncelikle su–atık–iklim nexus yaklaşımının kavramsal temelleri açıklanacak, ardından bu sistemler arasındaki karşılıklı etkiler ve çoklu stresörler değerlendirilecektir. Son olarak, entegre çevre yönetimi için geliştirilebilecek stratejiler ve geleceğe yönelik perspektifler ortaya konulacaktır.

SU–ATIK–İKLİM NEXUS YAKLAŞIMI

Parçalı Çevre Yönetiminden Bütüncül Yaklaşımlara Geçiş

Çevresel sorunların ölçeği ve karmaşıklığı, tek bir sektöre odaklanan geleneksel çevre yönetimi anlayışlarının sınırlarını giderek daha görünür hâle getirmiştir. Özellikle su kaynakları yönetimi, atık yönetimi ve iklim değişikliği politikalarının ayrı kurumsal ve yasal çerçeveler içinde ele alınması, çevresel baskıların bütüncül biçimde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Literatürde bu durum, çevresel sistemlerin karşılıklı etkileşimlerinin göz ardı edilmesine ve yönetim kararlarının beklenmeyen

yan etkiler üretmesine neden olan "parçalı yönetişim" sorunu olarak tanımlanmaktadır (Koontz ve Thomas, 2006:115; Pahl-Wostl, 2020:28).

Bu bağlamda, su kalitesi yönetimi yalnızca hidrokimyasal parametrelerin kontrolüyle sınırlı kalmamakta; atık oluşumu, atık bertaraf yöntemleri ve iklim kaynaklı hidrolojik değişimlerle birlikte ele alınması gereken çok boyutlu bir süreç hâline gelmektedir. Geleneksel yaklaşımlar bu çoklu etkileşimleri yeterince dikkate alamadığından, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri çoğu zaman sınırlı düzeyde gerçekleşmektedir. Şekil 1'de su-atık-iklim nexus yaklaşımının kavramsal ilişkileri görsel olarak verilmiştir.



Şekil 1: Su-atık-iklim nexus yaklaşımının kavramsal ilişkileri

Nexus Yaklaşımının Kavramsal Temelleri

"Nexus yaklaşımı", doğal ve beşerî sistemler arasındaki karşılıklı bağımlılıkları anlamaya yönelik bütünleşik bir kavramsal çerçeve olarak literatürde öne çıkmaktadır. Hoff (2011:7), nexus kavramını, özellikle kaynak kullanımındaki artan rekabet ve iklim değişikliği baskıları altında, su, enerji ve gıda sistemleri arasındaki etkileşimleri analiz etmeye yönelik bir yaklaşım olarak tanımlamıştır. Bu yaklaşım, çevresel sistemlerin doğrusal olmayan ilişkilerle birbirine bağlı olduğunu vurgulayarak, tekil çözümler yerine çok sektörlü stratejileri teşvik etmektedir.

Zaman içerisinde nexus çerçevesinin yalnızca su–enerji–gıda ilişkileriyle sınırlı kalmaması gerektiği, atık yönetimi ve iklim değişikliği boyutlarının da bu etkileşim ağına dâhil edilmesi gerektiği yönünde güçlü bir literatür oluşmuştur (Allouche vd., 2015:612–614). Bu genişleme, çevresel baskıların kaynağında yer alan üretim–tüketim döngülerinin ve atık süreçlerinin analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Su–Atık Etkileşimi: Su Kalitesi Üzerindeki Dolaylı Baskılar

Atık yönetimi süreçleri, su ekosistemleri üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkiler oluşturmaktadır. Düzenli depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı suları, arıtma tesislerinin yetersizliği ve kontrolsüz atık bertarafı, yüzey ve yeraltı sularında besin maddesi ve toksik kirletici yüklerinin artmasına neden olabilmektedir. Bu durum, su kalitesi yönetiminin yalnızca su sektörüne özgü bir problem olmadığını, atık yönetimi politikalarıyla doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir.

İklim değişikliği ile birlikte artan aşırı yağış olayları, bu etkileşimi daha da karmaşık hâle getirmektedir. Kjeldsen vd. (2002:304-305), artan yağış şiddetinin atık depolama alanlarında sızıntı suyu oluşumunu artırarak, alıcı su ortamlarında kirletici taşınımını hızlandırdığını belirtmektedir. Bu süreç, su–atık–iklim etkileşiminin somut bir örneğini oluşturmaktadır.

Atık–İklim Nexus'u ve Geri Besleme Mekanizmaları

Atık yönetimi ile iklim değişikliği arasındaki ilişki, özellikle sera gazı emisyonları bağlamında önem kazanmaktadır. Düzenli depolama sahaları, küresel metan emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olup, bu emisyonların miktarı iklim koşulları, atık bileşimi ve işletme uygulamalarına bağlı olarak değişmektedir (Bogner vd., 2007:597).

Artan sıcaklıklar, organik atıkların bozunma hızını artırarak metan üretimini hızlandırabilmekte ve bu durum iklim değişikliğini daha da şiddetlendiren bir geri besleme döngüsü oluşturmaktadır. Bu bağlamda atık yönetimi, yalnızca çevresel kirlilik değil, aynı zamanda iklim politikalarının da temel bileşenlerinden biri hâline gelmektedir.

Sistem Yaklaşımı ve Nexus Çerçevesinin Yönetişim Boyutu

Su–atık–iklim nexus yaklaşımı, sistem düşüncesini merkeze alarak çevresel bileşenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri ve eşik değerleri göz önünde bulundurmaktadır. Liu vd. (2018:1716), nexus yaklaşımının karmaşık adaptif sistemlerin yönetiminde kritik bir araç sunduğunu ve çevresel stresörlerin birlikte değerlendirilmesini sağladığını vurgulamaktadır.

Bu yaklaşımın önemli bir bileşeni de yönetişim boyutudur. Geleneksel çevre yönetimi uygulamalarında farklı kurumlar arasında sınırlı koordinasyon bulunurken, nexus yaklaşımı çok paydaşlı karar alma süreçlerini ve sektörler arası iş birliğini teşvik etmektedir. Özellikle havza ölçeğinde planlama ve iklim uyum stratejilerinin geliştirilmesinde bu bütünleşik yapı, çevre mühendisliği uygulamaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Pahl-Wostl, 2020:24).

Sonuç olarak su–atık–iklim nexus yaklaşımı, çevresel sistemlerin karşılıklı etkileşimlerini bütüncül bir perspektifle ele alarak sürdürülebilir çevre yönetimi için güçlü bir kavramsal çerçeve sunmaktadır. Bu yaklaşım, su kalitesi bozulmasının yalnızca tekil kirletici kaynaklarla değil; iklim

değişikliği, atık yönetimi uygulamaları ve yönetişim yapılarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SU VE ATIK YÖNETİMİNE ETKİLERİ

İklim Değişikliği ve Hidrolojik Döngüde Meydana Gelen Değişimler

İklim değişikliği, hidrolojik döngünün temel bileşenlerini etkileyerek su kaynaklarının mekânsal ve zamansal dağılımında belirgin değişimlere neden olmaktadır. Küresel ortalama sıcaklıklardaki artış, buharlaşma hızlarını artırırken yağışların şiddeti, süresi ve frekansında önemli düzensizlikler ortaya çıkarmaktadır (IPCC, 2021:82-83). Bu değişimler, yüzeysel akış, yeraltı suyu beslenmesi ve su depolama süreçleri üzerinde doğrudan etkilidir.

Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde yağışların azalması ve kurak dönemlerin uzaması, mevcut su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Bu durum, alıcı ortamlarda seyrelme kapasitesinin azalmasına ve kirleticilerin daha yüksek konsantrasyonlarda birikmesine yol açmaktadır (Abalasei vd., 2025:12-13). Hidrolojik döngüdeki bu değişimler, atık yönetimi ve su kalitesi arasındaki ilişkiyi daha kritik hale getirmektedir.

İklim Değişikliğinin Su Kalitesi Üzerindeki Dolaylı Etkileri

İklim değişikliği, su kalitesini doğrudan etkilemekten ziyade çoğunlukla dolaylı mekanizmalar aracılığıyla şekillendirmektedir. Artan sıcaklıklar, biyokimyasal reaksiyon hızlarını artırarak organik maddelerin ayrışmasını hızlandırmakta ve çözünmüş oksijen seviyelerinde düşüşe neden olmaktadır (Chapra vd., 2021:1). Bu durum, özellikle göl ve rezervuar ekosistemlerinde ötrofikasyon riskini artırmaktadır.

Aşırı yağış olayları ise tarımsal alanlardan ve kentsel yüzeylerden gelen yayılı kaynaklı kirleticilerin su ortamlarına taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Besin maddeleri, pestisitler ve ağır metaller gibi kirleticiler, bu süreçte su ekosistemlerine daha yoğun bir şekilde ulaşmaktadır (Akdoğan vd., 2015:22). Bu bağlamda iklim değişikliği, mevcut kirlilik baskılarını güçlendiren bir çarpan etkisi yaratmaktadır.

Atık Yönetimi Altyapılarının İklim Değişikliğine Duyarlılığı

Atık yönetimi altyapıları, iklim değişikliğine karşı yüksek derecede duyarlıdır. Özellikle düzenli depolama sahaları, aşırı yağış ve taşkın olaylarından doğrudan etkilenmektedir. Artan yağış miktarı, sızıntı suyu oluşumunu artırarak kirleticilerin yüzey ve yeraltı sularına taşınma riskini yükseltmektedir (Kjeldsen vd., 2002:309).

Benzer şekilde atık su arıtma tesisleri, debi dalgalanmaları ve sıcaklık değişimlerine karşı hassastır. Ani yağışlar sonucunda hidrolik yükün artması, biyolojik arıtma süreçlerinin verimini düşürmekte ve arıtılmamış veya yetersiz arıtılmış suların alıcı ortamlara deşarj edilmesine neden

olabilmektedir (Hughes, 2021:2, 5). Bu durum, iklim değişikliğinin atık yönetimi performansı üzerindeki dolaylı ancak güçlü etkisini ortaya koymaktadır.

İklim Değişikliği ve Atık Kaynaklı Sera Gazı Geri Beslemeleri

Atık sektörü ile iklim değişikliği arasındaki ilişki çift yönlüdür. Atıkların biyolojik bozunma süreçleri sırasında açığa çıkan metan ve karbondioksit gibi sera gazları, küresel ısınmayı hızlandırmaktadır. Özellikle düzenli depolama sahalarında oluşan metan emisyonları, atık sektörünün karbon ayak izinde önemli bir paya sahiptir (Bogner vd., 2007:593).

Öte yandan iklim değişikliği, bu emisyonların miktarını ve hızını da etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, organik atıkların ayrışma hızını artırarak metan üretimini hızlandırabilmektedir. Bu durum, iklim değişikliği–atık yönetimi ilişkisinde pozitif bir geri besleme mekanizmasının varlığını ortaya koymaktadır (Hu vd., 2023:4517).

Entegre Su–Atık–İklim Yönetimi Yaklaşımı

İklim değişikliğinin su ve atık yönetimi üzerindeki çok boyutlu etkileri, bu alanların birbirinden bağımsız ele alınamayacağını göstermektedir. Entegre yönetim yaklaşımları, su kalitesi, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki etkileşimleri birlikte değerlendirerek daha dirençli sistemler oluşturmayı hedeflemektedir (Grison vd., 2023:2787).

Bu kapsamda iklim uyumlu atık yönetimi stratejileri; altyapıların iklim risklerine göre yeniden tasarlanmasını, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesini ve doğa temelli çözümlerin uygulanmasını içermektedir. Böylece su ekosistemleri üzerindeki baskılar azaltılmakta ve iklim değişikliğine karşı çevresel direnç artırılmaktadır (Li vd., 2023:6-7).

ATIK YÖNETİMİNİN SU EKOSİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ROLÜ

Atık Yönetimi ve Su Ekosistemleri Arasındaki Temel Etkileşimler

Atık yönetimi uygulamaları, su ekosistemlerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik bütünlüğünü doğrudan etkileyen temel çevresel baskı unsurlarından biridir. Evsel, endüstriyel ve tarımsal atıkların uygun olmayan biçimde yönetilmesi; yüzey suları, yeraltı suları ve kıyı ekosistemlerinde uzun süreli ve çoğu zaman geri döndürülemez bozulmalara yol açabilmektedir. Özellikle atıkların kaynağında azaltılmaması, kontrolsüz depolanması ve yetersiz arıtma uygulamaları, su ortamlarında sürekli bir kirletici girdisi oluşturarak ekosistemlerin taşıma kapasitesinin aşılmasına neden olmaktadır (UNEP, 2016:15).

Bu bağlamda atık yönetimi, yalnızca atıkların bertaraf edilmesine yönelik teknik bir süreç değil; aynı zamanda su ekosistemlerinin korunmasına yönelik kritik bir çevresel yönetim aracıdır. Atık kaynaklı kirleticiler, hidrolojik döngü aracılığıyla farklı su ortamlarına taşınarak

havza ölçeğinde yaygın etkiler yaratmakta ve karasal faaliyetler ile sucul sistemler arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır. Bu durum, atık yönetimi ile su ekosistemleri arasındaki ilişkinin yerel değil, bütüncül ve mekânsal olarak bağlantılı bir yapı sergilediğini göstermektedir (Raimi vd., 2021:34).

Katı Atık Depolama Sahaları ve Sızıntı Sularının Su Kalitesi Üzerindeki Etkileri

Katı atık depolama sahaları, su ekosistemleriyle etkileşim açısından atık yönetiminin en kritik bileşenlerinden biridir. Düzenli depolama sahalarında oluşan sızıntı suları; ağır metaller, çözünmüş organik karbon, azot ve fosfor bileşikleri ile çeşitli toksik organik kirleticileri içermektedir. Bu kirleticilerin yüzey veya yeraltı sularına karışması, su kalitesinde belirgin bozulmalara yol açmaktadır (Nyika vd., 2022:960).

Sızıntı sularının su ortamlarına ulaşması, özellikle ötrofikasyon süreçlerini hızlandırmakta, toksisite düzeylerini artırmakta ve ekosistem işlevlerini olumsuz etkilemektedir. Uzun vadede bu durum, sucul organizmaların tür kompozisyonunda değişimlere ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya neden olmaktadır. Bu etkiler, atık depolama sahalarının yalnızca yerel değil, bölgesel ölçekte su ekosistemlerini etkileyebileceğini ortaya koymaktadır (Misganaw, 2023:2).

Atık Su Yönetimi ve Alıcı Ortam Ekolojisi

Atık su yönetimi, su ekosistemleri üzerindeki baskının bir diğer önemli bileşenini oluşturmaktadır. Yetersiz arıtılmış veya doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilen atık sular, çözünmüş oksijen seviyelerinin düşmesine ve organik madde yükünün artmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle durgun veya düşük akışlı su kütlelerinde ciddi ekolojik sorunlara yol açmaktadır (Büttner vd., 2022:7).

Artan organik yük, mikroorganizma faaliyetlerini hızlandırarak oksijen tüketimini artırmakta; bunun sonucunda balık ölümleri, habitat kaybı ve ekosistem dengesinin bozulması gibi etkiler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca besin maddesi yüklerindeki artış, alg patlamalarını tetikleyerek ışık geçirgenliğini azaltmakta ve sucul yaşamı dolaylı olarak olumsuz etkilemektedir (Ubuoh vd., 2023:22).

Plastik ve Mikroplastik Atıkların Su Ekosistemlerine Etkisi

Plastik ve mikroplastik atıklar, atık yönetimi–su ekosistemi ilişkisi bağlamında son yıllarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Uygun şekilde yönetilmeyen plastik atıklar, nehir sistemleri aracılığıyla denizel ortamlara taşınmakta ve burada uzun süreli çevresel baskı oluşturmaktadır (Lebreton vd., 2017:2).

Mikroplastikler, sucul organizmalar tarafından yutularak besin zinciri boyunca taşınmakta ve ekotoksikolojik riskleri artırmaktadır. Bu durum,

yalnızca bireysel organizmaların sağlığını değil, ekosistem düzeyinde enerji ve madde akışını da etkilemektedir. Plastik atıkların çevresel kalıcılığı, su ekosistemleri üzerindeki etkilerin uzun vadeli ve birikimli olmasına neden olmaktadır (Rakib vd., 2023:2).

Atık Birikiminin Hidromorfolojik Etkileri

Atık yönetiminin su ekosistemleri üzerindeki etkileri yalnızca kimyasal kirlenmeyle sınırlı değildir; aynı zamanda fiziksel habitat yapısını da önemli ölçüde etkilemektedir. Katı atık birikimi, özellikle akarsu yataklarında hidrolik rejimi değiştirerek akış hızını, sediman taşınımını ve kanal morfolojisini etkilemektedir. Bu durum, bentik habitatların bozulmasına ve sucul organizmalar için uygun yaşam alanlarının azalmasına neden olmaktadır (Ríos-Fuster vd., 2025:2).

Bu tür hidromorfolojik değişimler, sucul ekosistemlerin kendini yenileme kapasitesini zayıflatmakta ve ekolojik dayanıklılığı azaltmaktadır. Dolayısıyla atık yönetimi uygulamalarının, yalnızca kirletici kontrolüne değil, aynı zamanda habitat bütünlüğünün korunmasına da odaklanması gerekmektedir.

Sürdürülebilir Atık Yönetimi Yaklaşımları ve Su Ekosistemlerinin Korunması

Sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımları, su ekosistemleri üzerindeki baskıların azaltılmasında bütüncül ve önleyici bir rol üstlenmektedir. Atıkların kaynağında azaltılması, geri dönüşüm ve geri kazanım uygulamalarının yaygınlaştırılması ile güvenli bertaraf yöntemlerinin uygulanması, su ortamlarına ulaşan kirletici miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çerçevede atık yönetimi, yalnızca bir bertaraf süreci olmaktan çıkarak su ekosistemlerinin korunmasını hedefleyen stratejik bir çevre yönetimi aracına dönüşmektedir (Laureti vd., 2024:20).

Kaynağında azaltma stratejilerinin havza ölçeğinde uygulanması, yüzeysel akış ve drenaj sistemleri yoluyla su ortamlarına taşınan kirleticilerin sınırlandırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, su kalitesi üzerindeki baskıları azaltmakta ve ekosistemlerin taşıma kapasitesinin aşılması riskini düşürmektedir (Skenderovic vd., 2015:2-4; Ahmed ve Ismail, 2018:1-2).

Geri dönüşüm ve geri kazanım uygulamaları ise doğal kaynak çıkarımını ve buna bağlı su tüketimini azaltarak su ekosistemleri üzerinde dolaylı fakat önemli kazanımlar sağlamaktadır. Özellikle plastik ve metal atıkların geri dönüşümü, sucul ortamlara ulaşan kalıcı kirleticilerin miktarını azaltmakta ve ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Rajmohan vd., 2019:81).

Buna ek olarak güvenli bertaraf uygulamaları, sızıntı suyu oluşumunun kontrol altına alınması ve ileri arıtma teknolojilerinin kullanımı yoluyla alıcı ortamların korunmasına katkı sunmaktadır. Özellikle iklim

değişikliği ile birlikte artan aşırı yağış olayları dikkate alındığında, atık yönetimi altyapılarının iklim risklerine karşı dayanıklı biçimde planlanması, su ekosistemlerinin uzun vadeli korunması açısından kritik önem taşımaktadır (Singh ve Gupta, 2016:12-13).

Entegre Yaklaşımların Gerekliliği

Atık yönetimi uygulamalarının etkinliği, su ekosistemlerinin ekolojik bütünlüğü üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Entegre atık ve su yönetimi yaklaşımları benimsenmediği sürece, iklim değişikliği ve artan antropojenik baskılarla birlikte su ekosistemlerindeki bozulmanın hızlanması kaçınılmazdır. Bu nedenle atık yönetimi politikalarının, su ekosistemlerinin korunmasını merkeze alan bütüncül ve önleyici bir çevre yönetimi anlayışıyla ele alınması gerekmektedir.

ENTEGRE VE İKLİM UYUMLU ATIK YÖNETİMİ YAKLAŞIMLARI

İklim Değişikliği Bağlamında Atık Yönetiminin Dönüşen Rolü

İklim değişikliği, atık yönetimi sistemlerinin yalnızca operasyonel verimliliğini değil, aynı zamanda çevresel riskleri yönetme kapasitesini de doğrudan etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, aşırı yağış olayları ve uzun süreli kuraklıklar; atık toplama, depolama, arıtma ve bertaraf süreçlerinin iklim stresörlerine karşı daha kırılgan hale gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle güncel çevre politikalarında, atık yönetimi sistemlerinin iklim değişikliğine uyum (adaptasyon) perspektifiyle yeniden ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (UNEP, 2024:49).

İklim uyumlu atık yönetimi yaklaşımı, yalnızca sera gazı emisyonlarının azaltılmasını değil, aynı zamanda iklim kaynaklı risklerin atık altyapıları üzerindeki etkilerinin minimize edilmesini hedeflemektedir. Bu çerçevede atık yönetimi, iklim değişikliğine karşı çevresel dayanıklılığın artırılmasında stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (AEA, 2012:3-4; C40 Cities, 2020:2).

Atık Altyapılarının İklim Risklerine Göre Yeniden Tasarlanması

Atık yönetimi altyapılarının büyük bir bölümü, geçmiş iklim koşullarına göre tasarlanmıştır. Ancak iklim değişikliğiyle birlikte artan aşırı yağışlar, düzenli depolama sahalarında sızıntı suyu oluşumunu artırmakta; sıcaklık artışları ise organik atıkların bozunma hızını değiştirerek gaz ve koku oluşumunu tetiklemektedir. Bu durum, mevcut altyapıların iklim risklerine karşı yetersiz kalmasına yol açmaktadır (AEA, 2012:3-4; C40 Cities, 2020:2).

Güncel literatürde, atık depolama sahalarının hidrolik kapasitesinin artırılması, sızıntı suyu toplama sistemlerinin güçlendirilmesi ve taşkın riskine duyarlı alanlarda yeni depolama tesislerinin sınırlandırılması, iklim

uyumlu tasarım ilkeleri arasında gösterilmektedir (C40 Cities, 2020:2). Bu tür önlemler, atık kaynaklı kirleticilerin yüzey ve yeraltı sularına karışma riskini azaltarak su ekosistemleri üzerindeki baskının sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Erken Uyarı Sistemleri ve İzleme Mekanizmaları

İklim değişikliğinin atık yönetimi üzerindeki etkilerinin yönetilmesinde erken uyarı sistemleri ve sürekli izleme mekanizmaları kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle aşırı yağış ve taşkın riskinin yüksek olduğu bölgelerde, atık depolama ve atık su altyapılarının gerçek zamanlı izlenmesi, olası çevresel kazaların önlenmesine olanak tanımaktadır (Islam vd., 2025:523-524; UNDP, 2025).

Erken uyarı sistemleri sayesinde sızıntı suyu miktarındaki ani artışlar, arıtma tesislerindeki hidrolik yüklenmeler ve potansiyel taşkın riskleri önceden tespit edilebilmekte; böylece önleyici müdahaleler zamanında gerçekleştirilebilmektedir. Bu yaklaşım, atık yönetiminin reaktif değil, proaktif bir çevresel yönetim aracı olarak konumlandırılmasını sağlamaktadır (UNDP, 2025).

Doğa Temelli Çözümler ve Havza Ölçeğinde Yaklaşım

Son yıllarda iklim uyumlu atık yönetimi kapsamında doğa temelli çözümler (nature-based solutions) giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yapay altyapılarla birlikte sulak alan restorasyonu, yeşil tampon bölgeler ve geçirgen yüzeylerin artırılması gibi uygulamalar, atık kaynaklı kirleticilerin su ortamlarına ulaşmadan tutulmasına katkı sağlamaktadır (UNDP, 2018).

Havza ölçeğinde ele alındığında, bu tür çözümler atık kaynaklı kirliliğin yalnızca noktasal değil, yayılı etkilerini de kontrol altına almayı mümkün kılmaktadır. Doğa temelli çözümler, hidrolik rejimi düzenleyerek sediman ve besin maddesi taşınımını azaltmakta; böylece su ekosistemlerinin iklim değişikliğine karşı direncini artırmaktadır (UNESCO, 2020:16).

Entegre Yönetim ve Çevresel Dirençlilik

İklim uyumlu atık yönetimi, su yönetimi ve iklim politikalarından bağımsız düşünülemez. Entegre yönetim yaklaşımları, atık, su ve iklim sistemleri arasındaki karşılıklı etkileşimleri birlikte ele alarak çevresel dirençliliği artırmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, parçalı yönetişim modellerinin aksine, politika uyumu ve kurumsal koordinasyonu ön plana çıkarmaktadır.

Bu bağlamda iklim uyumlu atık yönetimi stratejileri; altyapıların iklim risklerine göre yeniden tasarlanmasını, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesini ve doğa temelli çözümlerin uygulanmasını içermektedir. Böylece su ekosistemleri üzerindeki baskılar azaltılmakta ve iklim

değişikliğine karşı çevresel direnç artırılmaktadır (UNDP, 2018; OECD, 2025).

Sonuç olarak, iklim değişikliği koşullarında atık yönetimi, yalnızca atık bertarafına odaklanan teknik bir alan olmaktan çıkmış; su ekosistemlerinin korunması ve çevresel dirençliliğin artırılması açısından stratejik bir yönetim bileşeni haline gelmiştir. İklim uyumlu ve entegre atık yönetimi yaklaşımlarının yaygınlaştırılmaması durumunda, su ekosistemleri üzerindeki baskıların artarak devam etmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle atık yönetimi politikalarının, iklim değişikliğine uyum ve su ekosistemlerinin korunması hedefleriyle bütünleşik biçimde ele alınması gerekmektedir.

SU–ATIK–İKLİM NEXUS'UN MEKÂNSAL-ÖLÇEKSEL BOYUTU

Çevresel sistemler arasındaki etkileşimler, mekânsal (alan) ve ölçeksel (yerel → bölgesel → küresel) farklılıklar göstermektedir. Su–atık–iklim nexus bağlamında bu boyutları anlamak, risklerin, baskıların ve yönetim stratejilerinin neden farklı düzeylerde değiştiğini ve bunun entegre çevre yönetimi için ne anlama geldiğini ortaya koyar (Kurian ve Ardakanian, 2014:5–6). Bu bağlamda, mekânsal ölçeklerin kavramsal olarak ayrıştırılması, etkilerin nasıl dağıldığını ve hangi yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini anlamada kritik önemdedir.

Havza Ölçeğinde Riskler ve Yönetim Stratejileri

Havza ölçeği, su–atık–iklim nexus analizlerinde özellikle pratik bir çerçeve sunar. Havzalar, hidrolojik süreçler, kirletici taşınım yolları ve antropojenik baskıların birlikte değerlendirilebildiği doğal bir yönetim birimidir (Moghadam vd., 2023:2). Örneğin bir havzadaki yüzey ve yeraltı sularına yönelik atık sızıntısı, yağışla taşınım ve iklim kaynaklı hidrolojik değişimler bir arada değerlendirilmediğinde yanıltıcı sonuçlara ulaşılabilir. Bu nedenle nexus yaklaşımı, havza ölçeğinde "entegre su planlaması, atık kontrol mekanizmaları ve iklim uyum stratejileri" gibi bileşenleri bir arada ele almayı zorunlu kılar (Kurian ve Ardakanian, 2014:10–12).

Kentsel ve Kırsal Alanlarda Farklı Etkiler

Kentsel ve kırsal alanlar arasında mekânsal farklılaşma, iklim değişikliğinin çevresel sistemler üzerindeki etkilerini belirgin biçimde şekillendirmektedir. Kentsel ortamlar; yüksek nüfus yoğunluğu, yapılaşma oranı ve yüzey örtüsü değişimleri nedeniyle iklim stresörlerine karşı daha hassas bir yapı sergilerken, kırsal alanlarda arazi kullanımı, tarımsal faaliyetler ve doğal örtü özellikleri farklı risk profilleri ortaya koymaktadır (Işınkaralar vd., 2023:244–246). Bu farklılaşma, atık sızıntılarının su kalitesi üzerindeki etkilerinin kent ve kırsal bağlamda farklı yöntemlerle ele alınmasını gerektirir; örneğin, kentsel atık altyapısının güçlendirilmesi ile

kırsal alanlarda tampon bölgelerin korunması gibi stratejiler farklı ölçeklerde önceliklendirilebilir.

Yerel, Bölgesel ve Küresel Etkileşimlerin Karşılaştırılması

Yerel, bölgesel ve küresel ölçekler arasındaki etkileşim hiyerarşisi, nexus risklerinin ve yönetim müdahalelerinin etkinliğini doğrudan etkiler. Yerel düzeyde su kalite bozulmaları ve atık taşınımı hızlıca gözlemlenirken, bölgesel ve küresel ölçekte iklim değişikliği gibi dışsal baskılar bu yerel süreçleri şekillendirir (Kurian ve Ardakanian, 2014:3–4). Örneğin küresel iklim modellerindeki yağış rejimi değişimleri, bölgesel su rezervlerini, dolayısıyla yerel atık taşınımını ve atık altyapısına binen yükü doğrudan etkiler. Bu nedenle çok-ölçekli entegrasyon, yalnızca su ve atık yönetiminde değil, aynı zamanda iklim uyum planlamasında da gereklidir. Böylece hem yerel ihtiyaçlara yanıt veren hem de daha geniş iklim hedefleriyle uyumlu stratejiler geliştirmek mümkün olur.

Sonuç olarak, su–atık–iklim nexus'un mekânsal ve ölçeksel boyutu, havza ölçeğinde bütünleşik risk değerlendirmesi, kent–kırsal farklılıklarının çözümlenmesi ve çok-ölçekli yönetim çerçevelerinin oluşturulması açısından vazgeçilmez bir perspektif sunmaktadır. Bu yaklaşım, çevresel baskıların yerel patolojilerini anlamayı ve entegre çevre yönetimi için daha teşhis edici, ölçek duyarlı çözümler geliştirmeyi sağlar.

SOSYAL, EKONOMİK VE KURUMSAL BOYUTLAR

Paydaşların rolü ve çok aktörlü yönetişim

Çevre yönetimi yalnızca teknik uygulamalardan ibaret olmamakta; aynı zamanda sosyal, ekonomik ve kurumsal süreçlerin etkileşimiyle sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmektedir. Bu bağlamda paydaşların rolü ve çok aktörlü yönetişim, su–atık–iklim nexus'unun etkin işleyişi için kritik bir bileşendir.

Paydaş katılımı; hükümetler, özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve yerel topluluklar gibi farklı aktörlerin çevresel karar alma süreçlerine dahil edilmesini sağlayarak, bilgi paylaşımı, farklı bakış açıları ve çözüm önerilerinin politika süreçlerine yansımasını mümkün kılar (Papadopoulou vd., 2025:2-4; Newig vd., 2023:1). Özellikle nexus gibi çok sektörlü yapılarda paydaş katılımının sistematik olarak örgütlenmesi, kararların meşruiyetini ve kabul edilebilirliğini artırırken, uygulama aşamasında ortaya çıkabilecek direncin ve gecikmelerin önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır (Papadopoulou vd., 2018:6; Newig vd., 2023:1). Ayrıca paydaş etkileşimi, yalnızca teknik bilgi üretim sürecine değil, aynı zamanda yerel ve geleneksel bilgilerin politika süreçlerine dahil edilmesine de olanak tanır, bu da çevresel projelerin toplumsal kabulünü ve sürdürülebilirliğini güçlendirir (Papadopoulou vd., 2018:8; Newig vd., 2023:1).

Toplumsal farkındalık ve davranış değişikliği etkisi

Toplumsal farkındalık ve davranış değişikliği, çevresel sürdürülebilirliğin uzun vadeli başarısında belirleyici bir rol oynar. Halkın çevre ve iklim politikalarına yönelik bilinç düzeyinin artması, tüketim alışkanlıklarında ve atık azaltım pratiklerinde dönüşüme katkı sağlamaktadır (Papadopoulou vd., 2018:9). Bu bilinç, yalnızca bireysel çevresel davranışları değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda yerel yönetimlerin ve devlet kurumlarının çevre politikalarını daha güçlü toplumsal taleplerle şekillendirmesine olanak verir; böylece çevresel yönetim süreçleri alt-üst etkileşimler yoluyla hem tabandan hem de üstten desteklenir (Papadopoulou vd., 2018:10; Newig vd., 2023:1).

Ekonomik maliyet–fayda analizleri

Ekonomik maliyet–fayda analizleri, çevresel karar alma süreçlerinde kaynakların etkin kullanımını değerlendiren bir diğer önemli unsurdur. Sürdürülebilir politikalar yalnızca çevresel fayda üretmekle kalmayıp aynı zamanda ekonomik etkinliği de gözetmelidir; bu, özellikle su ve atık altyapısı yatırımlarında doğru maliyet tahminlerinin yapılması ve uzun vadeli operasyonel faydaların hesaplanması ile mümkündür (Papadopoulou vd., 2018:11).

Ekonomik analizler aynı zamanda çevresel projelere yönelik finansman mekanizmalarının tasarlanmasında ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada stratejik bir araç işlevi görür; çevresel dışsallıkların ve geleceğe yönelik risklerin ekonomik değere dönüştürülmesi, politika yapıcıların daha bilinçli karar vermesine katkı sağlar (Papadopoulou vd., 2018:12; Newig vd., 2023:1). Bu çok boyutlu yaklaşım, çevre yönetiminin sadece teknik değil aynı zamanda toplumsal sahiplenme ve ekonomik sürdürülebilirlik ile tamamlanması gerektiğini vurgular.

POLİTİKA VE PLANLAMA AÇISINDAN ÇIKARIMLAR

Su kaynakları, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki etkileşimlerin bütüncül biçimde ele alınması, mevcut çevre politikalarının ve planlama yaklaşımlarının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüzde su yönetimi, atık yönetimi ve iklim politikaları çoğunlukla farklı kurumsal yapılar ve yasal çerçeveler altında yürütülmekte; bu parçalı yapı, sistemler arası geri besleme mekanizmalarının göz ardı edilmesine yol açmaktadır. Su–atık–iklim nexus yaklaşımı, bu yapısal kopuklukların aşılması ve politika uyumunun sağlanması açısından önemli bir çerçeve sunmaktadır.

Nexus temelli politika geliştirme, çevresel risklerin tekil sektörler üzerinden değil, çoklu stresörler ve ölçekler dikkate alınarak değerlendirilmesini gerektirir. Özellikle iklim değişikliği kaynaklı belirsizlikler altında, su kalitesi yönetimi ve atık altyapılarının planlanması;

havza ölçeğinde, iklim uyum hedefleriyle bütünleşik ve uzun vadeli senaryolara dayalı olarak ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, kısa vadeli ve reaktif müdahaleler yerine, önleyici ve uyum kapasitesini artırıcı politika araçlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Politika düzeyinde entegrasyonun etkin biçimde sağlanabilmesi için yönetişim yapılarının güçlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Çok aktörlü karar alma süreçleri, farklı kurumlar arasında veri paylaşımını, ortak hedef tanımlamayı ve uygulama aşamasında koordinasyonu desteklemektedir. Yerel yönetimler, merkezi idare, özel sektör ve sivil toplum kuruluşlarının birlikte hareket etmesi, nexus yaklaşımının pratikte uygulanabilirliğini artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Bununla birlikte, izleme, raporlama ve değerlendirme mekanizmalarının politika süreçlerine sistematik biçimde entegre edilmesi gerekmektedir. Su kalitesi, atık yönetimi performansı ve iklim göstergelerinin birlikte izlenmesi; politika uygulamalarının etkinliğinin değerlendirilmesine ve gerektiğinde uyarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda dijitalleşme, veri analitiği ve erken uyarı sistemleri, politika yapım sürecini destekleyen tamamlayıcı araçlar olarak önem kazanmaktadır.

Bu çerçevede, su–atık–iklim nexus yaklaşımının politika ve planlama süreçlerine entegre edilmesi; çevresel risklerin azaltılması, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve iklim değişikliğine karşı çevresel dirençliliğin artırılması açısından stratejik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu entegrasyonun sağlanamaması durumunda, sektörel politikaların sınırlı etki üretmesi ve çevresel baskıların artarak devam etmesi kaçınılmaz olacaktır.

SU–ATIK–İKLİM NEXUS'UNUN POLİTİKA BOYUTU: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Su kaynakları yönetimi, atık yönetimi ve iklim değişikliği politikaları Türkiye'de uzun yıllar boyunca büyük ölçüde sektörel ve ayrı kurumsal çerçeveler içerisinde ele alınmıştır. Ancak iklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesiyle birlikte, bu alanlar arasındaki karşılıklı etkileşimlerin politika düzeyinde daha bütüncül biçimde değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Türkiye'nin artan su stresi, hızlı kentleşme süreci ve değişen iklim koşulları, su–atık–iklim nexus yaklaşımının politika yapım süreçlerine entegrasyonunu özellikle önemli hâle getirmektedir.

Türkiye'de su yönetimi politikaları ağırlıklı olarak havza temelli planlama yaklaşımı üzerine inşa edilmiştir. Nehir havzaları yönetim planları ve su kalite hedefleri, yüzey ve yeraltı sularının korunmasını amaçlamaktadır. Bununla birlikte, bu planların çoğu zaman atık yönetimi ve iklim değişikliği senaryoları ile yeterince bütünleştirilemediği görülmektedir. Özellikle iklim değişikliğine bağlı yağış rejimi değişimleri, kuraklık ve taşkın riskleri, su kalitesi ve atık altyapıları üzerindeki baskıyı artırmasına

rağmen, bu risklerin su ve atık politikalarına sistematik biçimde entegre edilmesi sınırlı kalmaktadır.

Atık yönetimi alanında ise Türkiye, son yıllarda Sıfır Atık yaklaşımı, geri dönüşüm hedefleri ve düzenli depolama standartlarının geliştirilmesi gibi önemli politika adımları atmıştır. Bu gelişmeler, atık miktarının azaltılması ve kaynak verimliliğinin artırılması açısından olumlu kazanımlar sağlamaktadır. Ancak atık yönetimi politikalarının büyük ölçüde katı atık odaklı ilerlediği, atık süreçlerinin su kalitesi ve iklim değişikliği ile olan dolaylı etkilerinin politika belgelerinde yeterince görünür olmadığı dikkat çekmektedir. Özellikle düzenli depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı suları ve atık su altyapılarının iklim kaynaklı aşırı olaylara duyarlılığı, nexus perspektifinden ele alınması gereken kritik konular arasında yer almaktadır.

İklim değişikliği politikaları açısından Türkiye, ulusal iklim stratejileri ve uyum planları aracılığıyla sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim risklerine uyum hedeflerini tanımlamıştır. Bu belgelerde su kaynakları ve atık sektörü önemli başlıklar olarak yer alsa da, uygulamada sektörler arası politika uyumunun sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle atık sektörünün hem su ekosistemleri üzerindeki etkileri hem de sera gazı emisyonları yoluyla iklim sistemiyle kurduğu çift yönlü ilişki, politika düzeyinde bütüncül biçimde ele alınmamaktadır. Bu durum, su–atık–iklim etkileşimlerinin yönetiminde parçalı bir yapı oluşmasına neden olmaktadır.

Nexus yaklaşımı açısından bakıldığında, Türkiye'deki mevcut politika çerçevesinin bazı güçlü yönlere sahip olduğu söylenebilir. Havza ölçeğinde planlama anlayışı, yerel ve bölgesel çevresel baskıların değerlendirilmesi için uygun bir temel sunmaktadır. Bununla birlikte, bu planlama süreçlerinin atık yönetimi ve iklim uyum politikalarıyla daha güçlü biçimde entegre edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, iklim değişikliğinin şiddetlendirdiği hidrometeorolojik riskler, hem su kalitesi hedeflerinin hem de atık yönetimi performansının zayıflamasına yol açabilmektedir.

Türkiye bağlamında su–atık–iklim nexus'unun etkin biçimde politika süreçlerine yansıtılabilmesi için, kurumsal koordinasyonun güçlendirilmesi, ortak veri ve izleme altyapılarının geliştirilmesi ve iklim senaryolarının su ve atık planlamasına sistematik olarak entegre edilmesi kritik öneme sahiptir. Özellikle erken uyarı sistemleri, havza temelli izleme mekanizmaları ve iklim duyarlı atık altyapıları, çevresel risklerin önlenmesinde ve uyum kapasitesinin artırılmasında önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda, Türkiye örneği, su–atık–iklim nexus yaklaşımının politika düzeyinde uygulanmasının hem önemli fırsatlar hem de yapısal zorluklar barındırdığını göstermektedir. Mevcut politikaların daha bütüncül, ölçek duyarlı ve veri temelli bir çerçevede yeniden ele alınması; çevresel risklerin azaltılması, iklim değişikliğine uyumun güçlendirilmesi ve sürdürülebilir çevre yönetimi hedeflerine ulaşılması açısından belirleyici olacaktır.

SONUÇ

Su kaynakları, atık yönetimi ve iklim değişikliği arasındaki etkileşimler, günümüz çevresel sorunlarının yalnızca teknik ve sektörel çözümlerle ele alınamayacağını açıkça ortaya koymaktadır. Bu kitap bölümünde ele alınan su–atık–iklim nexus yaklaşımı, çevresel sistemlerin karşılıklı bağımlılığını vurgulayarak parçalı yönetim anlayışlarının sınırlılıklarını görünür kılmıştır. İklim değişikliğinin hidrolojik döngü üzerindeki etkileri, su kaynaklarının miktar ve kalite açısından baskı altına girmesine neden olurken; aynı zamanda atık yönetimi altyapılarının kırılganlığını artırmakta ve çevresel riskleri derinleştirmektedir. Atık kaynaklı kirleticiler ve sera gazı emisyonları ise su ekosistemleri ve iklim sistemi üzerinde uzun vadeli ve çok boyutlu baskılar oluşturmaktadır.

Mekânsal ve ölçeksel analizler, su–atık–iklim etkileşimlerinin havza, kentsel–kırsal ve yerel–küresel düzeylerde farklı dinamikler sergilediğini göstermekte; bu durum, tek tip ve merkezi yönetim çözümlerinin çoğu zaman yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle entegre planlama yaklaşımları, ölçek duyarlı stratejiler ve havza temelli yönetim modelleri, çevresel risklerin etkin biçimde yönetilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, sosyal, ekonomik ve kurumsal boyutlar dikkate alınmadığında, teknik açıdan güçlü görünen çözümlerin dahi uygulamada sürdürülebilirliğini yitirdiği görülmektedir. Çok aktörlü yönetişim yapıları, paydaş katılımı ve ekonomik maliyet–fayda değerlendirmeleri, nexus yaklaşımının başarıyla hayata geçirilmesinde temel tamamlayıcı unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Politika ve planlama açısından değerlendirildiğinde, su–atık–iklim nexus yaklaşımı; çevresel baskıların kaynağını, etkilerini ve geri besleme mekanizmalarını birlikte ele alarak, iklim değişikliğine uyumlu ve çevresel dirençliliği artıran bir yönetim çerçevesi sunmaktadır. İzleme ve değerlendirme kapasitesinin güçlendirilmesi, veri temelli karar alma süreçlerinin yaygınlaştırılması ve çok aktörlü yönetişim yapılarının desteklenmesi, bu yaklaşımın uygulamadaki başarısını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, su, atık ve iklim sistemleri arasındaki karmaşık etkileşimlerin etkin biçimde yönetilebilmesi, yalnızca sektörel ve parçalı politikalarla değil; entegre, ölçek duyarlı ve veri temelli çevre yönetimi yaklaşımlarıyla mümkün olabilmektedir. İzleme ve değerlendirme kapasitesinin güçlendirilmesi, özellikle iklim değişikliğinin yarattığı belirsizlikler karşısında çevresel risklerin erken tespit edilmesine, kırılganlıkların belirlenmesine ve uyum stratejilerinin zamanında devreye alınmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu bağlamda dijitalleşme, izleme ve veri analitiğine dayalı teknolojiler, başlı başına bir amaç olarak değil; su–atık–iklim nexus'unun bütüncül biçimde ele alınmasını destekleyen tamamlayıcı ve kolaylaştırıcı araçlar olarak değerlendirilmelidir. Bu

yaklaşımın politika, planlama ve uygulama süreçlerine sistematik biçimde entegre edilmesi, çevresel dirençliliğin artırılması ve sürdürülebilir çevre yönetimi hedeflerine ulaşılması açısından belirleyici bir rol üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

Abalasei, M. E., Toma, D., Dorus, M., ve Teodosiu, C. (2025). The Impact of Climate Change on Water Quality: A Critical Analysis. *Water*, 17(21), 3108.

AEA, (2012). Increasing the climate resilience of waste infrastructure. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/183933/climate-resilience-full.pdf (21.12.2025).

Ahmed, S., ve Ismail, S. (2018). Water pollution and its sources, effects & management: A case study of Delhi. *International Journal of Current Advanced Research*, 7(2), 10436-10442.

Akdoğan, Z., Küçükdoğan, A., ve Güven, B. (2015). Yayılı kirleticilerin havzalardaki taşınım süreçleri: Antibiyotikler, ağır metaller ve besi maddeleri üzerine modelleme yaklaşımları. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 27(1), 21-31.

Allouche, J., Middleton, C., ve Gyawali, D. (2015). Technical veil, hidden politics: Interrogating the power linkages behind the nexus. *Water Alternatives*, 8(1).

Bogner, J., Ahmed, M. A., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., ... ve Zhang, T. (2007). Waste management. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Cambridge University Press.

Büttner, O., Jawitz, J. W., Birk, S., ve Borchardt, D. (2022). Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe. *Water Research*, 217, 118382.

C40 Cities, (2020). Reducing climate change impacts on Waste Systems. https://c40.my.salesforce.com/sfc/p/#36000001Enhz/a/1Q000000kVO1/9Hz9BFa7AmBWp8oOnjOnuVY06iouj6JTDufbEUkvMQc (21.12.2025).

Chapra, S. C., Camacho, L. A., ve McBride, G. B. (2021). Impact of global warming on dissolved oxygen and BOD assimilative capacity of the world's rivers: modeling analysis. W*ater*, 13(17), 2408.

Grison, C., Koop, S., Eisenreich, S., Hofman, J., Chang, I. S., Wu, J., ... ve Van Leeuwen, K. (2023). Integrated water resources management in cities in the world: global challenges. *Water Resources Management*, 37(6), 2787-2803.

Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Hu, C., Zhang, J., Qi, B., Du, R., Xu, X., Xiong, H., ... ve Xiao, W. (2023). Global warming will largely increase waste treatment CH_4 emissions in Chinese megacities: insight from the first city-scale CH_4 concentration observation network in Hangzhou, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(7), 4501-4520.

Hughes, J., Cowper-Heays, K., Olesson, E., Bell, R., ve Stroombergen, A. (2021). Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management*, 31: 100262.

IPCC, (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf (21.12.2025).

Işınkaralar, Ö., Işınkaralar, K., Şevik, H., ve Küçük, Ö. (2023). Bio-climatic comfort and climate change nexus: A case study in Burdur basin. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 23(3), 241-249.

Islam, M. M., Hasan, M., Mia, M. S., Al Masud, A., ve Islam, A. R. M. T. (2025). Early warning systems in climate risk management: Roles and implementations in eradicating barriers and overcoming challenges. *Natural Hazards Research.*

Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., ve Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336.

Koontz, T. M., ve Thomas, C. W. (2006). What do we know and need to know about the environmental outcomes of collaborative management? *Public Administration Review*, 66, 111-121.

Kurian, M., ve Ardakanian, R. (2014). The nexus approach to governance of environmental resources considering global change. *In Governing the Nexus: Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change*.

Laureti, L., Costantiello, A., Anobile, F., Leogrande, A., ve Magazzino, C. (2024). Waste management and innovation: insights from Europe. *Recycling*, 9(5), 82.

Lebreton, L. C., van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., ve Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611.

Li, J., Li, X., Liu, H., Gao, L., Wang, W., Wang, Z., ... ve Wang, Q. (2023). Climate change impacts on wastewater infrastructure: A systematic review and typological adaptation strategy. *Water Research*, 242, 120282.

Liu, J., Hull, V., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., ...ve Li, S. (2018). Nexus approaches to global sustainable development. *Nature Sustainability*, 1(9), 466-476.

Misganaw, A. (2023). Assessment of potential environmental impacts and sustainable management of municipal solid waste using the DPSIRO framework: a case study of Bahir Dar, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2), 297.

Moghadam, E. S., Sadeghi, S. H., Zarghami, M., ve Delavar, M. (2023). Developing sustainable land-use patterns at watershed scale using nexus of soil, water, energy, and food. *Science of The Total Environment*, 856, 158935.

Newig, J., Jager, N. W., Challies, E., ve Kochskämper, E. (2023). Does stakeholder participation improve environmental governance? Evidence from a meta-analysis of 305 case studies. *Global Environmental Change*, 82, 102705.

Nyika, J., Dinka, M., ve Onyari, E. (2022). Effects of landfill leachate on groundwater and its suitability for use. *Materials Today: Proceedings*, 57, 958-963.

OECD, (2025). Sustainable and resilient infrastructure. https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/sustainable-and-resilient-infrastructure.html (21.12.2025).

Pahl-Wostl, C., Knieper, C., Lukat, E., Meergans, F., Schoderer, M., Schütze, N., ... ve Vidaurre, R. (2020). Enhancing the capacity of water governance to deal with complex management challenges: A framework of analysis. *Environmental Science & Policy*, 107, 23-35.

Papadopoulou, C. A., Kourtis, I. M., Laspidou, C., Tsihrintzis, V. A., ve Papadopoulou, M. P. (2025). An integrated methodology for systematic stakeholder engagement in environmental decision-making under the Water-Energy-Food-Ecosystems nexus framework. *Environmental Development*, 101268.

Raimi, M. O., Abiola, I., ve Omini, D. E. (2021). Exploring how human activities disturb the balance of biogeochemical cycles: evidence from the carbon, nitrogen and hydrologic cycles. Nitrogen and Hydrologic Cycles. *Research on World Agricultural Economy*, 2(3).

Rajmohan, K. V. S., Ramya, C., Viswanathan, M. R., ve Varjani, S. (2019). Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72-84.

Rakib, M. R. J., Sarker, A., Ram, K., Uddin, M. G., Walker, T. R., Chowdhury, T., ... ve Idris, A. M. (2023). Microplastic toxicity in aquatic organisms and aquatic ecosystems: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(1), 52.

Ríos-Fuster, B., Alomar, C., ve Deudero, S. (2025). The seafloor under study: analysis of substrate and habitat influence on the distribution of benthic litter. *Environmental Pollution*, 384, 126940.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... ve Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475.

Singh, M. R., & Gupta, A. (2016). Water pollution-sources, effects and control. *Centre for Biodiversity, Department of Botany,* Nagaland University, 1-16.

Skenderovic, I., Kalac, B., ve Becirovic, S. (2015). Environmental pollution and waste management. *Balkan Journal of Health Science*, 3(1), 2-10.

Ubuoh, E. A., Nwogu, F. U., Ofoegbu, C. C., ve Chikezie, P. C. (2023). Environmental pollution loads on surface water chemistry and potentially ecological risks of inland aquatic ecosystem in South-Eastern State, Nigeria. *Environmental Systems Research*, 12(1), 22.

UNDP, (2018). Nature-based Solutions for Water. World Water Development Report 2018. United Nations Development Programme. https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018 (21.12.2025).

UNDP, 2025. What are early warning systems and why do they matter for climate action? United Nations Development Programme. https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-are-early-warning-systems-and-why-do-they-matter-climate-action (21.12.2025).

UNEP, (2016). A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment. United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/resources/publication/snapshot-report-worlds-water-quality (21.12.2025).

UNEP, (2024). Global Waste Management Outlook 2024. United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/rest/api/core/bitstreams/daa56f4d-2479-4e10-88c6-4d65da463299/content (21.12.2025).
UNESCO, (2020). Water and Climate Change. The United Nations World Water Development Report 2020.

Plastisfer: Mikroplastik Yüzeyindeki Mikrobiyal Ekosistem ve Çevresel Riskler

Züleyha REÇBER[1]

1- Doç. Dr.; Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
zuleyha.recber@igdir.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2472-9077

ÖZET

Mikroplastik kirliliği, küresel ölçekte artan plastik üretimi ve yetersiz atık yönetimi uygulamaları sonucunda günümüzün en önemli çevresel sorunlarından biri hâline gelmiştir. Deniz, tatlı su ve karasal ekosistemlerde yaygın olarak tespit edilen mikroplastikler, yalnızca fiziksel kirleticiler olarak değil, aynı zamanda mikroorganizmalar için dayanıklı ve taşınabilir bir alt tabaka oluşturarak özgün mikrobiyal toplulukların gelişimine olanak tanımaktadır. Mikroplastik yüzeylerinde oluşan bu mikrobiyal biyofilm yapıları, literatürde "plastisfer" olarak tanımlanmakta ve doğal partiküllerden farklı ekolojik özellikler sergilemektedir.

Bu kitap bölümünün amacı, plastisfer kavramını mikrobiyal ekoloji ve çevresel riskler perspektifinden bütüncül bir yaklaşımla ele almak ve mikroplastik–mikroorganizma etkileşimlerinin ekosistemler üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmektir. Bu kapsamda, mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, plastisferin oluşum ve gelişim mekanizmaları, mikrobiyal bileşimi ve çevresel faktörlerle ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca plastisferin ağır metaller, organik kirleticiler, antibiyotik direnç genleri ve patojen mikroorganizmalar için bir taşıyıcı ve yoğunlaşma ortamı oluşturma potansiyeli tartışılmıştır.

Elde edilen bulgular, plastisferin yalnızca mikrobiyal kolonizasyonun pasif bir sonucu olmadığını, aksine kirletici taşınımı, ekosistem fonksiyonları ve halk sağlığı açısından önemli riskler barındıran yeni bir insan kaynaklı mikrohabitat olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, plastisferin çevresel risk değerlendirmelerinde dikkate alınması ve gelecekteki araştırmalarda standart yöntemlerin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Mikroplastik kirliliği, plastisfer, mikrobiyal biyofilm, sucul ekosistemler, çevresel riskler

GİRİŞ

Plastik üretimi son yetmiş yılda hızlı bir artış göstermiş ve küresel ölçekte çevresel kirliliğin en önemli bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Dünya genelinde yıllık plastik üretimi 460 milyon tonu aşmakta ve bu miktarın önemli bir bölümü etkin atık yönetim sistemlerine dâhil edilemeden çevreye karışmaktadır (Prasittisopin, 2025:8717). Bu durum, büyük boyutlu plastiklerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda mikroplastiklere dönüşmesine ve bu partiküllerin deniz, tatlı su ve karasal ekosistemlerde yaygın olarak bulunmasına yol açmaktadır (Cole vd., 2011:2589).

Mikroplastiklerin yaygınlığı, yalnızca miktarlarıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yüksek kalıcılıkları ve uzun mesafeli taşınım

potansiyelleri nedeniyle önemli bir çevresel sorun teşkil etmektedir. Atmosferik taşınım, yüzey akışı, nehirler ve okyanus akıntıları aracılığıyla taşınabilen mikroplastikler, bu özellikleri sayesinde yerel bir problem olmaktan çıkarak küresel bir tehdit hâline gelmektedir (Lebreton vd., 2017:2).

Mikroplastikler, çevrede sadece fiziksel kirleticiler olarak bulunmamakta; aynı zamanda ekosistem süreçlerini doğrudan ve dolaylı olarak etkileyebilen çok yönlü bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Sucul ekosistemlerde mikroplastikler su kolonunda tutulabilmekte, sedimanlarda birikebilmekte ve çeşitli organizmalar tarafından yutulabilmektedir (Wright vd., 2013:486). Bu etkileşimler, besin zinciri boyunca madde ve enerji akışını etkilemekte ve ekosistem dengeleri üzerinde potansiyel riskler oluşturmaktadır.

Karasal ekosistemlerde ise mikroplastikler; tarımsal faaliyetler, arıtma çamurlarının toprakta kullanımı, plastik bazlı malçlar ve atmosferik çökelim yoluyla yayılım göstermektedir. Toprak yapısını, mikrobiyal aktiviteyi ve su tutma kapasitesini etkileyebilen mikroplastikler, ekosistem fonksiyonları üzerinde dolaylı ancak uzun vadeli sonuçlar doğurmaktadır (Rillig ve Lehmann, 2020:2).

Mikroplastikler, çevresel ortamlarda mikroorganizmalar tarafından kolaylıkla kolonize edilebilen ve uzun mesafelere taşınabilen dayanıklı bir alt tabaka oluşturmaktadır. Hidrofobik yüzey özellikleri ve çevresel yaşlanma süreçleri, mikroplastiklerin mikroorganizmaların tutunmasına elverişli koşullar sunmasına neden olmakta; bu durum mikrobiyal biyofilm gelişimini desteklemektedir. Mikroplastik yüzeylerinde oluşan bu biyofilmler, potansiyel patojen mikroorganizmaları ve zararlı alg türlerini barındırabilmekte, böylece çevresel ve ekolojik risklerin artmasına katkıda bulunmaktadır (Zettler vd., 2013:7137; Amaral-Zettler vd., 2020:139).

Bu doğrultuda, mikroplastik yüzeylerinde gelişen özgün mikrobiyal topluluklarını tanımlamak amacıyla "plastisfer" kavramı kullanılmaktadır. Plastisfer, insan kaynaklı plastik materyaller üzerinde oluşan ve doğal partiküllerden farklı yapısal ve fonksiyonel özellikler sergileyen yeni bir mikrobiyal ekosistemi ifade etmektedir (Amaral-Zettler vd., 2020:139). Bu yeni ekosistem, mikroplastiklerin basit birer fiziksel kirletici olmadığını, aynı zamanda mikroorganizmalar için özgün yaşam alanları oluşturarak çevresel süreçlere etkin biçimde katıldığını göstermektedir.

Plastisferin ekolojik önemi, yalnızca mikroplastik yüzeylerinde biyofilm oluşumu ile sınırlı olmayıp, bu yapıların doğal partiküller üzerinde gelişen biyofilmlerden farklı çevresel koşullar ve seçilim baskıları altında şekillenmesiyle daha da belirgin hâle gelmektedir. Plastik yüzeylerin polimerik yapısı, hidrofobik karakteri ve çevresel yaşlanma süreçleri sonucunda kazandığı kimyasal heterojenlik, plastisfer topluluklarının taksonomik ve fonksiyonel açıdan özgünleşmesine neden olmaktadır (Rummel vd., 2017:259; Miao vd., 2023:2). Bu özellikler, plastisferin klasik

bir yüzey biyofilminden ziyade çevresel koşullara duyarlı yeni bir mikrobiyal niş olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Son yıllarda yüksek verimli dizileme teknikleri, metagenomik yaklaşımlar ve moleküler ekoloji temelli analizlerin yaygınlaşması, plastisfer mikrobiyomunun yapısal ve işlevsel özelliklerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamıştır. Bu çalışmalar, plastisferin karbon ve besin döngülerindeki rolü, genetik çeşitliliği ve direnç genleri açısından çevredeki serbest yaşayan mikrobiyal topluluklardan anlamlı biçimde ayrıldığını göstermektedir (Wright vd., 2020:11659; Luo vd., 2022:2-3).

Bu kitap bölümünün amacı, mikroplastik yüzeylerinde gelişen mikrobiyal ekosistemleri bütüncül bir yaklaşımla ele almak ve plastisferin çevresel riskler bağlamındaki rolünü kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bölüm kapsamında mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, plastisferin oluşum mekanizmaları, mikrobiyal bileşimi ve çevresel faktörlerle etkileşimi ayrıntılı olarak incelenmektedir. Ayrıca plastisferin ağır metaller, organik kirleticiler, antibiyotik direnç genleri ve patojen mikroorganizmalarla olan ilişkisi güncel literatür ışığında tartışılmaktadır. Bu çerçevede plastisferin ekosistem fonksiyonları ve potansiyel etkileri değerlendirilmekte; mevcut bilgi boşlukları ve gelecekteki araştırma gereksinimleri ortaya konulmaktadır.

MİKROPLASTİKLERİN OLUŞUMU, SINIFLANDIRILMASI VE FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

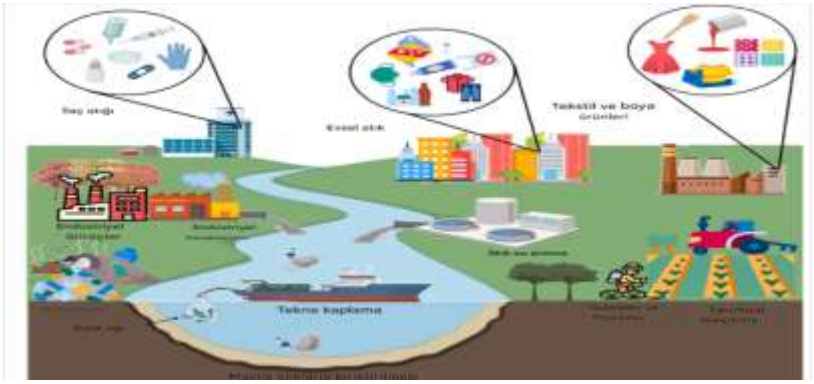
Mikroplastikler, kalıcı yapıları, geniş yayılımları ve fizikokimyasal çeşitlilikleri nedeniyle son yıllarda çevre bilimlerinde önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Bu parçacıkların davranışları, kaynakları, morfolojik yapıları ve yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Mikroplastiklerin oluşum süreçleri ve fizikokimyasal özellikleri, taşınımını, seyrini ve biyolojik etkileşim potansiyelini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Mikroplastikler: Tanımı ve Oluşum Süreçleri

Mikroplastikler, genel olarak çapı 5 mm'den küçük plastik parçacıklar olarak tanımlanmakta ve günümüzde sucul, karasal ve atmosferik ortamlarda yaygın olarak tespit edilmektedir (Hale vd., 2020:1). Mikroplastikler, oluşum süreçlerine bağlı olarak birincil ve ikincil mikroplastikler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Şekil 1'de mikroplastiklerin başlıca kaynakları şematik olarak gösterilmiştir.

Birincil mikroplastikler, üretim aşamasında doğrudan mikrometre veya milimetre ölçeğinde tasarlanan ve çevreye bu boyutlarda salınan plastik partikülleri kapsamaktadır. Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde kullanılan mikroboncuklar, endüstriyel temizlik ve aşındırma uygulamalarında yer alan plastik bazlı tanecikler ile plastik üretim süreçlerinde kullanılan reçine peletleri bu gruba dâhil edilmektedir (Cole vd., 2011:2589).

İkincil mikroplastikler, daha büyük plastik ürünlerin ultraviyole (UV) ışınımı, termal stres, mekanik aşınma ve oksidatif süreçler gibi çevresel etmenler etkisiyle zaman içerisinde parçalanması sonucu oluşmaktadır. (Cole vd., 2011:2589; Laskar ve Kumar, 2019:2). Çevresel ortamlarda miktar bakımından baskın fraksiyonu oluşturan ikincil mikroplastikler, plastik kirliliğinin sürekliliğini artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır.



Şekil 1: Mikroplastiklerin başlıca kaynakları (Behera ve Das, 2023:3)

Mikroplastiklerin Morfolojik Özellikleri

Mikroplastikler, çevresel ortamlarda yüksek derecede heterojen bir yapı sergileyerek küresel veya silindirik taneciklerden, yüksek en–boy oranına sahip lif ve filamentlere kadar geniş bir morfolojik çeşitlilik göstermektedir (Hidalgo-Ruz vd., 2012:3060; Hartmann vd., 2019:1042). Çevresel örneklerde mikroplastiklerin morfolojik özelliklerine dayalı sınıflandırma, karmaşık analitik tekniklere ihtiyaç duyulmaksızın uygulanabilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, parçalar, lifler, filmler, köpükler, peletler, boncuklar ve filamentler gibi morfolojik tanımlar aracılığıyla mikroplastiklerin olası kaynakları ve çevresel kaderleri hakkında bilgi sağlamaktadır (Hidalgo-Ruz vd., 2012:3060; Rosal, 2021:2). Örneğin lifler çoğunlukla sentetik tekstil, peletler plastik üretimi, boncuklar ise birincil mikroplastik kullanımı ile ilişkilendirilmektedir (Hartmann vd., 2019:1044).

Bununla birlikte, mikroplastiklerin üç boyutlu ve düzensiz yapıları, morfolojik tanımlamayı zorlaştırmakta ve sınıflandırmalarda öznel değerlendirmelere yol açmaktadır. Bu nedenle literatürde kullanılan terminoloji ve kategori sayıları farklılık göstermektedir (Rosal, 2021:2). Bu soruna çözüm olarak GESAMP, mikroplastikleri morfolojik özelliklerine göre parçalar, köpükler, filmler, çizgiler ve peletler olmak üzere beş ana kategori altında tanımlayarak çalışmalar arasında veri uyumu ve karşılaştırılabilirlik sağlamayı amaçlamıştır (GESAMP, 2019:11). Ancak bu yaklaşım, pratik olmasına rağmen standartlaştırma eksikliği ve öznellik nedeniyle sınırlılıklar içermektedir (Rosal, 2021:2).

Polimer Türleri

Çevresel ortamlarda en yaygın olarak tespit edilen mikroplastikler; polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) gibi sentetik polimerlerden oluşmaktadır (Lithner vd., 2011:3312-3315). Bu polimerler, yoğunluk, kristalin yapı ve içerdiği katkı maddeleri bakımından birbirlerinden farklı özellikler sergilemektedir.

Polimer türü, mikroplastiklerin su kolonundaki yüzme veya batma davranışlarını, sedimanla etkileşimlerini ve çevresel dağılımlarını belirleyen temel faktörlerden biridir. Düşük yoğunluklu polimerler genellikle su yüzeyinde veya su kolonunda askıda kalırken, yüksek yoğunluklu polimerler sedimanlarda birikme eğilimi göstermektedir (Kooi vd., 2017:7963). Bu farklılıklar, mikroplastiklerin çevresel kaderi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Yüzey Pürüzlülüğü, Hidrofobiklik ve Yaşlanma Süreçleri

Mikroplastiklerin yüzey kimyası, çevresel etkileşimlerini belirleyen en kritik fizikokimyasal özelliklerden biridir. Yeni üretilmiş plastikler genellikle pürüzsüz ve yüksek hidrofobik yüzeylere sahipken, çevresel ortamlarda zamanla yüzey özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir (Tu vd., 2020:1). Hidrofobik yüzeyler, çevredeki organik maddeler ve diğer partiküllerle etkileşime girmeye daha yatkın olup, yüzey adsorpsiyon süreçlerini teşvik etmektedir.

Çevresel yaşlanma süreçleriyle birlikte mikroplastik yüzeylerinde karbonil ve karboksil gibi oksijen içeren fonksiyonel gruplar oluşmaktadır. Bu değişimler, mikroplastik yüzeyinin hidrofobik–hidrofilik dengesini ve yüzey yükünü etkileyerek çevredeki diğer bileşenlerle kurduğu etkileşimlerin niteliğini belirlemektedir (Adeleye vd., 2024:481).

Çevresel Bozunma Süreçleri

Mikroplastikler, çevresel ortamlarda fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozunma süreçlerine maruz kalmaktadır. Ultraviyole (UV) ışınımı, oksidasyon, sıcaklık dalgalanmaları ve mekanik etkileşimler, plastik materyallerin yapısal bütünlüğünü zayıflatarak yüzey morfolojisinde değişimlere neden olmaktadır (Rummel vd., 2017:260). Bu süreçler, mikroplastik yüzeyinde çatlakların ve gözeneklerin oluşmasına yol açarak yüzey alanını artırmaktadır.

Sucul ortamlarda mikroplastikler, çözünmüş organik madde, inorganik iyonlar ve iz elementlerle sürekli etkileşim hâlinde bulunmakta; bu etkileşimler sonucunda yüzeylerinde değişimler meydana gelmektedir (Adeleye vd., 2024:484). Ortama özgü sıcaklık, pH ve iyonik güç koşulları, mikroplastiklerin bozunma hızını ve yüzey özelliklerinin dönüşümünü belirleyen başlıca çevresel faktörlerdir.

Bu bağlamda, mikroplastiklerin oluşum kökeni, morfolojik yapısı ve fizikokimyasal özellikleri; çevresel ortamlardaki davranışlarını ve sonraki etkileşim süreçlerini belirleyen temel altyapıyı oluşturmaktadır.

PLASTİSFERİN TANIMI VE EKOLOJİK ÖNEMİ

Plastisfer Kavramının Ortaya Çıkışı ve Tanımı

Mikroplastiklerin çevresel ortamlarda yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sentetik yüzeyler üzerinde gelişen özgün mikrobiyal toplulukları tanımlamak amacıyla plastisfer kavramı ortaya konulmuştur. Plastisfer, ilk kez Zettler vd. (2013:7137) tarafından, mikroplastik yüzeylerini kolonize eden mikroorganizmaların oluşturduğu özel bir mikrobiyal ekosistem olarak tanımlanmıştır. Bu kavram, mikroplastiklerin yalnızca pasif kirleticiler olmadığını; aynı zamanda mikroorganizmalar için yeni, kalıcı ve özgün yaşam alanları sunduğunu vurgulamaktadır (Yang vd., 2020:6502).

Plastisfer, mikroplastik yüzeyleri üzerinde gelişen biyofilm yapılarından oluşmakla birlikte, doğal partiküller üzerinde gelişen klasik biyofilmlerden hem yapısal hem de işlevsel açıdan ayrılmaktadır. Mikroplastiklerin polimerik yapısı, hidrofobik karakteri ve çevresel koşullar altında değişebilen yüzey kimyası, plastisferin mikrobiyal kompozisyonunu ve ekolojik özelliklerini özgün kılmaktadır (Rummel vd., 2017:262; Miao vd., 2019:2396).

Mikroplastiklerin Mikrobiyal Yaşam İçin Substrat Olarak Önemi

Mikroplastikler, çevresel ortamlarda uzun süre kalabilen, bozunmaya dirençli ve yüksek yüzey alanına sahip sentetik materyaller olmaları nedeniyle mikroorganizmalar için elverişli bir substrat sunmaktadır. Bu yüzeyler, doğal partiküllere kıyasla daha homojen bir yapı sergileyebilmekte ve mikrobiyal tutunma açısından farklı fizikokimyasal özellikler barındırmaktadır (Zettler vd., 2013:7137).

Mikroplastik yüzeylerinde gerçekleşen moleküler ve kimyasal etkileşimler, bu yüzeylerin mikroorganizmalar tarafından algılanma biçimini belirlemekte ve plastisfer topluluklarının özgünlüğüne katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, mikroplastikler, yalnızca rastlantısal kolonizasyon yüzeyleri değil; mikrobiyal yaşamın mekânsal olarak organize olabildiği özel mikrohabitatlar olarak değerlendirilmektedir (Oberbeckmann vd., 2018:2; Mulky vd., 2025:4).

Plastisferin Yapısal ve Ekolojik Özellikleri

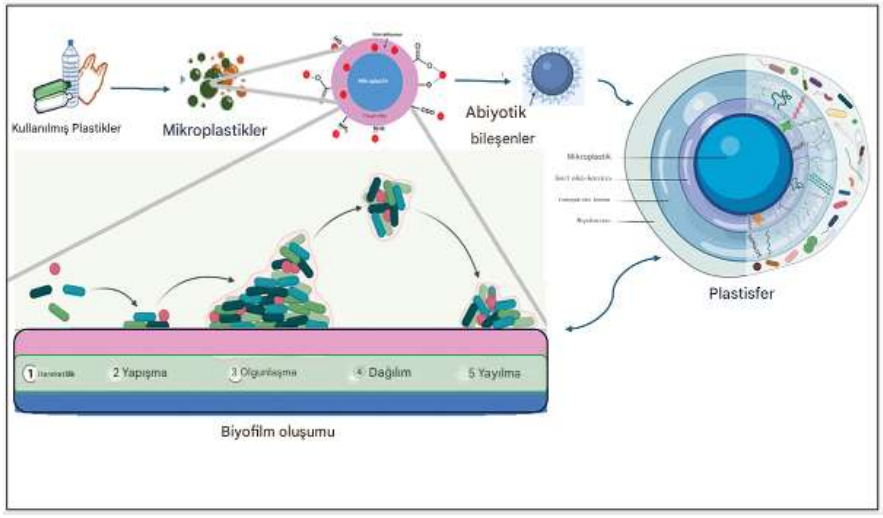
Plastisfer, mikroplastik yüzeyleri üzerinde yüksek mikrobiyal yoğunluk ve çeşitlilik barındırabilen üç boyutlu mikrohabitatlar oluşturmaktadır. Bu yapılar, mikroorganizmaların yalnızca yüzeye tutunduğu pasif alanlar olmayıp; aynı zamanda besin maddesi dönüşümü, metabolik etkileşimler ve mikrobiyal birlikteliklerin şekillendiği aktif ekolojik sistemlerdir (Zettler vd., 2013: 7138; Oberbeckmann vd., 2015:7137-7139).

Plastisfer içerisinde gelişen mikrobiyal etkileşimler, mikroplastiklerin çevresel ortamlardaki taşınımı, kalıcılığı ve ekolojik etkileri üzerinde belirleyici rol oynayabilmektedir. Bu yönüyle plastisfer, mikroplastiklerin

çevresel kaderini şekillendiren kritik bir biyolojik ara yüz olarak değerlendirilmektedir (Wright vd., 2020:11657).

PLASTİSFERİN OLUŞUMU VE MİKROBİYAL ARDIŞIKLIĞI

Plastisferin oluşumu, mikroplastiklerin çevresel ortamlara girdikten sonra geçirdiği fizikokimyasal dönüşümler ile mikrobiyal kolonizasyon süreçlerinin zamana bağlı olarak birbirini izlemesi sonucu gelişen, çok aşamalı ve dinamik bir süreçtir. Bu süreç, mikroplastiklerin yalnızca inert yüzeyler olmadığını; aksine mikrobiyal yaşam için aktif, seçici ve zamanla evrimleşen mikrohabitatlar sunduğunu ortaya koymaktadır (Zettler vd., 2013:7137). Şekil 2'de mikroplastik yüzeylerinde plastisfer oluşumunun aşamalarını gösteren kavramsal şema verilmiştir.



Şekil 2: Mikroplastik yüzeylerinde plastisfer oluşumu (Mulky vd., 2025:1)

Plastisfer İçin Fiziksel Altyapının Oluşumu

Plastisfer oluşumuna zemin hazırlayan ilk süreç, çevreye giren makroplastiklerin fiziksel ve kimyasal bozunma mekanizmalarıyla mikroplastiklere ayrışmasıdır (Dey vd., 2022:1). Dalgalar, sürtünme ve mekanik aşınma gibi fiziksel etmenler plastik materyallerin boyutunu küçültürken; ultraviyole (UV) ışınımına bağlı foto-oksidasyon süreçleri polimer zincirlerinin kırılmasına neden olmaktadır (Conradie vd., 2022:457).

Bu bozunma süreçleri sonucunda plastik yüzeylerinde hidroksi, karbonil ve karboksil gibi oksijen içeren fonksiyonel gruplar oluşmakta; yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal reaktivite artmaktadır (Conradie vd., 2022:457). Ortaya çıkan bu yüzey değişimleri, mikroplastikleri mikrobiyal tutunma için daha elverişli hâle getirerek plastisfer oluşumunun fiziksel temelini oluşturmaktadır (Behera ve Das, 2023:8).

Şartlandırma Tabakası (Eko-korona) Oluşumu ve İlk Tutunma

Mikroplastikler çevresel ortama girdikten kısa süre sonra, yüzeylerinde çözünmüş organik madde, proteinler, metabolitler ve hücre dışı polimerik maddelerin adsorpsiyonu ile bir şartlandırma tabakası (eko-korona) oluşmaktadır (Rummel vd., 2017:259).

Eko-korona, mikroplastiklerin yüzey yükünü, hidrofobiklik derecesini ve yüzey enerjisini değiştirerek mikroorganizmaların yüzeye yaklaşmasını ve ilk bağlanma süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Rummel vd., 2017:259). Negatif yüklü mikroplastik yüzeylerin Na^{+} ve Ca^{2+} gibi katyonlarla etkileşimi, mikroorganizmalar ile yüzey arasındaki elektrostatik itmeleri azaltarak mikrobiyal tutunmayı teşvik etmektedir (Zettler vd., 2013:7139; Oberbeckmann vd., 2014:481–484; Rummel vd., 2017:260–262). Bu aşama, plastisfer oluşumunun kritik başlangıç evresi olarak kabul edilmektedir.

Ön Kolonizatörler ve Mikrobiyal Ardışıklığın Başlangıcı

Şartlandırılmış mikroplastik yüzeyleri, kısa süre içerisinde mikroorganizmalar tarafından kolonize edilmeye başlanır. Plastisferin erken evrelerinde, çoğunlukla fototrof organizmalar öncü kolonizatörler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle diyatomlar, siyanobakteriler ve yeşil algler, mikroplastik yüzeylerinde yerleşen gruplar arasında tanımlanmaktadır (Nava vd., 2022:1410). Bu öncü organizmalar, plastisfer içerisinde birincil üretimi artırarak heterotrof bakteriler için uygun bir mikroortam oluşturmakta ve mikrobiyal ardışıklığın yönünü belirlemektedir (Zhai vd., 2023:3). Böylece plastisfer, zamanla daha karmaşık ve işlevsel bir mikrobiyal topluluğa doğru evrilmektedir.

Bakteriyel Biyofilm Gelişimi ve EPS Matrisi

Mikrobiyal ardışıklığın ilerleyen aşamalarında bakteriler plastisferin baskın bileşeni hâline gelmektedir. Erken dönemlerde Proteobacteria ve Bacteroidetes üyeleri öne çıkarken, zamanla Proteobacteria'nın plastisferin çekirdek bakteri grubunu oluşturduğu bildirilmektedir (Schlundt vd., 2020:625; Wright vd., 2021:1).

Bakteriyel kolonizasyonun artmasıyla birlikte hücre dışı polimerik maddelerin (EPS) üretimi yoğunlaşmakta ve mikroplastik yüzeylerinde daha organize biyofilm benzeri yapılar gelişmektedir (Flemming vd., 2016:564). EPS matrisi; polisakkaritler, proteinler, lipitler ve humik maddelerden oluşan karmaşık bir yapı sunarak mikroorganizmaların yüzeye geri dönüşümsüz biçimde tutunmasını sağlamaktadır (Naveed vd., 2019:1769). Aynı zamanda EPS, mikroorganizmaları hidrodinamik stres, UV radyasyonu ve besin dalgalanmalarına karşı koruyarak plastisferin yapısal kararlılığını artırmaktadır (Arias-Andres vd., 2019:234).

Plastisferin Olgunlaşması, Stabilitesi ve Dağılma Süreci

Plastisfer oluşumunun ileri aşamalarında mikrobiyal topluluklar daha yüksek çeşitlilik, fonksiyonel uzmanlaşma ve mekânsal organizasyon sergileyen olgun bir yapıya ulaşmaktadır. Bu olgun plastisfer, besin döngüleri, gen alışverişi ve mikroorganizmalar arası etkileşimlerin

yoğunlaştığı aktif bir mikro-ekosistem niteliği kazanmaktadır (Oberbeckmann vd., 2018:1).

Bununla birlikte çevresel stres faktörleri, besin sınırlaması ve fiziksel etkenler nedeniyle mikroorganizmalar plastisferden aktif ya da pasif olarak ayrılabilmektedir (Harrison vd., 2018:191-193). Bu ayrılma süreci, mikroplastiklerin mikroorganizmalar için bir taşıyıcı (vektör) görevi görmesine ve mikrobiyal toplulukların farklı ekosistemler arasında taşınmasına katkı sağlamaktadır (Zettler vd., 2013:7137).

Bu yönüyle plastisfer oluşumu, yalnızca yüzeye bağlı bir biyofilm gelişimi değil; aynı zamanda mikroorganizmaların çevresel dağılımını, etkileşimlerini ve ekosistemler arası bağlantılarını şekillendiren dinamik bir süreç olarak değerlendirilmektedir.

PLASTİSFER OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Mikroplastiklerin yüzeyinde biyofilm (plastisfer) oluşumu, mikroplastiklerin fizikokimyasal özellikleri ile bulundukları ortamın çevresel koşullarının etkileşimi sonucunda gelişen karmaşık ve çok faktörlü bir süreçtir (Tang, 2024). Bu faktörler, plastisferin oluşum hızını, mikrobiyal topluluk yapısını, biyofilm stabilitesini ve ekolojik işlevlerini de belirlemektedir (Oberbeckmann vd., 2018:1).

Mikroplastik Özelliklerinin Plastisfer Oluşumuna Etkisi

1.Polimer Türü

Polimer tipi, mikroplastik yüzeylerinde biyofilm oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden biridir. PP, PE, PS, PET ve PVC gibi plastik polimerlerin mikrobiyal kolonizasyon açısından farklı eğilimler sergilediği bildirilmektedir (Pinnell ve Turner, 2020:2). Deniz bakterileri ve diyatomların PS yüzeylerini PE ve PP yüzeylerine kıyasla daha yoğun kolonize ettiği; alg ve siyanobakterilerin ise PVC ve PET yüzeylerini tercih ettiği gözlemlenmiştir (Carson vd., 2013:126; Pinto vd., 2019:13).

Bununla birlikte, mikroorganizmaların belirli polimerlere yönelik seçici davranışlarının altında yatan mekanizmalar henüz tam olarak açıklanamamış olup, bu seçiciliğin yüzey enerjisi, kristanlik derecesi, hidrofobiklik ve bozunma sırasında açığa çıkan düşük molekül ağırlıklı bileşiklerle ilişkili olabileceği öne sürülmektedir (Yang vd., 2020; 6505).

2. Hidrofobiklik ve Yüzey Kimyası

Mikroplastiklerin hidrofobik veya hidrofilik özellikleri, plastisferin farklı gelişim aşamalarında belirleyici rol oynamaktadır. Hidrofobik yüzeyler, virüsler, bakteriler ve diğer mikroorganizmalar için uygun bir tutunma alanı sağlayarak mikroplastiklerin yeni bir mikrobiyal yaşam alanına dönüşmesine katkıda bulunmaktadır (Lu vd., 2019:96). Erken kolonizasyon evresinde, EPS üretimiyle birlikte hidrofilik yüzeylerin mikrobiyal tutunmayı kolaylaştırdığı; buna karşın biyofilmin olgunlaşma

aşamasında hidrofobik yüzeylerin biyofilm stabilitesini daha iyi desteklediği bildirilmiştir (Behera ve Das, 2023:8).

Biyofilm oluşumu ilerledikçe mikroplastik yüzey kimyası değişebilmekte ve biyofilm içeriğindeki hidrofilik fonksiyonel gruplar, mikroplastiklerin başlangıçtaki hidrofobikliğini azaltabilmektedir (Tu vd., 2020:1). Ayrıca, mikroplastik yüzeyine adsorbe olan çözünmüş organik maddelerin oluşturduğu şartlandırma tabakasının, yüzey kimyasını değiştirerek mikroorganizmaların bağlanma kinetiğini etkilediği bildirilmektedir (Rummel vd., 2021:11006).

3. Yüzey Pürüzlülüğü ve Bozunma

Yüzey pürüzlülüğü, mikroplastik yüzeylerinde biyofilm oluşumunu artıran temel fiziksel faktörlerden biridir. Pürüzlü yüzeyler, mikroorganizmalar için daha fazla tutunma noktası sunarak ilk kolonizasyonu kolaylaştırır (Mulky vd., 2025:5). Çevresel koşullar altında mikroplastiklerin fiziksel ve kimyasal bozunmaya uğraması, yüzey pürüzlülüğünü artırmakta ve mikroorganizmalar için daha elverişli bir mikrohabitat oluşturmaktadır (Rummel vd., 2017:258). UV ışınımı, mekanik aşınma ve oksidatif süreçler sonucu oluşan mikroçatlaklar, biyofilmin üç boyutlu yapısını destekleyerek plastisferin daha kararlı hâle gelmesine katkı sağlayabilmektedir (Rummel vd., 2017:260). Ayrıca pürüzlü yüzeyler, çevrede bulunan organik ve inorganik maddeleri adsorbe ederek bir "şartlandırma filmi" oluşturmakta ve bu film, biyofilm gelişimini dolaylı olarak desteklemektedir (Rummel vd., 2017:259; Behera ve Das, 2023:8).

4. Parçacık Boyutu

Mikroplastiklerin boyutu, yüzey alanı/hacim oranını belirleyerek plastisfer oluşumunu etkiler. Daha küçük boyutlu mikroplastikler, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle mikroorganizmalar için daha geniş kolonizasyon alanı sunmaktadır (Hou vd., 2021:1). Nanoplastikler ve bakteriler arasındaki etkileşim öncelikle nanoplastiklerin bakteri hücre zarlarıyla doğrudan temas etmesinden ve oksidatif stresin tetiklenmesinden kaynaklanmaktadır; bu durum bakteriyel büyümeyi, biyofilm oluşumunu ve hücresel işlevleri etkilemektedir (Wang vd., 2023:1).

Çevresel Faktörlerin Plastisfer Oluşumuna Etkisi

1. Besin Maddeleri

Besin maddelerinin bulunabilirliği, mikroplastik yüzeylerinde biyofilm oluşumunu belirleyen en baskın çevresel faktörlerden biridir. Toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonlarının artışı, biyofilm büyüme hızını artırırken mikrobiyal topluluk çeşitliliğini azaltabilmektedir (Behera ve Das, 2023:9). Yüksek besin koşullarında biyofilm oluşumu hızlansa da, aşırı besin yükü planktonik mikroorganizmalar için daha erişilebilir olduğundan mikroplastik yüzeyine yapışmayı sınırlayabilmektedir (Stanley ve Lazazzera, 2004:917).

Oligotrofik ortamlarda ise mikroplastikler, mikroorganizmalar için besin açısından zengin mikro-nişler oluşturarak plastisferin çevresel önemini

artırmaktadır (Zettler vd., 2013:7141). Ayrıca mikroplastiklerin bozunması sırasında salınan çözünmüş organik maddeler, mikroorganizmalar için ek karbon kaynağı oluşturarak biyofilm gelişimini desteklemektedir (Roager ve Sonnenschein, 2019:4).

2. Tuzluluk

Tuzluluk, biyofilmlerin büyüme hızı, mikrobiyal çeşitliliği ve topluluk yapısı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Çeşitli çalışmalar, tuzluluğun biyofilm büyüme hızıyla negatif, mikrobiyal çeşitlilikle ise pozitif korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur (Oberbeckmann vd., 2018:1; Behera ve Das, 2023:7). Özellikle haliç ve geçiş zonlarında, tuzluluk gradyanları mikroplastik yüzeylerinde daha karmaşık mikrobiyal toplulukların oluşmasına neden olmaktadır (Gökdağ vd., 2025:3989). Bu durum, plastisferin çevresel koşullara duyarlı ve dinamik bir mikrobiyal sistem olduğunu göstermektedir.

3. Sıcaklık

Sıcaklık, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini ve enzimatik süreçlerini düzenleyerek plastisfer oluşumunu doğrudan etkiler (Behera ve Das, 2023:7). Genel olarak sıcaklık artışı mikrobiyal çeşitliliği artırırken, mikrobiyal yoğunluk üzerinde sınırlayıcı bir etki oluşturabilmektedir. Mevsimsel sıcaklık değişimleri, biyofilm kalınlığı ve gelişim süresinde belirgin farklılıklara yol açmakta; yaz aylarında daha kalın biyofilmler gözlemlenmektedir (Zhang vd., 2021:1-2).

4. Hidrodinamik Koşullar

Akış hızı ve hidrodinamik koşullar, mikroplastik yüzeylerinde biyofilm stabilitesini belirleyen önemli fiziksel faktörlerdir. Düşük Reynolds sayısına sahip ortamlarda mikroorganizmaların mikroplastik yüzeyine tutunması kolaylaşırken, yüksek akış hızları biyofilm kümelerinin boyutunu sınırlandırmakta ve biyofilm gelişimini zorlaştırmaktadır (Thomen vd., 2017:2-4). Bu durum, göl ve nehir ekosistemlerinde plastisfer yapısının ve biyokütlesinin farklılaşmasına neden olmaktadır (Khaleel vd., 2025:1). Ayrıca hidrodinamik stres, biyofilm içi tür seçilimini etkileyerek daha dayanıklı mikrobiyal toplulukların gelişmesine yol açabilmektedir (Portas vd., 2024:13).

5. Ortama Bağlı Dinamikler

Plastisfer oluşumu ve gelişimi, mikroplastiklerin bulunduğu çevresel ortamın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Tatlı su, deniz ve karasal ekosistemler; hidrodinamik rejimler, besin erişilebilirliği, biyolojik üretkenlik ve çevresel stres faktörleri bakımından birbirinden ayrılmakta ve bu farklılıklar plastisferin mikrobiyal yapısını ve biyofilm organizasyonunu doğrudan etkilemektedir (Oberbeckmann vd., 2018:2-4).

***Tatlı Su Sistemleri*:** Tatlı su sistemlerinde, göller ve nehirler gibi nispeten kapalı veya yarı kapalı ortamlarda mikroplastikler daha uzun süre askıda kalabilmekte ve değişken besin girdilerine maruz kalmaktadır. Bu durum,

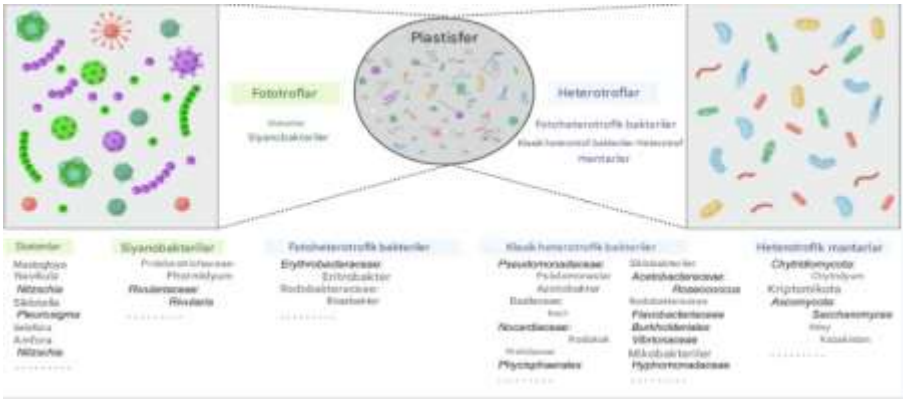
plastisfer üzerinde hızlı mikrobiyal kolonizasyonu ve yüksek biyofilm üretimini teşvik etmektedir. Tatlı sularda plastisferin, çevredeki doğal partiküllere kıyasla farklı ve seçilmiş mikrobiyal topluluklar barındırabildiği; özellikle Proteobacteria ve Bacteroidetes gibi grupların baskın hâle gelebildiği bildirilmektedir (Hoellein vd., 2014:6; McCormick vd., 2016:10-11).

Denizel Ortamlar: Denizel ortamlarda plastisfer dinamikleri, yüksek tuzluluk, dalga etkisi ve geniş ölçekli su hareketleri tarafından şekillendirilmektedir. Deniz mikroplastikleri, yüzen sert substratlar olarak görev yapmakta ve özellikle açık okyanus koşullarında mikroorganizmalar için nadir bulunan tutunma yüzeyleri sunmaktadır. Bu kapsamda, deniz plastisferinin; diyatomlar, siyanobakteriler ve filamentli bakteriler ile başlayan kolonizasyon süreçleri sonucunda karmaşık ve çok katmanlı biyofilm yapıları geliştirdiği gösterilmiştir (Bryant vd., 2016:7). Ayrıca denizel plastisferlerin, mikroorganizmalar için uzun mesafeli taşınım vektörü olarak işlev görebildiği ve biyocoğrafik dağılımları etkileyebildiği vurgulanmaktadır (Zhai vd., 2023:6).

Karasal Sistemler: Karasal sistemlerde ise plastisfer oluşumu, düşük nem, yüksek UV maruziyeti ve sıcaklık dalgalanmaları gibi stres faktörlerinin etkisi altında gerçekleşmektedir. Toprak ortamındaki mikroplastikler, mineral yüzeyler ve organik madde ile yoğun etkileşim hâlinde olup, plastisfer gelişimi daha yavaş ancak çevresel strese dayanıklı mikroorganizmalar tarafından domine edilmektedir. Karasal plastisferlerde özellikle Actinobacteria ve Proteobacteria gruplarının baskın olduğu, biyofilm yapıların ise genellikle ince fakat yüksek adaptasyon kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir (MacLean vd., 2021:7).

PLASTİSFERİN MİKROBİYAL YAPISI

Plastisferin mikrobiyal yapısı, mikroplastik yüzeylerde gerçekleşen fizikokimyasal dönüşümler, eko-korona oluşumu ve zamana bağlı mikrobiyal ardışıklık süreçlerinin bir sonucu olarak şekillenmektedir. Bu nedenle plastisfer mikrobiyomu, çevredeki serbest yaşayan mikrobiyal topluluklardan farklı, seçici ve dinamik bir organizasyon sergilemektedir (Zettler vd., 2013:7141; Oberbeckmann vd., 2015:551). Oluşum sürecinde gelişen bu seçicilik, plastisferin hem taksonomik bileşimini hem de ekolojik işlevlerini belirleyen temel faktörlerden biridir. Şekil 3'de plastisferin baskın mikrobiyal grupları ve yapısal organizasyonu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3: Plastisferin mikrobiyal grupları (Du vd., 2022:979)

Plastisferde Baskın Mikrobiyal Gruplar ve Yapısal Organizasyon

Plastisferlerde gözlemlenen mikrobiyal topluluklar, ortam türü, mikroplastik polimerinin kimyasal yapısı ve biyofilm olgunluk düzeyine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte farklı ekosistemlerde yürütülen çalışmalar, Proteobacteria ve Bacteroidetes filumlarının plastisferin çekirdek mikrobiyal bileşenlerini oluşturduğunu ortaya koymuştur (Zettler vd., 2013:7140; Schlundt vd., 2020:622).

Mikrobiyal ardışıklığın erken evrelerinde yüzeye hızla tutunabilen ve EPS üretme kapasitesi yüksek bakteriler seçilirken, ilerleyen aşamalarda Proteobacteria üyelerinin baskınlığı artmakta ve daha kararlı bir biyofilm yapısı oluşmaktadır. Actinobacteria üyeleri de, besin dönüşümü, stres toleransı ve ekolojik uyum süreçlerinde destekleyici roller üstlenmektedir (Zettler vd., 2013:7143; Oberbeckmann vd., 2016:12; Wright vd., 2021:796).

Mikroplastiklerin yüzey pürüzlülüğü, hidrofobikliği ve fonksiyonel grup içeriği, mikrobiyal tutunma ve mekânsal dağılım üzerinde belirleyici olmakta; bu durum plastisfer biyofilmlerinde belirgin bir yapısal heterojenliğe yol açmaktadır (Behera ve Das, 2023:6).

Algler, Fototroflar ve Ototrof–Heterotrof Etkileşimler

Plastisferin mikrobiyal yapısı, yalnızca heterotrof bakterilerden değil; aynı zamanda algler, siyanobakteriler ve fototrof mikroorganizmalardan oluşan çok bileşenli bir sistemdir (Zettler vd., 2013:7140). Özellikle oluşum sürecinin erken evrelerinde plastisfere yerleşen diyatomlar, yeşil algler ve siyanobakteriler, plastisfer içindeki birincil üretimin temel kaynağını oluşturmaktadır (Nava vd., 2022:1410; Hitchcock, 2022:1).

Fototrof organizmalar tarafından üretilen organik karbon, heterotrof bakterilerin metabolik faaliyetlerini destekleyerek EPS üretimini artırmakta ve biyofilm matrisinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır (Mulky vd., 2025:3; Wright vd., 2020:11656-11660). Bu ototrof–heterotrof etkileşimler, plastisferin kolonize edilmiş bir yüzey olmakla birlikte metabolik iş birliği ve enerji akışının da gerçekleştiği işlevsel bir mikro-ekosistem olduğunu ortaya koymaktadır (Mayali, 2018:3).

Mikrobiyal Ardışıklığın Yapısal ve Fonksiyonel Sonuçları

Plastisferde gerçekleşen mikrobiyal ardışıklık, tür kompozisyonunda ve ekolojik işlevlerde belirgin değişimlere yol açmaktadır. Erken evrelerde basit ve gevşek organize olmuş biyofilmler baskınken, zamanla EPS açısından zengin, çok katmanlı ve metabolik olarak entegre yapılar gelişmektedir (Flemming vd., 2016:564-565). Bu süreçte plastisfer mikrobiyomu, besin sınırlaması, hidrodinamik stres, UV radyasyonu ve kimyasal dalgalanmalar gibi çevresel baskılara karşı daha dayanıklı hâle gelmektedir (Oberbeckmann vd., 2018:1; Arias-Andres vd., 2019:234). Ardışıklık ilerledikçe plastisfer, mikrobiyal etkileşimlerin yoğunlaştığı, gen alışverişinin ve adaptif süreçlerin hızlandığı bir mikrohabitat niteliği kazanmaktadır (Zettler vd.,2013:7137-7140).

PLASTİSFERİN ÇEVRESEL RİSKLERİ

Plastisfer, mikroplastik yüzeylerinde gelişen mikrobiyal topluluklar aracılığıyla ekosistem işleyişine katkı sağlayabilen bir mikrohabitat olmasının yanı sıra, çevresel riskler barındıran karmaşık bir sistemdir. Mikroplastiklerin çevrede uzun süre kalıcı olması ve geniş mekânsal ölçeklerde taşınabilmesi, plastisferin yalnızca yerel değil, bölgesel ve hatta küresel ölçekte etkiler oluşturmasına neden olmaktadır (Tang vd., 2024:4). Bu bağlamda plastisfer, mikrobiyal, kimyasal ve ekolojik risklerin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir çevresel bileşen olarak ele alınmalıdır.

Patojen Mikroorganizmalar ve Antimikrobiyal Direnç Genlerinin Yayılımı

Plastisferin en çok tartışılan çevresel risklerinden biri, patojen mikroorganizmalar ve antimikrobiyal direnç genleri (ARG'ler) için bir taşıyıcı ve rezervuar görevi görebilmesidir. Mikroplastik yüzeylerinde gelişen yoğun biyofilm yapısı, mikroorganizmalar arasındaki fiziksel teması artırmakta ve yatay gen transferi süreçleri için elverişli bir mikroçevre oluşturmaktadır (Arias-Andres vd., 2018:253).

Çeşitli çalışmalarda plastisfer üzerinde Vibrio, Pseudomonas ve Aeromonas gibi potansiyel patojen bakteri cinslerinin varlığı rapor edilmiş; bu durum özellikle sucul ekosistemler ve insan sağlığı açısından dikkat çekici bir risk olarak değerlendirilmiştir (Oberbeckmann vd., 2015:556; Cholewinska vd., 2025:14). Ayrıca, plastisferde antibiyotik direnç genlerinin çevredeki doğal partiküllere kıyasla daha yüksek oranda bulunabildiği ve mikroplastiklerin bu genlerin ekosistemler arası taşınmasında vektör rolü üstlenebileceği öne sürülmüştür (Wang vd., 2022:1; Wang vd., 2025:1).

Kirletici Birikimi, Biyoyararlanabilirlik ve Ekotoksik Etkiler

Mikroplastikler, hidrofobik özellikleri ve geniş özgül yüzey alanları nedeniyle ağır metaller, pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) ve diğer organik kirleticiler için etkili bir adsorpsiyon yüzeyi sunmaktadır. Plastisfer biyofilmi içerisinde yer alan EPS matrisi, bu kirleticilerin tutulmasını daha da artırarak mikroplastikleri kimyasal kirleticiler için hareketli bir taşıyıcı hâline getirmektedir (Mulky vd., 2025:4).

Plastisferde biriken kirleticiler, mikroorganizmalar tarafından kısmen dönüştürülebilse de, birçok durumda bu maddelerin biyoyararlanabilirliği artmakta ve trofik düzeyler boyunca taşınma riski ortaya çıkmaktadır (Arias-Andres vd., 2019:236). Özellikle hassas ve kapalı sucul sistemlerde plastisfer kaynaklı lokal kirletici birikimi, bentik organizmalar ve birincil tüketiciler üzerinde kronik toksik etkilere yol açabilmektedir.

Ekosistemler Arası Taşınım ve Biyolojik Köprü Etkisi

Mikroplastiklerin yüzey sularında, akarsularda ve atmosferik taşınım yoluyla uzun mesafeler kat edebilmesi, plastisferin ekosistemler arası bir biyolojik köprü işlevi görmesine neden olmaktadır. Bu durum, normal koşullarda coğrafi veya ekolojik bariyerlerle sınırlı kalan mikroorganizmaların yeni habitatlara taşınmasına olanak tanımaktadır (Lange vd., 2025:2-3).

Plastisfer aracılığıyla taşınan mikroorganizmaların, yeni ekosistemlerde yerel mikrobiyal topluluklarla rekabete girebildiği ve bazı durumlarda istilacı tür davranışı sergileyebildiği bildirilmiştir. Bu süreç, özellikle besin açısından sınırlı veya ekolojik olarak hassas sistemlerde mikrobiyal dengeyi bozma potansiyeline sahiptir (Li vd., 2024:4).

Ekolojik Belirsizlikler ve Yönetim Açısından Değerlendirme

Plastisferin çevresel riskleri, yalnızca tekil etki mekanizmalarıyla değil; mikrobiyal ardışıklık, kirletici etkileşimleri ve çevresel stres faktörlerinin birlikte şekillendirdiği çok boyutlu süreçler olarak da değerlendirilmelidir. Plastisfer ekosistemlerinin dinamik yapısı, risklerin zamansal ve mekânsal olarak değişkenlik göstermesine neden olmakta; bu durum yönetim ve izleme stratejilerini zorlaştırmaktadır (Rummel vd., 2017:258-261).

Bu nedenle plastisfer, mikroplastik kirliliğinin fiziksel bir sonucu olmakla birlikte mikrobiyal ve kimyasal risklerin bütünleştiği yeni bir çevresel bileşen olarak ele alınmalı; su ve toprak yönetimi politikalarında bu çok katmanlı etkiye dikkat edilmelidir.

SONUÇ

Mikroplastik kirliliği, günümüzde yalnızca fiziksel bir çevresel sorun olarak değil, aynı zamanda ekosistemlerin biyolojik ve kimyasal işleyişini yeniden şekillendiren çok boyutlu bir stres faktörü olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda mikroplastik yüzeylerinde gelişen plastisfer, insan kaynaklı materyaller üzerinde ortaya çıkan özgün bir mikrobiyal ekosistem olarak dikkat çekmektedir. Plastisfer, mikroorganizmaların yüzeye tutunmasıyla başlayan bir biyofilm yapısı olup, seçilim baskılarının, çevresel koşulların ve yüzey özelliklerinin etkileşimiyle şekillenen dinamik ve işlevsel bir mikrobiyal niş niteliği taşımaktadır.

Plastisferin mikrobiyal bileşimi çevredeki su kolonundan, sedimandan veya topraktan farklıdır. Plastik yüzeylerin hidrofobik karakteri, yaşlanma

süreçleriyle artan yüzey heterojenliği ve eko-korona oluşumu, plastisfer topluluklarının hem taksonomik hem de fonksiyonel açıdan özgünleşmesine neden olmaktadır. Bu durum, mikroplastiklerin ekosistemlerde hem kirletici hem de mikrobiyal süreçleri yönlendiren aktif ara yüzeyler olarak rol oynadığını göstermektedir.

Plastisferin çevresel önemi, ekolojik işlevlerinin ötesinde barındırdığı potansiyel risklerle daha da belirgin hâle gelmektedir. Mikroplastiklerle birlikte taşınabilen patojen mikroorganizmalar, antibiyotik direnç genleri ve çeşitli kimyasal kirleticiler, plastisfer aracılığıyla ekosistemler arasında hareket edebilmekte ve bu durum su kalitesi, biyolojik bütünlük ve halk sağlığı açısından yeni tehditler ortaya çıkarmaktadır. Özellikle yatay gen transferi için elverişli mikroçevreler sunan plastisfer yapıları, direnç genlerinin çevresel havuzlarda yayılımını hızlandırabilecek kritik platformlar olarak değerlendirilmektedir.

Tatlı su, deniz ve karasal sistemlerde plastisfer oluşumu ve dinamiklerinin farklılık göstermesi, bu yapının çevresel koşullara son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. Hidrodinamik koşullar, besin mevcudiyeti, sıcaklık ve ışınım gibi çevresel değişkenler, plastisferin mikrobiyal ardışıklığını ve işlevsel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu durum, mikroplastik kirliliğinin etkilerinin ekosistemlere özgü süreçler üzerinden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, plastisfer kavramı, mikroplastik kirliliğinin ekolojik sonuçlarını anlamada bütüncül ve disiplinler arası bir bakış açısı sunmaktadır. Gelecekteki araştırmaların; plastisferin biyokimyasal işlevleri, direnç genleriyle ilişkisi, trofik aktarım potansiyeli ve iklim değişikliği senaryoları altındaki davranışlarını daha ayrıntılı biçimde ele alması gerekmektedir. Bu tür çalışmalar, mikroplastik kirliliğine yönelik izleme, risk değerlendirmesi ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde bilimsel bir temel oluşturacak; plastisferin çevresel sistemlerdeki rolünün daha net biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., Fang, C., ve Rahman, M. M. (2024). The unseen threat of the synergistic effects of microplastics and heavy metals in aquatic environments: a critical review. *Current Pollution Reports*, 10(3), 478-497.

Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., ve Mincer, T. J. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*, 18(3), 139-151.

Arias-Andres, M., Klümper, U., Rojas-Jimenez, K., ve Grossart, H. P. (2018). Microplastic pollution increases gene exchange in aquatic ecosystems. *Environmental Pollution*, 237, 253-261.

Arias-Andres, M., Rojas-Jimenez, K., ve Grossart, H. P. (2019). Collateral effects of microplastic pollution on aquatic microorganisms: an ecological perspective. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 112, 234-240.

Behera, S., ve Das, S. (2023). Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic. *Chemosphere*, 334, 138928.

Bryant, J. A., Clemente, T. M., Viviani, D. A., Fong, A. A., Thomas, K. A., Kemp, P., ...ve DeLong, E. F. (2016). Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the North Pacific Gyre. *MSystems*, 1(3), 10-1128.

Carson, H. S., Nerheim, M. S., Carroll, K. A., ve Eriksen, M. (2013). The plastic-associated microorganisms of the North Pacific Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 75(1-2), 126-132.

Cholewińska, P., Wojnarowski, K., Moniuszko, H., Pokorny, P., ve Palić, D. (2025). An exploratory review of microplastic pollution, associated microbiomes and pathogens in water. *Applied Sciences*, 15(15), 8128.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., ve Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597.

Conradie, W., Dorfling, C., Chimphango, A., Booth, A. M., Sørensen, L., ve Akdogan, G. (2022). Investigating the physicochemical property changes of plastic packaging exposed to UV irradiation and different aqueous environments. *Microplastics*, 1(3), 456-476.

Dey, S., Rout, A. K., Behera, B. K., ve Ghosh, K. (2022). Plastisphere community assemblage of aquatic environment: plastic-microbe interaction, role in degradation and characterization technologies. *Environmental Microbiome*, 17(1), 32.

Du, Y., Liu, X., Dong, X., ve Yin, Z. (2022). A review on marine plastisphere: biodiversity, formation, and role in degradation. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 20, 975-988.

Flemming, H. C., Wingender, J., Szewzyk, U., Steinberg, P., Rice, S. A., ve Kjelleberg, S. (2016). Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 563-575.

GESAMP, G. (2019). Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter in the ocean. *Journal Series GESAMP Reports and Studies*, 99, 130.

Gökdağ, K., Pekmez, T., Akca, G., Korkmaz, M., Pacheco, J. P., Başaran Kankılıç, G., ... ve Tavşanoğlu, Ü. N. (2025). Changes in microplastic-associated bacterial communities along a salinity gradient in Central Anatolian lakes of Türkiye. *Hydrobiologia*, 1-19.

Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., ve Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719.

Harrison, J. P., Hoellein, T. J., Sapp, M., Tagg, A. S., Ju-Nam, Y., ve Ojeda, J. J. (2018). Microplastic-associated biofilms: a comparison of freshwater and marine environments. *Freshwater Microplastics*, 58, 181-201.

Hartmann, N. B., Huffer, T., Thompson, R. C., Hassellov, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., ... ve Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53, 1039−1047.

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., ve Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060-3075.

Hitchcock, J. N. (2022). Microplastics can alter phytoplankton community composition. *Science of the Total Environment*, 819, 153074.

Hoellein, T., Rojas, M., Pink, A., Gasior, J., ve Kelly, J. (2014). Anthropogenic litter in urban freshwater ecosystems: distribution and microbial interactions. *PloS one*, 9(6), e98485.

Hou, D., Hong, M., Wang, K., Yan, H., Wang, Y., Dong, P., ... ve Zhang, D. (2021). Prokaryotic community succession and assembly on different types of microplastics in a mariculture cage. *Environmental Pollution*, 268, 115756.

Khaleel, R., Rolf, M., Wagenhofer, J., Jaax, L. M., Lu, Y., Laermanns, H., ... ve Bogner, C. (2025). Hydrodynamics shape riverine biofilms on microplastics: insights from an in-situ incubation study. *Environmental Systems Research*, 14(1), 1-14.

Kooi, M., Nes, E. H. V., Scheffer, M., ve Koelmans, A. A. (2017). Ups and downs in the ocean: effects of biofouling on vertical transport of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 51(14), 7963-7971.

Lange, M. L., Brenninger, F. A., Cao, C., ve Richter, X. Y. L. (2025). The impact of microplastics on small organism dispersal: mechanisms, risks, and research gaps. *Evolutionary Ecology*, 1-13.

Laskar, N., ve Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100352.

Lebreton, L. C., van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., ve Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611.

Li, C., Gillings, M. R., Zhang, C., Chen, Q., Zhu, D., Wang, J., ... ve Jin, L. (2024). Ecology and risks of the global plastisphere as a newly expanding microbial habitat. *The Innovation*, 5(1).

Lithner, D., Larsson, Å., ve Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309-3324.

Lu, L., Luo, T., Zhao, Y., Cai, C., Fu, Z., ve Jin, Y. (2019). Interaction between microplastics and microorganism as well as gut microbiota: A consideration on environmental animal and human health. *Science of the Total Environment*, 667, 94-100.

Luo, G., Jin, T., Zhang, H., Peng, J., Zuo, N., Huang, Y., ... ve Fei, J. (2022). Deciphering the diversity and functions of plastisphere bacterial communities in plastic-mulching croplands of subtropical China. *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126865.

MacLean, J., Mayanna, S., Benning, L. G., Horn, F., Bartholomäus, A., Wiesner, Y., ... ve Liebner, S. (2021). The terrestrial plastisphere: diversity and polymer-colonizing potential of plastic-associated microbial communities in soil. *Microorganisms*, 9(9), 1876.

Mayali, X. (2018). Metabolic interactions between bacteria and phytoplankton. *Frontiers in Microbiology*, 9, 727.

McCormick, A. R., Hoellein, T. J., London, M. G., Hittie, J., Scott, J. W., ve Kelly, J. J. (2016). Microplastic in surface waters of urban rivers: concentration, sources, and associated bacterial assemblages. *Ecosphere*, 7(11), e01556.

Miao, L., Li, W., Adyel, T. M., Yao, Y., Deng, Y., Wu, J., ... ve Hou, J. (2023). Spatio-temporal succession of microbial communities in plastisphere and

their potentials for plastic degradation in freshwater ecosystems. *Water Research*, 229, 119406.

Miao, L., Wang, P., Hou, J., Yao, Y., Liu, Z., Liu, S., ve Li, T. (2019). Distinct community structure and microbial functions of biofilms colonizing microplastics. *Science of the Total Environment*, 650, 2395-2402.

Mulky, L., Valiaparampil, J. G., ve Somashekara, D. (2025). Plastisphere-a new habitat of microbial community: Composition, structure and ecological consequences. *Sustainable Environment*, 11(1), 2516898.

Nava, V., Matias, M. G., Castillo-Escrivà, A., Messyasz, B., ve Leoni, B. (2022). Microalgae colonization of different microplastic polymers in experimental mesocosms across an environmental gradient. *Global Change Biology*, 28(4), 1402-1413.

Naveed, S., Li, C., Lu, X., Chen, S., Yin, B., Zhang, C., ve Ge, Y. (2019). Microalgal extracellular polymeric substances and their interactions with metal (loid) s: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(19), 1769-1802.

Oberbeckmann, S., Kreikemeyer, B., ve Labrenz, M. (2018). Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2709.

Oberbeckmann, S., Löder, M. G., ve Labrenz, M. (2015). Marine microplastic-associated biofilms–a review. *Environmental Chemistry*, 12(5), 551-562.

Oberbeckmann, S., Loeder, M. G., Gerdts, G., ve Osborn, A. M. (2014). Spatial and seasonal variation in diversity and structure of microbial biofilms on marine plastics in Northern European waters. *FEMS Microbiology Ecology*, 90(2), 478-492.

Oberbeckmann, S., Osborn, A. M., ve Duhaime, M. B. (2016). Microbes on a bottle: substrate, season and geography influence community composition of microbes colonizing marine plastic debris. *PloS one*, 11(8), e0159289.

Pinnell, L. J., ve Turner, J. W. (2020). Temporal changes in water temperature and salinity drive the formation of a reversible plastic-specific microbial community. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(12), fiaa230.

Pinto, M., Langer, T. M., Hüffer, T., Hofmann, T., ve Herndl, G. J. (2019). The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession. *PloS one*, 14(6), e0217165.

Portas, A., Carriot, N., Barry-Martinet, R., Ortalo-Magné, A., Hajjoul, H., Dormoy, B., ... ve Briand, J. F. (2024). Shear stress controls prokaryotic and eukaryotic biofilm communities together with EPS and metabolomic expression in a semi-controlled coastal environment in the NW Mediterranean Sea. *Environmental Microbiome*, 19(1), 109.

Prasittisopin, L. (2025). Unveiling the duality of cement and concrete addressing microplastic pollution: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-26.

Rillig, M. C., ve Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science*, 368(6498), 1430-1431.

Roager, L., ve Sonnenschein, E. C. (2019). Bacterial candidates for colonization and degradation of marine plastic debris. *Environmental Science & Technology,* 53(20), 11636-11643.

Rosal, R. (2021). Morphological description of microplastic particles for environmental fate studies. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112716.

Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., ve Schmitt-Jansen, M. (2017). Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environmental Science ve Technology Letters*, 4(7), 258-267.

Rummel, C. D., Lechtenfeld, O. J., Kallies, R., Benke, A., Herzsprung, P., Rynek, R., ... ve Schmitt-Jansen, M. (2021). Conditioning film and early biofilm succession on plastic surfaces. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 11006-11018.

Schlundt, C., Mark Welch, J. L., Knochel, A. M., Zettler, E. R., ve Amaral-Zettler, L. A. (2020). Spatial structure in the "Plastisphere": molecular resources for imaging microscopic communities on plastic marine debris. *Molecular Ecology Resources*, 20(3), 620-634.

Stanley, N. R., ve Lazazzera, B. A. (2004). Environmental signals and regulatory pathways that influence biofilm formation. *Molecular Microbiology*, 52(4), 917-924.

Tang, K. H. D. (2024). Terrestrial and aquatic plastisphere: formation, characteristics, and influencing factors. *Sustainability*, 16(5), 2163.

Thomen, P., Robert, J., Monmeyran, A., Bitbol, A. F., Douarche, C., ve Henry, N. (2017). Bacterial biofilm under flow: first a physical struggle to stay, then a matter of breathing. *PloS one*, 12(4), e0175197.

Tu, C., Chen, T., Zhou, Q., Liu, Y., Wei, J., Waniek, J. J., ve Luo, Y. (2020). Biofilm formation and its influences on the properties of microplastics as affected by exposure time and depth in the seawater. *Science of the Total Environment*, 734, 139237.

Wang, J., Peng, C., Dai, Y., Li, Y., Jiao, S., Ma, X., ... ve Wang, L. (2022). Slower antibiotics degradation and higher resistance genes enrichment in plastisphere. *Water Research*, 222, 118920.

Wang, R., Li, X., Li, J., Dai, W., ve Luan, Y. (2023). Bacterial interactions with nanoplastics and the environmental effects they cause. *Fermentation*, 9(11), 939.

Wang, Y., Liu, X., Huang, C., Han, W., Gu, P., Jing, R., ve Yang, Q. (2025). Antibiotic resistance genes and virulence factors in the plastisphere in wastewater treatment plant effluent: Health risk quantification and driving mechanism interpretation. *Water Research*, 271, 122896.

Wright, R. J., Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Latva, M., ve Christie-Oleza, J. A. (2020). Marine plastic debris: a new surface for microbial colonization. *Environmental Science & Technology*, 54(19), 11657-11672.

Wright, R. J., Langille, M. G., ve Walker, T. R. (2021). Food or just a free ride? A meta-analysis reveals the global diversity of the Plastisphere. *The ISME Journal*, 15(3), 789-806.

Wright, S. L., Thompson, R. C., ve Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental Pollution*, 178, 483-492.

Yang, Y., Liu, W., Zhang, Z., Grossart, H. P., ve Gadd, G. M. (2020). Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(15), 6501-6511.

Zettler, E. R., Mincer, T. J., ve Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science and Technology*, 47(13), 7137-7146.

Zhai, X., Zhang, X. H., ve Yu, M. (2023). Microbial colonization and degradation of marine microplastics in the plastisphere: A review. *Frontiers in Microbiology,* 14, 1127308.

Zhang, B., Yang, X., Liu, L., Chen, L., Teng, J., Zhu, X., ... ve Wang, Q. (2021). Spatial and seasonal variations in biofilm formation on microplastics in coastal waters. *Science of the Total Environment*, 770, 145303.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Tarım Arazilerinde Arazi Örtüsü ve Arazi Kullanımı Değişimlerinin Google Earth Engine ile Analizi

Ayşe ÇELİK[1]

1- Öğr. Gör.; Gümüşhane Üniversitesi Kelkit Aydın Doğan Meslek Yüksekokulu Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü. ayse.celik@gumushane.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1495-297X

ÖZET

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremlerin arazi örtüsü ve tarımsal alanlar üzerindeki etkilerini uzaktan algılama teknikleri ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmada, Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden temin edilen Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak 2022 ve 2025 yıllarına ait yüksek çözünürlüklü arazi kullanımı ve arazi örtüsü (AKAÖ) haritaları üretilmiştir. Sınıflandırma sürecinde 10 spektral bandın yanı sıra NDVI, NDMI, SAVI ve BSI spektral indeksleri ile topografik veriler (yükseklik ve eğim) bir arada kullanılarak Rastgele Orman (Random Forest) algoritması uygulanmıştır. Analizler sonucunda su yüzeyleri, sulu tarım, kuru tarım, kentsel alanlar, açık arazi ve orman alanları olmak üzere altı ana sınıf tanımlanmıştır. Değişim matrisi verileri deprem sonrası dönemde bölgedeki arazi yapısında önemli dönüşümler yaşandığını; özellikle kentsel alanların açık araziye, sulu tarım arazilerinin ise kuru tarıma evrildiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular büyük ölçekli doğal afetlerin tarımsal ekosistemler üzerindeki mekânsal izlerini sayısal olarak belgelemekte ve bölgedeki sürdürülebilir arazi yönetimi stratejileri için bilimsel bir altlık teşkil etmektedir. Bu araştırma optik uydu verilerinin ve bulut tabanlı işleme yöntemlerinin afet sonrası izleme süreçlerindeki etkinliğini doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan Algılama, Google Earth Engine, Rastgele Orman, Değişim Tespiti, Deprem Etkisi, Arazi Kullanımı

1. GİRİŞ

Depremler, sadece yapısal hasarlara ve can kayıplarına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda arazi kullanımı ve arazi örtüsü üzerinde de kalıcı değişikliklere yol açar (Kobayashi et al., 2024). 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ta meydana gelen 7.7 ve 7.5 büyüklüğündeki deprem çifti, Doğu Anadolu Fayı boyunca 500 km'den fazla yüzey kırığı oluşturmuş ve 11 ili etkilemiştir (Reitman et al., 2023). Bu depremler, yaklaşık 15.6 milyon kişinin yaşadığı bölgede büyük ölçüde yapısal hasara neden olmasının yanı sıra, tarımsal alanlar üzerinde de önemli etkiler yaratmıştır.

Etkilenen 11 ilin Türkiye'nin toplam tarım arazisinin yaklaşık %15'ini, yani 23.9 milyon hektarın 3.6 milyon hektarını içermesi, depremlerin tarımsal etkileri açısından özel bir önem taşımaktadır (FAO, 2023). Kahramanmaraş, Şanlıurfa, Diyarbakır ve Adana başta olmak üzere bu bölge, buğday, kırmızı biber, ayçiçeği, bakliyat, sebze ve meyve üretiminin yoğun olduğu alanlardır (Politics Today, 2023). Depremler, tarım arazilerinde

heyelanlar, çatlaklar, toprak sıvılaşması ve arazi deformasyonlarına neden olarak arazi kullanım potansiyelini doğrudan etkilemektedir (Wang et al., 2023).

Uzaktan algılama teknolojileri, deprem sonrası arazi değişikliklerinin hızlı ve kapsamlı bir şekilde tespit edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Google Earth Engine (GEE), bulut tabanlı hesaplama platformu olarak, petabayt ölçeğinde uydu görüntüsü ve jeouzaysal veri setine erişim sunarak, arazi kullanımı ve arazi örtüsü (AKAÖ) değişim analizi için güçlü bir araç haline gelmiştir (Gorelick et al., 2017). GEE platformu, Sentinel-2'nin 10 m mekânsal çözünürlüğü ve 5 günlük tekrar ziyaret döngüsü sayesinde, deprem öncesi ve sonrası AKAÖ değişikliklerinin zamansal ve mekânsal olarak izlenmesine olanak tanır (Tesfaye et al., 2024).

Deprem kaynaklı AKAÖ değişikliklerinin tespitinde, optik ve radar tabanlı uzaktan algılama yöntemlerinin birlikte kullanılması önerilmektedir. Sentinel-1 SAR verileri, bulut örtüsünden bağımsız olarak yüzey deformasyonu ve yapısal değişiklikleri tespit edebilirken, Sentinel-2 multispektral verileri vejetasyon indeksleri (NDVI, NDBI) aracılığıyla tarımsal alanlar ve bitki örtüsündeki değişimleri ortaya koyabilmektedir (Özşahin ve Öztürk., 2024). Özellikle deprem sonrası yapılan çalışmalarda, Normalleştirilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI) kullanılarak tarımsal alanların ve doğal vejetasyonun nasıl etkilendiği başarıyla haritalanmıştır (Dündar, 2025).

Kahramanmaraş depremleri sonrası yapılan ilk değerlendirmeler, yapı hasarı tespitine odaklanmış olsa da tarımsal arazilerdeki değişimlerin sistematik olarak belirlenmesi, bölgenin gıda güvenliği ve kırsal kalkınma stratejileri açısından kritik öneme sahiptir (Wang et al., 2023). Tarım altyapısı ve depolama tesislerindeki bir milyar doların üzerindeki hasar rapor edilmiş olup, tarım arazilerinin üretim kapasitesindeki değişimlerin detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir (Fao, 2023; World Bank Group, 2023).

Bu çalışmada, GEE platformu kullanılarak Kahramanmaraş depremlerinin tarım arazilerinde meydana getirdiği AKAÖ değişiklikleri Sentinel-2 optik görüntüleri ile tespit edilecektir. Çalışma deprem öncesi ve sonrası dönemlerde arazi kullanım sınıflarındaki değişimleri haritalayarak etkilenen tarımsal alanların mekânsal dağılımını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Elde edilecek sonuçlar tarımsal rehabilitasyon çalışmalarına ve arazi yönetimi politikalarına katkı sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen tarım arazilerini ve çevre arazi örtüsünü kapsamaktadır. İki büyük deprem (Mw 7.8 ve Mw 7.5), Doğu Anadolu Fayı üzerinde Pazarcık ve Elbistan merkezli olarak gerçekleşmiş ve toplam 500 km'den fazla yüzey kırığı oluşturmuştur (Reitman et al., 2023). Depremler, Kahramanmaraş, Hatay, Gaziantep, Adıyaman, Malatya, Adana, Osmaniye, Kilis, Şanlıurfa, Diyarbakır ve Elazığ illerini etkilemiştir.

Çalışma alanı, yaklaşık 18,432 km² büyüklüğünde olup, bu illerdeki tarımsal potansiyeli yüksek bölgeleri içermektedir. Etkilenen bölge, Türkiye'nin toplam tarım arazisinin yaklaşık %15'ini oluşturmakta ve 3.6 milyon hektar tarım arazisini kapsamakta ve bölgede buğday, kırmızı biber, ayçiçeği, bakliyat, sebze ve meyve üretiminin yoğun olduğu stratejik tarımsal öneme sahip bir alandır (SBB, 2023). Coğrafi olarak çalışma alanı 36°-39.5° Doğu boylamı ve 36.5°-38.5° Kuzey enlemi arasında yer almaktadır.

2.2. Veri Kaynakları

2.1.1. Uydu Görüntüleri

Çalışmada, GEE platformu üzerinden erişilen Sentinel-2 Level-2A (yüzey yansıtım) görüntüleri kullanılmıştır. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) sensörü, 13 spektral bant ile 10-60 m arasında değişen mekansal çözünürlük sunmaktadır. Çalışmada öncelikli olarak 10 m çözünürlüğe sahip bantlar (B2-Mavi, B3-Yeşil, B4-Kırmızı, B8-Yakın Kızılötesi) ve 20 m çözünürlüğe sahip bantlar (B5-Kırmızı Kenar, B6-Kırmızı Kenar, B7-Kırmızı Kenar, B8A-Dar Yakın Kızılötesi, B11-SWIR1, B12-SWIR2) kullanılmıştır. Sentinel-2 uyduları (Sentinel-2A ve Sentinel-2B) 5 günlük kombine tekrar ziyaret periyodu ile deprem öncesi ve sonrası dönemlerde bulut örtüsünden en az etkilenen görüntülerin seçilmesine olanak tanımaktadır. Görüntüler, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından atmosferik düzeltme yapılmış olarak (Level-2A) sağlanmıştır.

Çalışmada 1 Kasım 2022 ile 5 Şubat 2023 tarihleri arasında deprem öncesi dönem için görüntü alınmıştır. 20 Şubat 2025 ile 30 Nisan 2025 tarihleri arasında da deprem sonrası dönem için görüntüler alınmıştır. Deprem öncesi dönem için 182 adet, deprem sonrası dönem için 296 adet Sentinel-2 görüntüsü kullanılmıştır. Her iki dönem için %20'den az bulut örtüsüne sahip görüntüler seçilmiş ve medyan kompozit yöntemi kullanılarak atmosferik anomaliler ve kalan bulut etkilerinin minimize edilmesi sağlanmıştır.

2.1.2. Yardımcı Veriler

Sınıflandırma doğruluğunu artırmak için yardımcı veri setleri kullanılmıştır. Bunlar; Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), İdari Sınırlar, Fay Hattı Verisi ve Referans verileridir. Topografik özelliklerin belirlenmesi sürecinde, 30 metre uzamsal çözünürlüğe sahip Mekik Radar Topografya Misyonu (SRTM) verilerinden türetilen SYM kullanılarak yükseklik ve eğim haritaları üretilmiştir; bu veriler özellikle spektral benzerlik gösteren orman ve tarım alanlarının birbirinden ayırt edilmesinde kritik bir rol oynamıştır. Çalışma alanının mekânsal çerçevesi, GEE veri kataloğundan temin edilen 11 şehire ait idari sınır verileriyle belirlenmiştir. Ayrıca, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin yarattığı değişimleri fay hattına mesafeye göre analiz edebilmek amacıyla Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından yayınlanan güncel fay kırığı haritası (Reitman et al., 2023) çalışmaya entegre edilmiştir. Modelin eğitim ve doğrulama aşamaları için gerekli olan referans noktaları, yüksek çözünürlüklü Google Earth görüntüleri ve arazi gerçeği verileriyle desteklenerek toplanmıştır.

2.3. Yöntem

2.3.1. Ön İşleme

Çalışma kapsamında uydu görüntülerinin analize hazır hâle getirilmesi amacıyla GEE platformu üzerinde, JavaScript programlama dili kullanılarak kapsamlı ön işleme adımları yürütülmüştür. İlk aşamada, Sentinel-2 Level-2A veri setinde yer alan QA60 kalite bandı aracılığıyla bulut maskeleme işlemi gerçekleştirilmiştir; bu süreçte 10 (bulut) ve 11 (cirrus) bit bilgileri filtre edilerek atmosferik engellerden arındırılmış pikseller elde edilmiştir. Ardından, her iki çalışma dönemi için aykırı değerlerin etkisini en aza indiren ve geçici arazi yüzeyi değişikliklerini filtreleyen medyan kompozit yöntemi uygulanarak yüksek kaliteli kompozit görüntüler üretilmiştir (Gorelick et al., 2017). Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından Sen2Cor algoritması ile atmosferik düzeltmesi yapılmış olarak sunulan veriler, dijital sayı (DN) değerlerinin 10.000'e bölünmesiyle 0-1 aralığındaki yüzey yansıtım değerlerine dönüştürülmüştür. Son aşamada ise tüm görüntüler, tanımlanan çalışma alanı geometrisi doğrultusunda coğrafi olarak kırpılarak analiz bölgesiyle sınırlandırılmış ve işlem yükü optimize edilmiştir.

2.3.2. Spektral İndeks Hesaplama

Arazi örtüsü sınıflarının spektral özelliklerini daha iyi ayırt edebilmek için dört farklı spektral indeks hesaplanmış ve sınıflandırma bantlarına eklenmiştir.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

NDVI, bitki yoğunluğunun tespitinde kullanılmış olup, tarımsal alanlar, orman ve mera alanlarının belirlenmesinde kritik rol oynamıştır (Pettorelli et al., 2005). Değer aralığı -1 ile +1 arasında olup, yüksek değerler sağlıklı ve yoğun vejetasyonu göstermektedir.

NDMI (Normalized Difference Moisture Index):

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} = \frac{B8 - B11}{B8 + B11}$$

NDMI, bitki örtüsünün ve toprağın nem içeriğinin tespiti için kullanılmış olup, sulu tarım ve kuru tarım alanlarının ayrımında özellikle etkili olmuştur. Yüksek NDMI değerleri, yüksek nem içeriğini ve sulanan tarım alanlarını göstermektedir(Gao, 1996).

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = \left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L}\right) * (1 + L)$$
$$SAVI = \left(\frac{B8 - B4}{B8 + B4 + 0.5}\right) * (1.5)$$

SAVI, toprak yansımasının etkisini düzeltmek için geliştirilmiş bir indeks olup, L parametresi 0.5 olarak alınmıştır (Huete et al., 2002). Bu indeks, özellikle düşük vejetasyon yoğunluğuna sahip alanlarda NDVI'ya göre daha doğru sonuçlar vermektedir. Tarımsal alanların ve meraların tespitinde kullanılmıştır.

BSI (Bare Soil Index):

$$BSI = \frac{\big((SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)\big)}{\big((SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)\big)}$$

$$BSI = \frac{\big((B11 + B4) - (B8 + B2)\big)}{\big((B11 + B4) + (B8 + B2)\big)}$$

BSI, çıplak toprak alanlarının tespiti için kullanılmış olup, kentsel alanlar ile açık arazi/çıplak toprak alanlarının ayrımında önemli katkı sağlamıştır. Yüksek BSI değerleri, vejetasyonsuz ve çıplak toprak yüzeylerini göstermektedir (Rikimaru et al., 2002).

2.3.3. Arazi Kullanımı Arazi Örtüsü Sınıflandırması

2.3.3.1. Sınıf Tanımlamaları

Çalışmada 6 farklı arazi kullanımı ve arazi örtüsü sınıfı tanımlanmıştır.

1. *Su Yüzeyleri:* Nehirler, göller, barajlar, göletler ve diğer su kütleleri
2. *Sulu Tarım:* Sulama sistemleri ile desteklenen tarım alanları (mısır, pamuk, sebze gibi yüksek su ihtiyacı olan ürünler)
3. *Kuru Tarım:* Yağışa dayalı tarım alanları (buğday, arpa, bakliyat gibi)
4. *Kentsel Alan:* Yerleşim yerleri, sanayi alanları, yollar ve diğer yapılaşmış alanlar
5. *Açık Arazi:* Çıplak toprak, kayalık alanlar, taşlık araziler ve vejetasyonsuz yüzeyler
6. *Orman:* Ağaç ve çalı formundaki doğal vejetasyon alanları

2.3.3.2. Eğitim Verisi Toplama

Eğitim ve doğrulama verileri, GEE platformunun sunduğu yüksek çözünürlüklü görüntü altlığı kullanılarak manuel yöntemlerle toplanmıştır. Her AKAÖ sınıfı için çalışma alanı genelinde homojen bir dağılım sergilenecek şekilde nokta veriler işaretlenmiştir. Eğitim noktalarının toplanması sürecinde belirli bilimsel kriterler titizlikle uygulanmıştır. Bu kapsamda her sınıf için en az 100 nokta toplanmasına noktaların coğrafi açıdan dengeli bir biçimde dağılmasına piksel karışımından kaçınmak amacıyla homojen alanların seçilmesine ve sınıf sınırlarında oluşabilecek kenar etkilerinden uzak durulmasına azami dikkat gösterilmiştir.

Deprem öncesi dönem için toplam 213 eğitim noktası, deprem sonrası dönem için 279 eğitim noktası toplanmıştır. Eğitim noktaları, her bir AKAÖ için sınıf özelliği 1-6 arası ile etiketlenmiştir.

2.3.3.3. Rastgele Orman Sınıflandırması

Denetimli sınıflandırma için Rastgele Orman (RO) makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır. RO çok sayıda Karar Ağacının (decision tree) kombinasyonundan oluşan bir topluluk öğrenme (ensemble learning)

yöntemidir ve uzaktan algılama verilerinde yüksek doğruluk oranları ile bilinmektedir (Breiman, 2001).

Sınıflandırma sürecinde RO algoritmasının performansını optimize etmek amacıyla belirli hiperparametreler tanımlanmıştır. Bu kapsamda modelin kararlılığını artırmak için toplam ağaç sayısı (numberOfTrees) 500 olarak belirlenmiştir. Her düğüm bölünmesinde dikkate alınacak değişken sayısı (variablesPerSplit) toplam bant sayısının karekköküne ($\sqrt{n}$) karşılık gelen varsayılan değerde tutulmuştur. Modelin karmaşıklığını ve öğrenme kapasitesini dengelemek adına minimum yaprak popülasyonu (minLeafPopulation) 1, maksimum düğüm sayısı ise sınırsız olarak ayarlanmıştır. Veri setinin rastgele alt kümelerle eğitilmesi için torbalama oranı (bagFraction) 0,5 olarak seçilirken, sonuçların bilimsel açıdan tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla tohum (seed) değeri 0 olarak sabitlenmiştir

Arazi örtüsü sınıflandırması sürecinde model girdisi olarak; Sentinel-2 MSI sensörüne ait 10 spektral bant (B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11, B12) vejetasyon ve toprak özelliklerini karakterize eden 4 temel spektral indeks (NDVI, NDMI, SAVI, BSI) ile topografik yapıyı temsil eden yükseklik ve eğim verileri birlikte kullanılmıştır.

2.3.3.4. Sınıflandırma Prosedürü

Sınıflandırma sürecinin ilk aşamasında, sahada toplanan eğitim noktalarına ait konum verileri kullanılarak tüm girdi bantlarından piksel değerleri dışa aktarılmıştır. GEE platformundaki 'sampleRegions' fonksiyonu aracılığıyla 10 metre çözünürlük ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu eğitim veri setleri kullanılarak RO sınıflandırıcısı eğitilmiş ve zamansal değişimi izleyebilmek adına deprem öncesi ve sonrası her iki dönem için ayrı modeller oluşturulmuştur. Eğitim süreci tamamlanan modeller tüm çalışma sahasına piksel bazında uygulanarak kapsamlı bir sınıflandırma işlemi yürütülmüştür. Analizlerin sonucunda, her dönem için altı sınıftan oluşan 'Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü' (AKAÖ) haritaları üretilerek görsel ve sayısal veri üretimi tamamlanmıştır.

2.3.4. Değişim Tespiti

Deprem öncesi (2022) ve sonrası (2025) AKAÖ haritaları kullanılarak, sınıflandırma sonrası karşılaştırma (post-classification comparison) yöntemi ile değişim tespiti analizi yapılmıştır.

Çalışmanın değişim analizi aşamasında, her iki döneme ait sınıflandırılmış haritalar piksel bazında karşılaştırılarak sınıf değişimi gösteren alanlar belirlenmiştir. Bu kapsamda, hangi sınıflardan hangi sınıflara ne kadar alan dönüşümü gerçekleştiğini sayısal olarak ortaya koymak amacıyla satırları 2022 ve sütunları 2025 yılı sınıflarını temsil eden 6×6 boyutunda bir değişim matrisi (change matrix) oluşturulmuştur. Sınıf değişimi

saptanan piksellerin mekânsal dağılımını görselleştirmek için bir değişim haritası üretilmiş; özellikle tarımsal alanlardan diğer sınıflara gerçekleşen dönüşümler (tarım kaybı) ayrı bir katman olarak analiz edilmiştir. Ayrıca değişim yoğunluğunun fay hattına olan mesafeyle ilişkisini incelemek amacıyla tampon bölge (buffer) analizi uygulanmıştır. Bu analiz çerçevesinde; fay hattından itibaren 0-1 km, 1-5 km, 5-10 km ve 10 km'den uzak olan zonlarda değişim istatistikleri hesaplanarak deprem etkisinin mekânsal boyutu değerlendirilmiştir.

2.3.5. Doğruluk Değerlendirmesi

Sınıflandırma doğruluğu, bağımsız bir test veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Toplanan eğitim noktaları, rastgele olarak %70 eğitim ve %30 test verisi olarak ayrılmıştır (random column yöntemi ile, 0.7 eşik değeri kullanılarak).

Doğruluk Metrikleri:

1. *Confusion Matrix (Karışıklık Matrisi):* Test verileri kullanılarak, gerçek sınıflar ile tahmin edilen sınıflar arasındaki ilişkiyi gösteren n×n boyutunda (6×6) matris oluşturulmuştur.
2. *Overall Accuracy (Genel Doğruluk):* Doğru sınıflandırılan piksel sayısının toplam piksel sayısına oranıdır.

$$OA = \frac{Doğru\ sınıflandırılan\ piksel\ sayısı}{Toplam\ piksel\ sayısı}$$

3. Kappa İstatistiği (κ): Sınıflandırma doğruluğunu rastgele sınıflandırmaya göre değerlendiren bir ölçüttür.

$$\kappa = \frac{Po\ -\ Pe}{1\ -\ Pe}$$

Po: Gözlenen uyum, Pe: Beklenen uyum

4. *Producer's Accuracy (Üretici Doğruluğu):* Her sınıf için, o sınıfın test noktalarının ne kadarının doğru sınıflandırıldığını gösteren ölçüttür.
5. *User's Accuracy (Kullanıcı Doğruluğu):* Her sınıf için, o sınıfa atanan noktaların gerçekten o sınıfa ait olma oranıdır.

Her iki dönem için de doğruluk değerlendirmesi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.3.6. İstatistiksel Analiz

Sınıflandırma ve değişim tespiti sonuçlarının sayısal olarak değerlendirilmesi amacıyla kapsamlı istatistiksel analizler yürütülmüştür. İlk aşamada, her bir Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü (AKAÖ) sınıfına ait piksel

sayıları, 100 m²'lik piksel alanı ile çarpılarak hektar cinsinden alan değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, 1 km² = 100 hektar eşitliği temel alınarak kilometrekare birimine dönüştürülmüştür. Bu hesaplamalar doğrultusunda, deprem öncesi ve sonrası dönemleri temsil eden toplam alan miktarları her bir sınıf için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Değişim istatistiklerinin hesaplanması sürecinde, sınıfların zamansal dinamiklerini ortaya koymak amacıyla net değişim ve yüzde değişim formülleri uygulanmıştır. Net değişim miktarı 2025 yılı alan değerinden 2022 yılı alan değerinin çıkarılmasıyla değişim yüzdesi ise net değişimin başlangıç yılına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Bu analizler sonucunda her bir sınıf için meydana gelen kayıp ve kazanım miktarları net bir şekilde ortaya konulmuştur. Ayrıca, sınıflar arası geçişlerin detaylı analizini sağlayan değişim matrisi aracılığıyla en önemli dönüşümler belirlenmiş ve karşılıklı dönüşüm oranları sayısal olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ise elde edilen veriler mekânsal istatistiklerle desteklenmiştir. İl bazında AKAÖ dağılımı analiz edilerek bölgesel farklılıklar saptanmış ve değişim yoğunluğunun fay hattına olan mesafeye göre dağılımı incelenmiştir. Değişimlerin coğrafi dağılımının haritalanmasıyla, deprem sonrası meydana gelen arazi kullanım değişikliklerinin mekânsal boyutu bütüncül bir yaklaşımla görselleştirilmiştir.

2.4. Yazılım ve Platformlar

Çalışma kapsamındaki tüm görüntü işleme, ön işleme, sınıflandırma ve değişim tespiti analizleri, petabayt ölçeğinde uydu verisi arşivi ve yüksek paralel işleme kapasitesi sunan Google Earth Engine (GEE) bulut platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir (Gorelick et al., 2017). Algoritmaların geliştirilmesi test edilmesi ve yürütülmesi süreçlerinde GEE'nin JavaScript tabanlı kod editörü kullanılmıştır.

Bulut platformundan dışa aktarılan Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü (AKAÖ) haritalarının nihai işlemleri, ileri düzey görselleştirme ve yüksek kaliteli kartografik çıktıların üretimi için QGIS 3.28 yazılımından yararlanılmıştır. Elde edilen sayısal verilerin istatistiksel hesaplamaları tablo düzenlemeleri ve grafik çizimleri ise Microsoft Excel programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde kullanılan tüm araçların açık kaynaklı veya ücretsiz erişilebilir platformlar arasından seçilmesi çalışmanın yöntemsel açıdan tekrarlanabilirliğini ve erişilebilirliğini güçlendirmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Sınıflandırma Doğruluğu

Rastgele Orman algoritması ile yapılan sınıflandırma sonuçları, her iki dönem için de yüksek doğruluk değerleri göstermiştir. Deprem öncesi dönem (2022) için toplam 213 eğitim noktası kullanılmış ve 182 görüntü

kompoziti oluşturulmuştur. Deprem sonrası dönem (2025) için ise 279 eğitim noktası ile 296 görüntü kullanılmıştır.

Sınıflandırma doğruluk değerlendirmesi sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Deprem öncesi dönem için genel doğruluk %98.22 ve Kappa istatistiği 0.977 olarak hesaplanmıştır. Deprem sonrası dönem için bu değerler sırasıyla %98.27 ve 0.977'dir. Bu yüksek doğruluk değerleri kullanılan spektral indekslerin (NDVI, NDMI, SAVI, BSI) ve Rastgele Orman algoritmasının arazi örtüsü sınıflarını ayırt etme de oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Sınıflandırma Doğruluk Değerlendirmesi

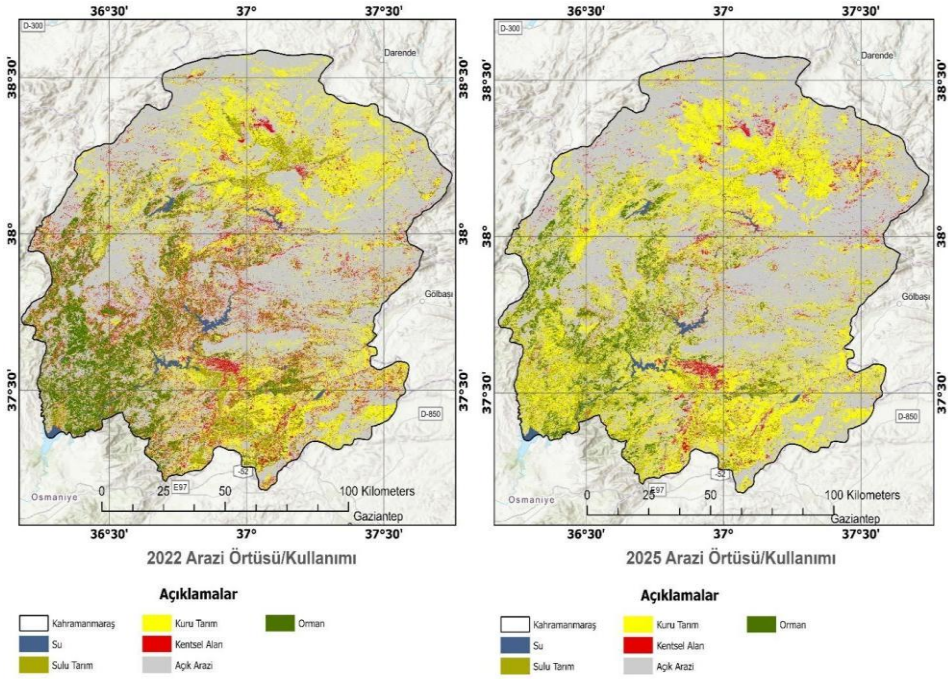
Parametre	2022	2025
Eğitim Noktası Sayısı	213	279
Kullanılan Görüntü Sayısı	182	296
Genel Doğruluk	0.9822	0.9827
Kappa İstatistiği	0.9766	0.9767

3.2. Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Dağılımı

Araştırma sahasındaki arazi kullanım dinamiklerini temsil etmek üzere spektral özellikleri bakımından farklılık gösteren altı kategori belirlenmiştir. Bu kategoriler su yüzeyleri, sulu tarım, kuru tarım, kentsel yapılı alanlar, açık arazi ve çıplak toprak ve orman örtüsü sınıflarından oluşmaktadır. Her iki dönem için AKAÖ sınıflarının alansal dağılımları Tablo 2'de ve Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 2. Deprem Öncesi ve Sonrası AKAÖ Sınıflarının Alansal Dağılımı

AKAÖ Sınıfı	2022 (km²)	2025 (km²)	Değişim (km²)	Değişim (%)
Su Yüzeyleri	157.46	127.11	-30.35	-19.28
Sulu Tarım	1,289.98	1,038.16	-251.82	-19.52
Kuru Tarım	3,767.54	5,364.46	+1,596.92	+42.39
Kentsel Alan	1,454.59	677.22	-777.37	-53.44
Açık Arazi	10,175.03	10,303.67	+128.64	+1.26
Orman	1,587.25	921.25	-666.00	-41.96
Toplam	18,431.85	18,431.87	-	-



Şekil 1. 2022 ve 2025 yıllarına ait çalışma alanı AKAÖ haritaları.

2022 yılında çalışma alanının en büyük kısmını açık arazi (%55.21) oluştururken, bunu sırasıyla kuru tarım alanları (%20.44), orman alanları (%8.61), kentsel alanlar (%7.89), sulu tarım alanları (%7.00) ve su yüzeyleri (%0.85) izlemektedir.

3.3. Deprem Sonrası AKAÖ Değişimleri

Kahramanmaraş depremlerinin ardından, arazi kullanımı ve arazi örtüsünde önemli değişimler gözlenmiştir. En dramatik değişim kentsel alanlarda gerçekleşmiş olup 2022'de 1454.59 km² olan kentsel alan, 2025'te 677.22 km²'ye düşerek %53.44 oranında azalma göstermiştir. Bu durum depremin neden olduğu yapısal çökmeler ve kentsel dokunun tahrip olması sonucu kentsel alanların diğer sınıflara dönüşmesiyle açıklanabilir.

Orman alanlarında da ciddi bir azalma tespit edilmiştir. 2022'de 1587.25 km² olan orman alanı, 2025'te 921.25 km²'ye düşerek 666.00 km²'lik (%41.96) bir kayıp yaşanmıştır. Bu kayıp deprem sonrası oluşan heyelanlar, yangınlar ve yol açma çalışmaları ile ilişkilendirilebilir.

Sulu tarım alanlarında da %19.52 oranında azalma gözlenmiş olup, 251.82 km² alan kaybedilmiştir. Bu azalma sulama altyapısının zarar görmesi su kaynaklarında meydana gelen değişimler ve çiftçilerin göç etmesi gibi faktörlerden kaynaklanmış olabilir. Su yüzeylerindeki %19.28'lik azalma

(30.35 km²), baraj ve göletlerdeki hasarlar ile yer altı su seviyelerindeki değişimlerle ilişkilendirilebilir.

Buna karşın, kuru tarım alanlarında belirgin bir artış görülmüştür. 2022'de 3,767.54 km² olan kuru tarım alanı, 2025'te 5,364.46 km²'ye yükselerek %42.39 oranında artmıştır. Bu artış sulu tarım yapılan alanlarda sulama sistemlerinin hasar görmesi sonucu çiftçilerin kuru tarıma yönelmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, kentsel ve orman alanlarından kuru tarım alanlarına dönüşümün de bu artışa katkı sağladığı düşünülmektedir.

Açık arazi sınıfında %1.26'lık minimal bir artış (128.64 km²) gözlenmiştir. Bu hafif artış deprem sonrası arazi kullanımındaki genel istikrarsızlığı ve geçiş dönemini yansıtmaktadır.

3.4. Spektral İndeks Analizleri

Çalışmada kullanılan spektral indeksler, Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü (AKAÖ) değişimlerinin saptanmasında stratejik bir rol oynamıştır. Bu kapsamda, bitki yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılan Normalleştirilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI), orman ve tarım alanlarındaki azalmaları başarıyla ortaya koymuştur deprem öncesinde yüksek değerlere sahip olan birçok alanın, deprem sonrasında düşük değerler sergilemesi vejetasyon kaybının somut bir göstergesi olmuştur. Nem içeriğinin tespiti için yararlanılan Normalleştirilmiş Fark Nem İndeksi (NDMI), sulu ve kuru tarım alanlarının birbirinden ayırt edilmesinde kritik bir işlev görmüş sulu tarım alanlarının kuru tarıma dönüşümü bu indeksteki azalmalarla net bir şekilde izlenmiştir. Toprak yansımasının etkilerini minimize etmek amacıyla kullanılan Toprak Ayarlı Bitki İndeksi (SAVI), özellikle bitki örtüsünün seyrek olduğu alanlarda NDVI'ya oranla daha hassas sonuçlar üretmiştir. Çıplak Toprak İndeksi (BSI), kentsel alanlar ile açık arazilerin ayrımında etkin bir performans sergileyerek yerleşim yerlerinin çıplak toprağa dönüşüm sürecinin analiz edilmesine önemli katkılar sağlamıştır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin tarım arazileri ve genel arazi örtüsü üzerindeki etkilerini, Google Earth Engine platformu ve Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanarak ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, depremlerin arazi kullanımı üzerinde önemli ve çok yönlü etkilere sahip olduğunu göstermektedir.

4.1. Sınıflandırma Performansı

Çalışmada kullanılan Rastgele Orman algoritması, %98'in üzerinde genel doğruluk ve 0.97'nin üzerinde Kappa değerleri ile oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar benzer deprem hasarı çalışmalarıyla uyumludur ve rastgele ormanın arazi örtüsü sınıflandırması için güçlü bir araç olduğunu doğrulamaktadır (Wang et al., 2023). GEE platformunun bulut

tabanlı işlem gücü, büyük ölçekli AKAÖ analizlerinde zaman ve hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır (Hu et al., 2018; Tesfaye et al., 2024).

Kullanılan spektral indekslerin kombinasyonu (NDVI, NDMI, SAVI, BSI), farklı arazi örtüsü türlerinin ayrımında kritik rol oynamıştır. Özellikle NDMI'nin sulu ve kuru tarım ayrımında, BSI'nin ise kentsel alanlar ile açık arazi ayrımında sağladığı katkı; spektral indekslerin arazi değişimi tespitindeki önemine dikkat çeken literatürdeki bulgularla paralellik göstermektedir (Lykhovyd ve Sharii, 2024; Pettorelli vd., 2005)

4.2. Kentsel Alanların Değişimi

Kentsel alanlardaki %53.44'lük dramatik azalma, depremin yapısal hasarının boyutunu açıkça ortaya koymaktadır. Reitman vd. (2023) ile Kobayashi vd. (2024) tarafından haritalanan 500 kilometreden fazla yüzey kırığı, kentsel dokuda geniş çaplı yıkımlara neden olmuştur. Bu bulgular, Wang vd. (2023) tarafından SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen bina hasarı tespiti çalışmalarıyla da paralellik göstermektedir. Kahramanmaraş, Nurdağı, Gaziantep ve Hatay gibi şehirlerde %7.59 ile %18.93 arasında değişen hasar oranları rapor edilmiştir.

Kentsel alanların büyük ölçüde açık arazi ve kuru tarım alanlarına dönüşmesi, deprem sonrası yıkım enkazının henüz temizlenmemiş olması ve kentsel yenileme sürecinin devam etmesi ile açıklanabilir. Bu durum, afet sonrası kentsel toparlanma sürecinin uzun vadeli bir süreç olduğunu göstermektedir (Ghaffarian et al., 2020).

4.3. Tarımsal Alanlardaki Değişimler

Sulu tarım alanlarındaki %19.52'lik azalma ve kuru tarım alanlarındaki %42.39'luk artış, depremin tarımsal altyapı üzerindeki doğrudan etkisini yansıtmaktadır. FAO (2023) raporunda belirtildiği gibi, depremler sulama kanalları, borular ve diğer tarımsal yapılara zarar vererek sulu tarım kapasitesini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Politics Today (2023) tarafından da vurgulandığı üzere etkilenen bölge Türkiye'nin toplam tarım arazisinin %15'ini oluşturmakta olup, yaklaşık 270,000 kayıtlı çiftçiyi barındırmaktadır.

Depremler, tarımsal alan kullanımında doğrudan değişiklik yaratmasa da (çünkü ekim zamanı dışında gerçekleşmiştir) sulama altyapısının hasar görmesi, depolardaki ürün kayıpları ve çiftçilerin göç etmesi gibi dolaylı etkiler tarımsal üretim modelini değiştirmiştir (World Bank Group, 2023). Sulu tarımdan kuru tarıma geçiş kısa vadede verim kaybına ve gıda güvenliği risklerine yol açabilir.

4.4. Orman Alanlarındaki Kayıplar

Orman alanlarındaki %41.96'lık azalma (666 km²), hem depremle ilişkili heyelanların (USGS, 2023) hem de deprem sonrası kurtarma çalışmaları sırasında açılan yolların ve geçici yerleşim alanlarının etkisini

yansıtmaktadır. Yapılan InSAR ve SAR analizleri, özellikle Doğu Anadolu Fayı boyunca yaygın yer değiştirmeleri ve heyelanları belgelemiştir (Kobayashi et al., 2024; Reitman et al., 2023).

USGS tarafından yayınlanan heyelan tespiti çalışmaları özellikle dağlık ve ormanlık alanlarda yoğun heyelan aktivitesi göstermiştir. Bu heyelanlar hem doğrudan ağaç kaybına neden olmuş hem de toprak yapısını bozarak orman rejenerasyonunu zorlaştırmıştır.

4.5. Su Kaynaklarındaki Değişimler

Su yüzeylerindeki %19.28'lik azalma, deprem sonrası baraj ve göletlerdeki yapısal hasarlar yer altı su seviyelerindeki değişimler ve olası sızıntılarla ilişkilendirilebilir. Türkiye'nin zaten su stresi altında olan bir ülke olması ve tarımsal üretimin toplam su tüketiminin %74'ünü oluşturması göz önüne alındığında su kaynaklarındaki bu azalma tarımsal sürdürülebilirlik açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır.

4.6. Çalışmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Araştırmalar

Yürütülen bu araştırmanın yöntemsel ve kapsamsal açıdan bazı kısıtlılıkları bulunmaktadır. Zamansal kapsam bakımından deprem sonrası süreç için yalnızca 2025 yılı verileri temel alınmış dolayısıyla 5-10 yıllık uzun vadeli toplanma süreci bu çalışmada izlenmemiştir. Mekânsal çözünürlük noktasında Sentinel-2 platformunun sunduğu 10 metrelik çözünürlük genel arazi kullanımı ve arazi örtüsü (AKAÖ) paternlerini belirlemek için yeterli olsa da daha mikro ölçekli detaylar için WorldView veya Pleiades gibi yüksek çözünürlüklü uydu verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, analizlerde sadece optik görüntülerin kullanılmış olması bir diğer kısıtlılığı oluşturmaktadır. Sentinel-1 SAR verilerinin sürece dâhil edilmesi özellikle bulutlu dönemlerde ve yapısal hasar tespitinde daha güvenilir sonuçların elde edilmesine imkân tanıyabilir (Wang et al., 2023). Son olarak arazi değişimlerinin sosyoekonomik nedenleri ve sonuçları bu araştırmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Gelecek araştırmalar için Sentinel-1 SAR ve Sentinel-2 optik verilerinin füzyonu ile daha kapsamlı bir değişim tespiti modelinin geliştirilmesi önerilmektedir. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak amacıyla U-Net veya DeepLabV3 gibi derin öğrenme algoritmalarının kullanılması ve fay hattına mesafeye göre hasarın gradiyent analizinin yapılması akademik açıdan önemli bir derinlik sağlayacaktır. Bunlara ek olarak uzaktan algılama verilerinin çiftçi anketleri ve sosyoekonomik veri setleri ile entegre edilmesi deprem sonrası arazi kullanımı evriminin toplumsal boyutunu da aydınlatacaktır. Uzun vadeli (10 yıl ve üzeri) izleme çalışmalarıyla bölgedeki arazi kullanımı değişim trendlerinin sürekliliği ve yönü daha net bir biçimde ortaya konulabilecektir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Google Earth Engine (GEE) platformunun sunduğu yüksek işlem kapasitesi ve Sentinel-2 uydu görüntülerinin spektral hassasiyeti sayesinde, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin arazi kullanımı ve arazi örtüsü (AKAÖ) üzerindeki mekânsal etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Rastgele Orman (RF) algoritması ile %98'in üzerinde genel doğruluk oranına ulaşılması, üretilen haritaların ve değişim istatistiklerinin güvenilirliğini kanıtlamıştır. Analiz sonuçları, depremin kentsel doku üzerinde %53.44 ve orman alanlarında %41.96 oranında bir azalmaya yol açarak ekosistem ve yerleşim bütünlüğünde ciddi bir tahribat yarattığını göstermektedir.

Tarımsal açıdan en dikkat çekici bulgu; sulu tarım alanlarındaki %19.52'lik azalmaya karşılık, kuru tarım alanlarında gözlenen %42.39'luk belirgin artıştır. Bu durum, bölgedeki sulama altyapısının, kanalların ve depolama tesislerinin deprem sırasında aldığı yapısal hasarın bir sonucu olarak tarımsal üretim modelinin 'sulu tarımdan kuru tarıma' zorunlu bir geçiş yaşadığını işaret etmektedir. NDVI, NDMI, SAVI ve BSI gibi spektral indekslerin entegrasyonu, bu hassas arazi geçişlerinin ve bitki sağlığındaki bozulmaların piksel bazlı tespit edilmesinde kritik bir rol oynamıştır.

Araştırmadan elde edilen bulgular; deprem sonrası arazi yönetimi, tarımsal rehabilitasyon planlaması ve kentsel yenileme politikaları için dinamik ve bilimsel bir veri seti sunmaktadır. Özellikle stratejik ürün deseninin korunması ve zarar gören tarımsal altyapının onarımı noktasında bu tür uzaktan algılama tabanlı analizler, karar vericilere zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Çalışmanın kapsamı, gelecek araştırmalarda Sentinel-1 SAR verilerinin entegrasyonu ve derin öğrenme mimarilerinin uygulanmasıyla genişletilebilir. Ayrıca, bölgedeki toparlanma sürecinin ve arazi kullanımındaki evrilmenin sürdürülebilir bir şekilde takip edilebilmesi için uzun vadeli izleme programlarının hayata geçirilmesi önerilmektedir.

REFERANSLAR

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.

Climate Scorecard. (2023). *Water stress and climate change impacts in Turkey.* https://www.climatescorecard.org/2023/06/water-stress-and-climate-change-impacts-in-turkey/ adresinden 4 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Dündar, T. (2025). Sentinel-2 Multispektral Zaman Serileri Kullanarak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tarımda Değişim Tespiti. *EMO Bilimsel Dergi*. Cilt: 15 Sayı:3, 17-30.

FAO. (2023). *Türkiye earthquakes: Initial assessment indicates losses of more than 20 percent in food production.* https://www.fao.org/newsroom/detail/turkiye-

earthquakes-initial-assessment-indicates-losses-of-more-than-20-percent-in-food-production/en adresinden 4 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257-266.

Ghaffarian, S., Farhadabad, A. R., ve Kerle, N. (2020). Post-disaster recovery monitoring with google earth engine. Applied Sciences (Switzerland), 10(13).

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., ve Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27.

Hu, Y., Dong, Y., ve Batunacun. (2018). An automatic approach for land-change detection and land updates based on integrated NDVI timing analysis and the CVAPS method with GEE support. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 347–359.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., ve Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment. Volume 83, Issues 1–2, 195-213.

Kobayashi, T., Munekane, H., Kuwahara, M., ve Furui, H. (2024). Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation. Geophysical Journal International, 236(2), 1068–1088.

Lykhovyd, P. V., ve Sharii, V. O. (2024). Normalised difference moisture index in water stress assessment of maize crops. Agrology, 7(1), 21–26.

Özşahin, E., ve Öztürk, M. (2024). Evaluation of parameters affecting earthquake damage using a GIS-based random forests machine learning model: A case study of the February 6, 2023, Kahramanmaraş (Türkiye) earthquakes. Journal of Geography, (49), 43-63.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., ve Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In Trends in Ecology and Evolution (Vol. 20, Issue 9, pp. 503–510).

Politics Today. (2023). Türkiye'de depremden etkilenen tarım bölgeleri ve ekonomik sonuçları. https://politicstoday.org/turkiye-deprem-tarim-ekonomik-etkiler adresinden 4 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Reitman, N. G., Briggs, R. W., Barnhart, W. D., Hatem, A. E., Jobe, J. A. T., Duross, C. B., Gold, R. D., Mejstrik, J. D., Collett, C., Koehler, R. D., ve Akçiz, S. (2023). Rapid Surface Rupture Mapping from Satellite Data: The 2023 Kahramanmaraş, Turkey (Türkiye), Earthquake Sequence. Seismic Record, 3(4), 289–298.

Rikimaru, A., Miyatake, S., ve Roy, P., S. (2002). Tropical forest cover density mapping. International Society for Tropical Ecology. Vol 43 (No 1):39-47.

Tesfaye, W., Elias, E., Warkineh, B., Tekalign, M., ve Abebe, G. (2024). Modeling of land use and land cover changes using google earth engine and machine learning approach: implications for landscape management. Environmental Systems Research, 13(1).

T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı [SBB]. (2023). 2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf

U.S. Geological Survey (USGS). (2023). Landslides triggered by the February 6, 2023 Türkiye earthquakes. https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards/landslides-triggered-february-6-2023-turkiye-earthquakes adresinden 4 Kasım 2025 tarihinde alınmıştır.

Wang, X., Feng, G., He, L., An, Q., Xiong, Z., Lu, H., Wang, W., Li, N., Zhao, Y., Wang, Y., ve Wang, Y. (2023). Evaluating Urban Building Damage of 2023 Kahramanmaras, Turkey Earthquake Sequence Using SAR Change Detection. Sensors, 23(14).

World Bank Group. (2023). Türkiye earthquakes of February 6, 2023: Rapid damage and needs assessment (RDNA). https://www.worldbank.org/en/country/turkey/publication/turkiye-earthquakes-of-february-6-2023-rapid-damage-and-needs-assessment adresinden 4 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Yapıların Yıldırımdan Korunma Sistemlerine Genel Bakış

Cihan AYHANCI[1]

1- Öğr. Gör.; Harran Üniversitesi Şanlıurfa Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü. ayhanci@harran.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5749-0352

ÖZET

Atmosferik bir deşarj fenomeni olan yıldırım, yüksek akım genliği ve elektromanyetik etkileri nedeniyle modern yapılar ve bu yapıların içindeki hassas elektronik sistemler için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Günümüzde binaların korunması, yalnızca fiziksel bir yakalama çubuğundan ibaret olmayıp, risk analizine dayalı kapsamlı bir mühendislik sürecini gerektirmektedir. Bu kitap bölümü, binaların yıldırımdan korunması konusunu IEC 62305 standartlar dizisi rehberliğinde bütüncül bir perspektifle ele almaktadır. Bölüm kapsamında öncelikle yıldırımın oluşum mekanizması ve deşarj türleri incelenerek, bu fenomenin yapılar üzerindeki termal, mekanik ve elektriksel zararları analiz edilmektedir. Etkin bir koruma stratejisinin temel taşlarını oluşturan; doğrudan darbelere karşı dış yıldırımdan korunma, aşırı gerilimlere karşı iç yıldırımdan korunma (parafudr), güvenli deşarj için topraklama ve ark oluşumunu engelleyen eşpotansiyel kuşaklama sistemlerinin entegrasyonu detaylandırılmaktadır. Çalışmada, mühendislik tasarımından periyodik denetime kadar olan sürecin bir bütün olarak yönetilmesinin can ve mal güvenliği açısından kritik önemi vurgulanmaktadır. Bu bölüm, araştırmacılar ve uygulamacı mühendisler için standartlara uyumlu, sürdürülebilir ve güvenilir yıldırımdan korunma sistemlerinin tasarımı konusunda teknik bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – IEC 62305, Yıldırımdan Korunma, Dış Yıldırımlık, İç Yıldırımlık, Parafudr, Topraklama, Risk Yönetimi.

1. GİRİŞ

Yıldırım, ışığı (şimşek) ve sesi (gök gürültüsü) ile doğal olarak oluşan ilginç bir şekilde ayrımsal (fraktal) olarak oluşan ve herkes tarafından bilinen, en tanınmış doğa olayıdır. İnsanlık tarihine bakıldığında yıldırım ve gök gürültüsü pek çok eski uygarlıkta ve mitolojide farklı şekillerde anlamlandırmıştır. Yıldırım, rastgele meydana gelen ve kestirilemeyen bir doğa olayıdır. Yıldırım, "en az dirençli yol" olarak adlandırılan temel fizik yasasını izlemektedir. Her yıl dünyada ortalama olarak 20 000'den fazla yangına ve 2 milyar doları aşan maddi zarara neden olmaktadır. Birçok bilim insanı yıldırım olayını çeşitli şekillerde açıklamıştır. Bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar ve bulguları Tablo 1'de sunulmuştur (Kalenderli, 2011)

.

Tablo 1 Bilim insanlarının yıldırım ile ilgili çalışma ve bulguları (Kalenderli, 2011)

Bilim İnsanı	Çalışma ve Bulgusu
Aristoteles	Yıldırımın ay ile dünya arasındaki boşlukta, ateş ile hava arasındaki dengenin değişimi olarak açıklamaya çalışmıştır.
Leonardo da Vinci	Uzun yıllar sonra, yıldırımın bulutların çarpışmasının bir sonucu olduğunu söylemiştir. Bu açıklama yapıldığında yıldırım ile elektriksel olaylar arasındaki ilişki bilinmiyordu.
William Wall	İngiliz bilim insanı, 1708 yılında elektrik boşalmasının kıvılcım şekli ve sesi ile yıldırıma ve gök gürültüsüne benzediğini söyleyen ilk kişi olmuştur.
Pieter van Muschenbrook	Hollandalı bilim insanı, 1745 yılında "Leiden (Leyden) şişesi" olarak bilinen yapıyı oluşturmuş ve elektrik kıvılcımlarının yıldırım boşalmalarına benzer olduğunu ifade etmiştir.
Isaac Newton	İngiliz bilim insanı Newton, elektrik boşalmalarını gözlerken; kıvılcımları gözlemlemesinin onu çok küçük ölçekte bir yıldırımı gözlemlediği düşüncesinin oluşmasına neden olduğunu belirtmiştir.
Benjamin Franklin	Amerikalı bilim insanı Franklin, 1749'da yaptığı çalışmaların sonunda elektrik akımı ile yıldırım boşalması arasındaki benzerliği ifade ettiği çalışmalar yapmıştır. 1760 yılında Philadelphia'da Mr. West binasına yıldırım çarparken etkinliğini kanıtladığı "yıldırım çubuğu (bugün Franklin çubuğu veya yakalama ucu olarak kullanılan koruma elemanı)" ile bir yıldırımdan koruma sistemi tasarlamıştır.
Georg Wilhelm Richmann	Yıldırım boşalması üzerine çalışmalar yapan Rus bilim insanı Richmann, 1753 yılında gerçek yıldırımla yaptığı deney sırasında yıldırım çarpması sonucunda hayatını kaybetmiş, asistanı ise ağır yaralanmıştır.
Georg Christoph Lichtenberg	Alman bilim insanı Lichtenberg, yıldırımı Lichtenberg şekilleri olarak adlandırılan şekilleri ile açıklamıştır.
Micheal Faraday	İngiliz kimyacı ve fizikçi olan Faraday, etkiyle elektriklenme kuramını ortaya koyarak çukur bir iletkenin (faraday kafesi) elektrostatik etkilere ekran oluşturduğunu göstermiştir.
Louis Mertens	19.yüzyılda, korunacak binayı topraklanmış iletkenler içine (bir faraday kafesi içine) almaya dayanan bir yöntemin geliştirilmesi sağlanmıştır. Çatının sivri uçlarında radyoaktif elementler kullanılarak, yakalama ucu gibi yapılarla koruma yapılmıştır.

Yıldırımın Oluşumu ve Türleri

Yıldırım, genellikle cumulonimbus bulutları içinde oluşan güçlü yük ayrışmasının bir sonucudur. Bu bulutların idealize edilmiş yapısı, dikey olarak istiflenmiş üç ana yük bölgesinden oluşur: üstte ana pozitif (P), ortada ana negatif (N) ve altta daha küçük bir pozitif (LP) yük bölgesi. Yeryüzüne negatif yük taşıyan ve en yaygın olan yıldırım türü, buluttaki ana negatif yük bölgesi ile alttaki pozitif yük bölgesi arasındaki bir ön boşalma ile başlar. Bu

süreç, yeryüzüne doğru adım adım ilerleyen, negatif yüklü bir plazma kanalı olan "kademeli öncü"nün (stepped leader) oluşması için gerekli koşulları sağlar. Bu öncünün yeryüzüne yaklaşmasıyla, yerden yükselen pozitif yüklü bir "karşılayıcı öncü" ile birleşmesi sonucu "geri dönüş darbesi" (return stroke) meydana gelir ve yıldırım akımı bu iletken kanal üzerinden toprağa akar. Bir yıldırım olayı (flash), genellikle aralarında milisaniyeler olan birden fazla darbeden (stroke) oluşur. İlk darbeden sonra, eğer bulutta yeterli yük kalmışsa, aynı iyonize kanal üzerinden ek darbeler meydana gelebilir. Bunlara "müteakip" veya "sonraki" darbeler denir (Dehn, 2015).

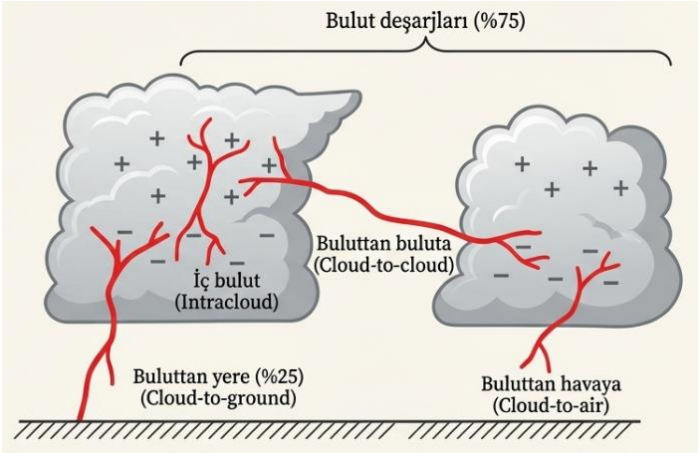
Tablo 2 Yıldırımın etkileri (Kalenderli, 2011)

Doğrudan Etki	Dolaylı Etki
1. Isıl (termik) etki	Joule kaybı nedeniyle ortaya çıkan ısı, erime ve yangın
2. Termodinamik veya elektrodinamik etki	Şekil değiştirme, deformasyon
3. Elektromanyetik etki	Endüksiyon etkisi
4. Akustik etki	Gök gürültüsü (yaklaşık 10 km'ye kadar)
5. Görsel etki	Işık etkisi, şimşek oluşumu
6. Elektrokimyasal etki	Ozon (O_3) ve Nitrik asit (HNO_3) ortaya çıkması
7. Canlılara (insan ve hayvanlara) etkisi	Tehlikeli yanıklar, kas kasılmaları, kalp ve solunum sorunu ve adım geriliminin oluşması

Yıldırım, kilometrelerce uzunluğa sahip, tipik olarak on binlerce amperlik akım taşıyan geçici bir elektriksel deşarjdır. Bu deşarjın oluşturduğu plazma kanalı, Güneş'in yüzey sıcaklığından yaklaşık beş kat daha fazla olan 30.000 K sıcaklığa ulaşabilir. Yıldırımın temel kaynağı, dikey rüzgarların ve su parçacıklarının etkileşimiyle elektriklenen kümülonimbus (cumulonimbus) bulutlarıdır. Bulut içindeki yük yapısı genellikle üstte ana pozitif, ortada ana negatif ve altta küçük bir pozitif yük bölgesinden oluşan bir "tripol" (üç kutuplu) modelle açıklanır (Rakov, 2021). Yük nötrleşme sürecine göre yıldırımlar temel olarak ikiye ayrılır:

- **Bulutlar arası (cloud-to-cloud) deşarjlar:** Toplam yıldırım aktivitesinin yaklaşık %75'ini oluşturur ve yere doğrudan çarpmazlar, ancak yaydıkları elektromanyetik darbeler (LEMP) elektronik sistemler için risk teşkil eder (Rakov, 2021; Dehn, 2015).
- **Yere yönelik deşarjlar (cloud-to-earth):** Toplam aktivitenin yaklaşık %25'idir ve korunma sistemlerinin ana odağıdır (Rakov, 2021; Dehn, 2015). Yere yönelik yıldırımlar da kendi içlerinde aşağı yönlü (downward) ve yukarı yönlü (upward) olarak ikiye ayrılır.

Aşağı yönlü yıldırımların yaklaşık %90'ı negatiftir ve düz arazilerde daha yaygındır; yukarı yönlü yıldırımlar ise genellikle rüzgar türbinleri, radyo kuleleri veya dağ tepeleri gibi 100 metreden yüksek nesnelerden tetiklenir (Rakov, 2021; Dehn, 2015).



Şekil 1: Deşarjın fiziksel karakteristiği (Han, 2021)

Küresel yıldırım aktivitesinin yaklaşık %75'i bulut içi veya bulutlar arası deşarjlardır. Yere isabet eden ve asıl hasara yol açan deşarjlar ise toplamın yaklaşık %25'ini oluşturmaktadır. Bir buluttan-yere deşarj olayı (flash), genellikle tek bir olay gibi görünse de ortalama üç-beş ayrı darbeden (stroke) oluşmaktadır. Bu darbeler arasındaki süre milisaniyeler ile ölçülmektedir (Dehn, 2015).

Yıldırımın Zararları

Yıldırım, kilometrelerce uzunluğa ulaşabilen ve on binlerce amperlik akım taşıyan devasa bir elektriksel deşarj olarak, hem canlılar hem de yapılar üzerinde çok boyutlu zararlara yol açmaktadır. Yıldırımın canlılar üzerindeki etkisi çoğu zaman ölümcül olabilir veya kalıcı sakatlıklara yol açar. Doğrudan çarpılma oldukça nadir bir durumken (%3-5), canlılar genellikle adım gerilimi (toprağa dağılan akımın ayaklar arasından geçmesi), dokunma gerilimi veya yan atlamalar (yakındaki bir nesneye çarpan yıldırımın canlıya sıçraması) yoluyla yaralanır. Yıldırım çarpmaları anında kalp ve solunum durmasına neden olabilir. Ayrıca beyin hasarı, hafıza kaybı, felç gibi nörolojik sorunlar; kulak zarı patlaması ve katarakt gibi duyu organı hasarları; Lichtenberg figürleri adı verilen karakteristik deri izleri ve ciddi yanıklar oluşabilir. Tarım alanlarında ve meralarda bulunan hayvanlar, özellikle metal çitlerin yanında toplandıklarında veya ağaç altlarında saklandıklarında toplu halde telef olabilirler (Kalenderli, 2011). Doğrudan yıldırım darbeleri yapılar üzerinde mekanik ve termal yıkıma neden olur. Yıldırımın yüksek ısısı, ahşap çatılar gibi yanıcı malzemeleri tutuşturabilir

veya yapı içindeki patlayıcı/parlayıcı gazları ateşleyebilir. Yıldırım kanalı içindeki aşırı basınç, betonun parçalanmasına, tuğla duvarların çökmesine ve metal yüzeylerin delinmesine veya erimesine yol açabilir. Tarihi binalar ve müzeler gibi yapılar yıldırımın fiziksel etkileriyle geri döndürülemez şekilde zarar görebilir. Yıldırımın en sık görülen zararlarından biri, doğrudan temas olmasa dahi hassas cihazları devre dışı bırakmasıdır. Yıldırımın oluşturduğu elektromanyetik darbe (LEMP), kablo döngülerinde yüksek gerilimler indükleyerek bilgisayarların, kontrol sistemlerinin ve iletişim ağlarının yanmasına neden olur. Güç hatlarına düşen yıldırımlar, transformatörlerin patlamasına ve geniş çaplı elektrik kesintilerine yol açar. Özellikle rüzgar türbinleri ve haberleşme kuleleri gibi yüksek yapılar bu riske çok daha açıktır (Han, 2021). Yıldırımın dolaylı zararları çoğu zaman doğrudan fiziksel hasardan daha maliyetli olabilir. Fabrikalarda veya enerji tesislerinde yıldırım nedeniyle oluşan bir arıza, üretimin durmasına ve büyük çaplı finansal kayıplara neden olur (Rakov, 2021; Dehn, 2015). Su, gaz veya elektrik dağıtım sistemlerinin zarar görmesi, toplumun geniş kesimlerinin bu temel hizmetlerden mahrum kalmasına yol açar. Bilgi işlem merkezlerindeki hasarlar, kritik ticari veya güvenlik verilerinin kalıcı olarak silinmesine sebep olabilir (Dehn, 2015).



Şekil 2: Yıldırımın etkileri (Kalenderli, 2011)

Binaların Yıldırımdan Korunması

Binaların yıldırımdan korunması, yapıyı yangın veya mekanik yıkım gibi fiziksel hasarlardan korumak ve içindeki insanları yaralanma veya ölüm riskine karşı güvence altına almak için tasarlanan dış ve iç yıldırımdan korunma sistemlerinin birleşimidir (Dehn, 2015).

Dış yıldırımdan korunma sistemi, üç temel görev üstlenir. Bunlar, doğrudan yıldırım çarpmalarını bir yakalama ucu sistemi ile durdurmak, yıldırım akımını bir iniş iletkeni sistemi aracılığıyla güvenli bir şekilde aşağı iletmek

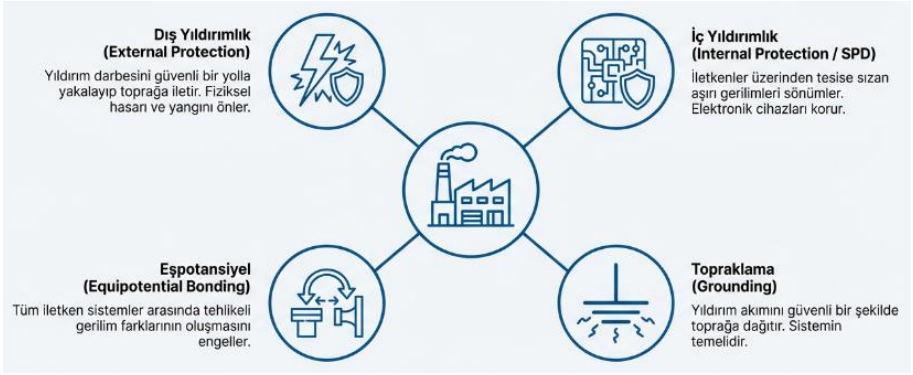
ve bu akımı bir topraklama sistemi vasıtasıyla toprağa dağıtmaktır. Yakalama uçlarının konumlandırılmasında yuvarlanan küre, örgü (mesh) ve koruma açısı olmak üzere üç farklı yöntem kullanılır. Geometrik olarak karmaşık yapılar için özellikle tavsiye edilen yuvarlanan küre yöntemi, yıldırımın potansiyel temas noktalarını belirlemek için yapının üzerinde hayali bir kürenin gezdirilmesi esasına dayanır. İniş iletkenleri, yıldırım akımının toprağa deşarjı sırasında binaya zarar vermesini önlemek için mümkün olduğunca kısa, dikey ve döngüsüz (loop oluşturmadan) kurulmalıdır. Topraklama sistemi ise akımın toprağa güvenli geçişini sağlar; yeni binalarda genellikle beton içine gömülen temel topraklaması tercih edilirken, mevcut binalarda binanın etrafını saran halka topraklama sistemleri yaygındır (Dehn, 2015; Barwise, 2021).

İç yıldırımdan korunma sistemi, bina içindeki metal tesisatlar ile elektrikli ve elektronik sistemler arasında tehlikeli kıvılcımların oluşmasını engeller. Bu koruma, tüm izole iletken parçaların doğrudan veya aşırı gerilim koruyucu cihazlar (parafudr) (SPD) aracılığıyla eşpotansiyel kuşaklama sistemine bağlanmasıyla veya bileşenler arasında yeterli bir ayrılma mesafesi bırakılarak sağlanır. Elektrikli sistemleri korumak için Tip 1 (yıldırım akımı), Tip 2 (aşırı gerilim) ve Tip 3 (hassas cihaz koruma) parafudr (SPD'ler), binanın farklı noktalarında koordineli bir şekilde kullanılır (Dehn, 2015).

Topraklama, yıldırım akımının tesis dışına güvenli bir şekilde dağıtılmasını sağlayan temel altyapıdır. Yıldırımdan korunma topraklaması, bir fonksiyon topraklamasıdır ve darbenin ilk şokunu tesisin dışına atmak üzere özel olarak tasarlanır. Sistemin genel performansının temelini oluşturur (Barwise, 2021).

Eşpotansiyel kuşaklama, tesis içerisindeki tüm metal aksamların, iletken sistemlerin ve topraklama ağlarının birbirine bağlanarak aynı potansiyele getirilmesi işlemidir. Bu sayede, yıldırım deşarjı anında farklı iletkenler arasında tehlikeli potansiyel farklarının oluşması engellenir. Bu farklar, kontrolsüz ark atlamalarına ve kıvılcımlara neden olabileceğinden, eşpotansiyel kuşaklama can ve mal güvenliği için hayati önem taşır (Barwise, 2021).

IEC 62305 standardına göre, bir tesisi yıldırıma karşı korumaya almak, birbiriyle entegre çalışan dört sistemin doğru tasarlanmasıyla ümkündü. Bu dört ayaktan herhangi birinin eksikliği veya yanlış tasarlanmış oluşu, tüm sistemi etkisiz hale getirmektedir (IEC, 2010).



Şekil 2: Yıldırımdan korunmada bütünsel sistemin dört temel direği

IEC 62305 standardı, yıldırımdan korunma konusuna devrimsel bir bakış açısı getirerek, konuyu birbirinden ayrılamaz dört temel bileşenin entegrasyonu olarak tanımlamıştır. Bu bütüncül yaklaşımı dikte ederek modern yıldırımdan korunma mühendisliğinin temel dayanağını oluşturan bu standart, tesis güvenilirliği ve operasyonel sürekliliğin sağlanması için kritik bir öneme sahiptir. Tesisin bir zincir gibi en zayıf halkası kadar güvende olacağı prensibinden hareketle, bu dört bileşenin her biri vazgeçilmez bir rol üstlenir (Rousseau, 2021)

2.IEC 62305 STANDARTLARI

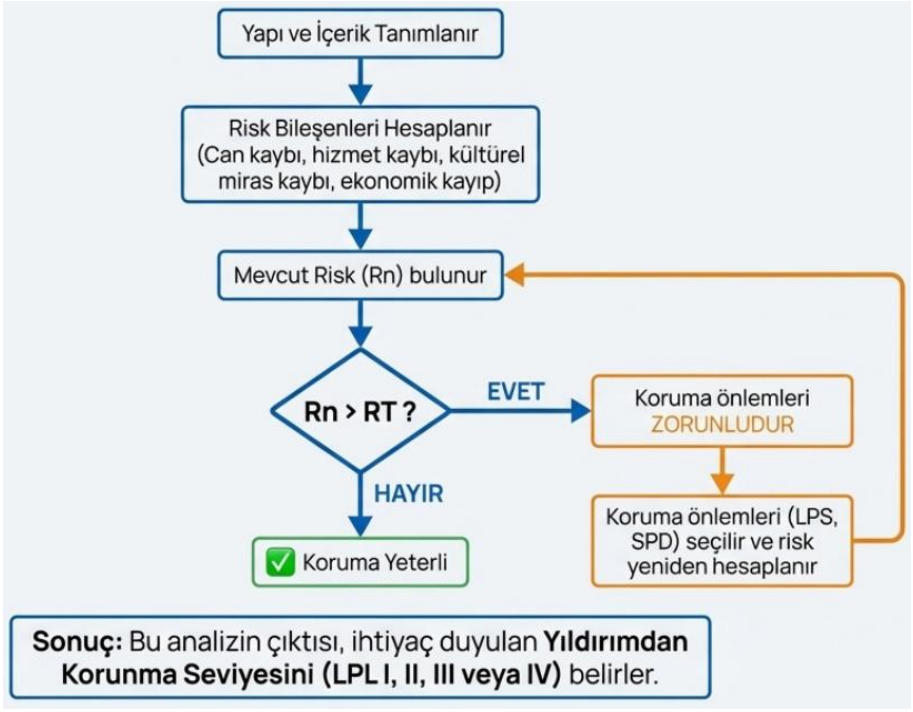
IEC 62305, yapıların ve içindeki sistemlerin yıldırımdan korunması için uluslararası düzeyde kabul görmüş, kapsamlı ve mühendislik temelli en temel standarttır (ABB, 2012). Bu standart, sadece paratoner kurulumunu değil; risk analizinden iç sistemlerin (elektronik cihazlar) korunmasına kadar dört ana bölümden oluşan entegre bir koruma yaklaşımı sunar (IEC, 2010).



Şekil 3: IEC 62305 Standartları ve içeriği (IEC, 2010)

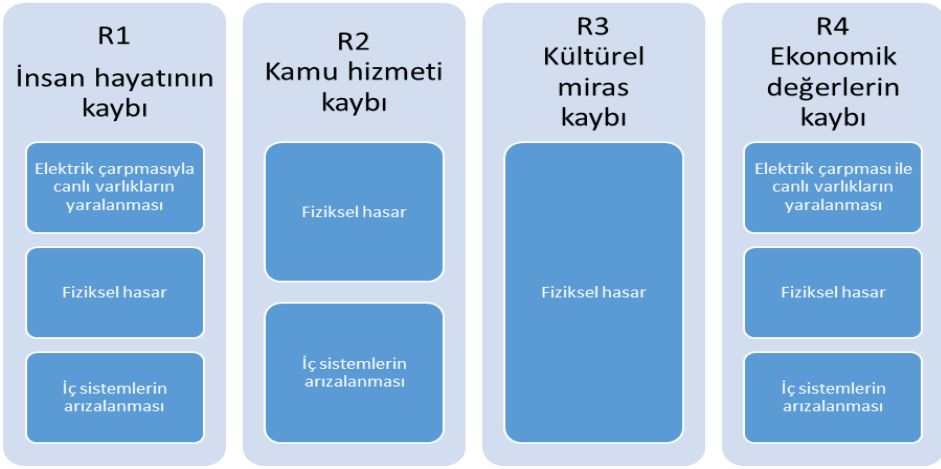
Standart, şekilde belirtildiği gibi birbirini tamamlayan dört parçadan oluşur. Bölüm 1: Genel İlkeler**,** yıldırımın karakteristiklerini (akım genliği, dalga şekli vb.) ve koruma düzeylerini (LPL) tanımlar. Bölüm 2: Risk Yönetimi, bir yapının korunmaya ihtiyacı olup olmadığını ve hangi seviyede koruma gerektiğini belirlemek için yapılan hesaplamaları kapsar. IEC 65302-2'ye

göre ilk adım, yapının özelliklerine (boyut, konum, kullanım amacı, içindeki sistemler) göre bir risk analizi yapmaktır. Amaç, katlanılabilir risk ile mevcut risk arasındaki ilişkiyi kurmaktır. Bu bölümde hesaplanan risk (R_n), tolere edilebilir risk (R_T) ile karşılaştırılır (Rousseau, 2021).



Şekil 3: IEC 62305-2'ye göre Risk Yönetimi (Rousseau, 2021)

Bir yapının yıldırımdan korunmaya ihtiyacı olup olmadığını belirlemek için kullanılan bilimsel risk analizi yöntemini içerir. Analiz kapsamında dört ana kayıp türü değerlendirilir: L1 (İnsan hayatı kaybı), L2 (Kamu hizmeti kaybı), L3 (Kültürel miras kaybı) ve L4 (Ekonomik değer kaybı). Hesaplanan risk, kabul edilebilir bir "tolerans değerinden" yüksekse, koruma önlemleri zorunlu hale gelir (Dehn, 2015; Rousseau, 2021).



Şekil 4 Hasar tiplerinden kaynaklanan kayıp ve bunlara karşılık gelen riskler (Kalenderli, 2011)

Bölüm 3: Yapılarda Fiziksel Hasar ve Hayati Tehlike**,** dış yıldırımdan korunma sistemlerinin (LPS) tasarımı, kurulumu ve topraklama kriterlerini içermektedir. Doğrudan yıldırım çarpmalarına karşı koruma sağlayan Dış Yıldırımdan Korunma Sistemlerinin (yakalama uçları, iniş iletkenleri ve topraklama) tasarımını ele alır. Ayrıca, yapı içindeki metal tesisatlar arasında oluşabilecek tehlikeli kıvılcımları önlemek için eşpotansiyel kuşaklama ve ayrılma mesafesi kriterlerini tanımlar (Dehn, 2015; Rousseau, 2021).

Bölüm 4 - Yapı İçindeki Elektrikli ve Elektronik Sistemler: Hassas cihazların yıldırımın elektromanyetik darbelerinden (LEMP) korunması için Yıldırımdan Korunma Bölgeleri (LPZ) kavramını açıklar. Bu bölümde, manyetik ekranlama ve koordineli aşırı gerilim koruyucu cihazların (SPD/Parafudr) seçimi ve kurulumu detaylandırılır (Dehn, 2015; Han, 2021). Standardın temel kavramlarından biri olan Yıldırımdan Koruma Seviyeleri (LPL), I'den IV'e kadar sınıflandırılır. LPL I, en yüksek koruma seviyesini temsil eder ve 200 kA'lik tepe akımlarına göre tasarlanırken, 3 kA'lik çok küçük yıldırımları bile yakalayacak hassasiyettedir. Tasarımda yakalama uçlarının yerleşimi için yuvarlanan küre, örgü (mesh) ve koruma açısı olmak üzere üç yöntem kullanılır (Dehn, 2015; Barwise, 2021).

1. DIŞ YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ

Dış yıldırımlık sistemi (LPS), bir yapıyı doğrudan yıldırım çarpmalarına karşı korumak, bu darbeleri yakalamak ve yıldırım akımını yapıya zarar vermeden güvenli bir şekilde toprağa ileterek dağıtmak amacıyla tasarlanan sistemdir. Kaynaklara göre dış yıldırımdan korunma sistemi üç temel alt sistemden oluşur: Yakalama ucu sistemi (ATS), iniş iletkeni sistemi (DCS) ve topraklama sistemi (ETS) (Han, 2021).

Yakalama Ucu Sistemi (Air-Termination System - ATS)

Bu sistemin temel görevi, yapıya yönelecek doğrudan yıldırım darbelerini yakalamak ve kontrol altına almaktır. Yakalama uçlarının yerleşimi ve tasarımı için kaynaklarda üç temel yöntem belirtilmektedir:

- **Yuvarlanan Küre Yöntemi:** En evrensel yöntemdir ve geometrik olarak karmaşık yapılar için özellikle tavsiye edilir. Bu yöntemde, seçilen Yıldırımdan Korunma Seviyesine (LPL) göre belirlenen bir yarıçaptaki hayali küre yapının üzerinde gezdirilir ve kürenin temas ettiği her nokta potansiyel bir darbe noktası olarak kabul edilerek buralara yakalama uçları yerleştirilir.
- **Koruma Açısı Yöntemi:** Basit ve simetrik yapılar için uygundur; yakalama ucu ucundan itibaren belirli bir açıyla aşağıya doğru uzanan koni şeklinde bir koruma alanı oluşturur
- **Örgü (Mesh) Yöntemi:** Düz çatılar ve geniş yüzeyler için kullanılır; çatıda LPL seviyesine göre belirli ağ genişliklerinde (örneğin LPL I için 5x5 m, LPL III için 15x15 m) iletken bir ağ oluşturulur (Barwise, 2021).



Şekil 5 Yakalama ucu sistemlerinin yerleşimi için kullanılan yöntemler (Barwise, 2021)

İniş İletkeni Sistemi (Down-Conductor System - DCS)

Yakalama uçları tarafından yakalanan akımı toprağa ileten bu sistemin tasarımında "az çoktur" prensibi değil, aksine ne kadar çok paralel yol varsa o kadar iyidir prensibi geçerlidir. İletkenler, yıldırım akımının paylaşılması ve etkisinin azaltılması için mümkün olduğunca çok sayıda paralel yol oluşturacak şekilde kurulmalıdır. İletkenlerin yolu en kısa ve dikey olmalı, keskin bükümlerden ve döngülerden (loop) kaçınılmalıdır. İniş iletkenleri arasındaki mesafe LPL seviyesine göre belirlenir (Han, 2021).

Topraklama Sistemi (Earth-Termination System - ETS)

Yıldırım akımının tesis dışına güvenli bir şekilde dağıtılmasını sağlayan temel altyapıdır. Yıldırımdan korunma topraklaması, bir fonksiyon topraklamasıdır ve darbenin ilk şokunu tesisin dışına atmak üzere özel olarak

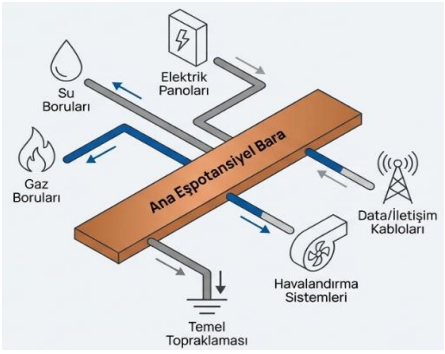
tasarlanır. Sistemin genel performansının temelini oluşturur. Bu sistem, yıldırım akımını toprağa deşarj eder ve yapı çevresindeki adım ve dokunma gerilimlerini minimize edecek şekilde tasarlanmalıdır. İki tip düzenleme mevcuttur [4]. Tip A düzenlemesi, yapı dışına yerleştirilen dikey (çubuk) veya yatay (radyal) münferit elektrotları kapsar; genellikle basit yapılar ve telekomünikasyon kuleleri için uygundur. Tip B düzenlemesi, Yapıyı çevreleyen bir halka topraklayıcı (ring) veya temel topraklamasını kapsar; daha yüksek güvenlik gerektiren yapılar için tercih edilir. Dış yıldırımlık sisteminde kullanılan bakır, alüminyum ve paslanmaz çelik gibi metaller belirli minimum kesit alanlarına sahip olmalıdır. Farklı metallerin birleşim noktalarında korozyonu önlemek için paslanmaz çelik ara bağlantı elemanları veya özel klemensler kullanılmalıdır (Dehn, 2015).

3.İÇ YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ

İç yıldırımdan korunma sistemi, yıldırım akımının yapı içindeki metal tesisatlar, elektrik ve elektronik sistemler üzerinde neden olabileceği tehlikeli kıvılcımları (arkları) ve aşırı gerilimleri önlemek amacıyla tasarlanmış bir önlemler bütünüdür. Bu sistemin temel işlevi, yapı içindeki farklı iletken parçalar arasındaki potansiyel farkları minimize ederek yangın, patlama ve cihaz hasarlarını engellemektir. İç yıldırımdan korunma sistemi iki temel yöntemle uygulanır. Bunlar yıldırımdan korunma eşpotansiyel kuşaklaması (LEB) ve ayrılma mesafesidir (Han, 2021).

Yıldırımdan Korunma Eşpotansiyel Kuşaklaması (LEB)

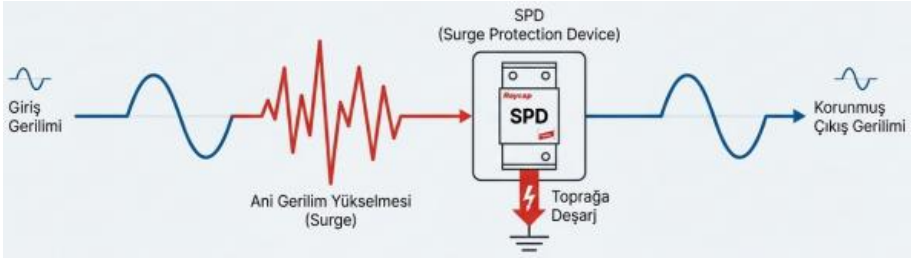
Yıldırım akımlarının neden olduğu potansiyel farklarını azaltmak için tüm izole iletken parçaların birbirine bağlanmasıdır. Doğrudan kuşaklama, kendi başına gerilim taşımayan metal tesisatlar (su, gaz, ısıtma boruları, asansör rayları vb.), kuşaklama iletkenleri kullanılarak doğrudan ana topraklama barasına bağlanır.



Şekil 6 Eşpotansiyel kuşaklama

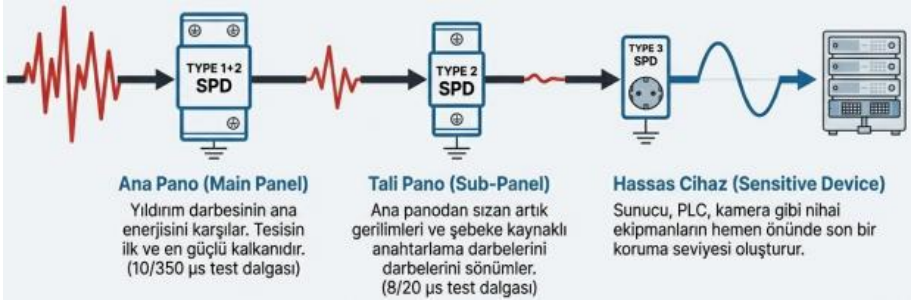
Dolaylı kuşaklamada ise elektrik besleme hatları ve bilgi teknolojisi kabloları gibi gerilim taşıyan sistemler, ana topraklama barasına ancak

uygun aşırı gerilim koruyucu cihazlar (SPD/Parafudr) üzerinden bağlanabilir. Parafudrlar (SPD), elektrik panolarına monte edilen ve nanosaniyeler içinde devreye girerek hatlar üzerindeki ani gerilim yükselmelerini toprağa deşarj eden devre koruma elemanlarıdır (Barwise, 2021).



Şekil 7 Alçak Gerilim Parafudr Sistemleri (SPD)

Koruma seviyesine göre üç tip SPD (Parafudr) kullanılmaktadır. Tip 1, doğrudan yıldırımların etkilerine karşı koruma sağlar (10/350 µs dalga formu). Tip 2, uzak yıldırımlardan indüklenen aşırı gerilimlere karşı koruma sağlar (8/20 µs dalga formu). Tip 3, hassas son cihazları korumak ve anahtarlama gerilimlerini sınırlamak için kullanılır (Han, 2021).



Şekil 8 Koruma seviyesine göre parafudr (SPD) kullanımı

Makismum koruma, farklı özelliklerdeki parafudrların kademeli olarak kullanıldığı bir "koordinasyon" stratejisi ile sağlanır. Her kademe, darbenin enerjisini bir sonrakinin dayanabileceği düzeye indirir (Dehn, 2015; Barwise, 2021).

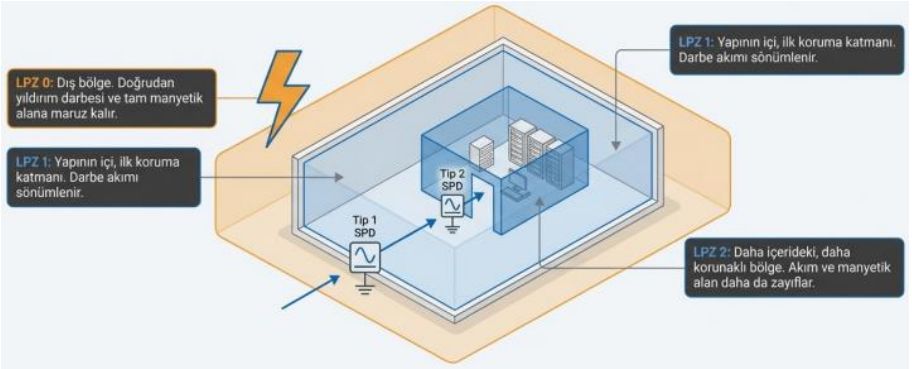
Ayrılma Mesafesi (S)

Dış yıldırımdan korunma sistemi (paratoner, iniş iletkenleri vb.) ile bina içindeki metal ve elektrikli aksamlar arasında kontrolsüz atlamaları (arkları) önlemek için bırakılması gereken güvenli mesafedir. Bu mesafe; yıldırım koruma seviyesine, yalıtım malzemesine (hava, tuğla vb.), akım dağılımına ve iletken uzunluğuna bağlı olarak bilimsel bir formülle hesaplanır. Mesafe

korunamıyorsa, bu aksamların dış yıldırımlık sistemine yıldırım akımı taşıyabilecek iletkenlerle bağlanması zorunludur (Dehn, 2015).

Yıldırımdan Korunma Bölgeleri (LPZ) Kavramı

Hassas elektronik sistemleri Yıldırım Elektromanyetik Darbesinden (LEMP) korumak için yapı, risk seviyelerine göre bölgelere ayrılır. LPZ 0, dış bölge; doğrudan darbe ve tam elektromanyetik alan riskine sahiptir. LPZ 1, yapı içi; darbelerin SPD'ler ve koruma önlemleriyle sınırlandırıldığı, elektromanyetik alanın zayıflatıldığı bölgedir. LPZ 2 ve 3, daha içteki bölgeler; ekranlama ve hassas SPD'lerle (Tip 3) darbe enerjisinin iyice sönümlendiği en güvenli alanlardır (ABB, 2012).



Şekil 9 Binanın koruma bölgelerine ayrılması

SONUÇ

Yıldırım muazzam enerjisine ve yıkıcı potansiyeline rağmen, modern mühendislik yöntemleri ve bilimsel risk yönetimi ile kontrol edilebilir ve yönetilebilir bir risktir. Sadece dış yıldırımdan korunma sistemi, binaları tam olarak korumak için yeterli değildir; yapı içindeki hassas elektronik cihazların ve insanların güvenliği için iç yıldırımdan korunma (Aşırı Gerilim Koruyucular (SPD/Parafudr) ve eşpotansiyel kuşaklama) sistemleriyle entegre bir yaklaşım hayati önem taşımaktadır. IEC 62305, yapıların ve içindeki sistemlerin yıldırımdan korunması için uluslararası düzeyde kabul görmüş, kapsamlı ve mühendislik temelli en temel standarttır. IEC 62305 standardı, yıldırımdan korunma sistemlerinin tasarımı ve kurulumunda bireysel ya da yoruma dayalı kararlar yerine, bilimsel verilere dayalı bir risk analizi yapılmasını zorunlu kılar. Bu analiz, koruma seviyesini (LPL I-IV) belirleyerek hem ekonomik hem de teknik açıdan optimize edilmiş çözümler sunmaktadır. Rüzgar türbinleri, PV güneş santralleri ve petrol tesisleri gibi yüksek riskli veya stratejik yapılar, sadece fiziksel yıkımdan değil, aynı zamanda hizmet kesintisi ve ekonomik kayıplardan (L2 ve L4) korunmak için özel olarak tasarlanmış stratejilere ihtiyaç duymaktadır. Yıldırım yaralanmalarının çoğu doğrudan darbeden değil, adım ve dokunma gerilimleri ile yan atlamalardan kaynaklanır. Bu riskleri azaltmak için

potansiyel kontrol önlemleri uygulanmalı ve halkın güvenli sığınma alanları konusundaki bilinci artırılmalıdır. Yıldırımdan korunma sistemleri ile etkin bir korunma, sadece bir defalık bir kurulum değil; doğru tasarlanmış, kaliteli malzemelerle inşa edilmiş ve düzenli bakımı yapılan entegre bir sistemin sürekli sonucudur. Binaların, yıkıcı bir yıldırım hasarı yaşandıktan sonra reaktif önlemler almasının finansal ve operasyonel maliyeti, başlangıçta doğru ve proaktif bir koruma sistemi kurmanın maliyetinden kıyaslanamayacak kadar yüksektir. Doğru tasarlanmış ve entegre edilmiş bir yıldırımdan korunma sistemi, reaktif bir masraf kalemi değil; operasyonel sürekliliği, can güvenliğini ve itibarı güvence altına alan, geri dönüşü en yüksek ve en kritik proaktif yatırımlardan biridir.

REFERANSLAR

ABB. (2012). IEC BS EN 62305 Protection against lightning. https://library.e.abb.com/public/ee4d371685e544e09e8d9712fbd716c9/IEC%20BS%20EN%2062305%201%20-%204.pdf adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Barwise, A. (2021). Protection of buildings and structures. Editör C. Gomes, Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries (pp. 111-142). Singapore: Springer.

Dehn. (2015). Lightning Protection Guide. https://www.dehn-international.com/sites/default/files/media/files/lpg-2015-e-complete.pdf adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

EMO. Yıldırımdan Korunma Tesisatı Kaynak Dokümanı. https://www.emo.org.tr/ekler/5e31155e821ca20_ek.pdf adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Guha, A., Liu, Y., Williams, E., Schumann, C., ve Hunt, H. (2021). Lightning detection and warning. Editör C. Gomes, Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries (pp. 37-77). Singapore: Springer.

Han, F. (2021). Advances in Lightning Physics and Protection. Singapore: Springer.

International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 62305: Protection against lightning. Geneva: IEC Central Office.

Kalenderli, Ö. (2011). Yıldırımdan Korunma (EMO Yıldırımdan Korunma Seminer Notu). https://www.emo.org.tr/ekler/5a824edf4fcbffe_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=1 adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Kalenderli, Ö. (2011). Yıldırımdan korunmada risk analizi. II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir (s. 184-189) Kongresine Sunulmuş Bildiri.

Rakov, V. A. (2021). Lightning, the science. Editör C. Gomes, Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries (pp. 1-36). Singapore: Springer.

Rousseau, A. (2021). Risk assessment for lightning protection. Editör C. Gomes, Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries (pp. 79-110). Singapore: Springer.

Renda, B. Yıldırımdan korunma yöntemleri. https://docplayer.biz.tr/13526289-Yildirimdan-korunma-yontemleri.html adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Yılkomer. Yıldırımdan Korunma ve Topraklama Çözümleri. https://yilkomer.com/ adresinden 15 Aralık 2025 tarihinde alınmıştır.

Parker Yaklaşımı Tabanlı Parametrik Gravite Ters Çözümünde Ateş Böceği Algoritmasının Uygulanması

Çağlayan BALKAYA[1]

Yunus Levent EKİNCİ[2]

1- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. caglayanbalkaya@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0191-8564

2- Prof. Dr.; Bitlis Eren Üniversitesi Sanat Tarihi Bölümü, Muş Alparslan Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi. ylekinci@yahoo.com ORCID No: 0000-0003-4966-1208

ÖZET

Gravite verilerinin ters çözümü, çözüm uzayında çoklu minimumların bulunması ve problemin doğası gereği kötü koşullu olması nedeniyle güvenilir ve kararlı çözümler elde etmeyi zorlaştırır. Özellikle Fourier tabanlı iteratif yaklaşımlar, gürültüye ve yüksek frekans bileşenlerine duyarlılıkları ile ortalama derinlik ve yoğunluk kontrastı gibi ön varsayımlara hassasiyetleri nedeniyle karmaşık arayüzey geometrilerinin belirlenmesinde sınırlı kalabilir. Bu çalışmada, Parker'ın Fourier tabanlı ileri çözüm yaklaşımını parametrik arayüzey temsili ve küresel arama yeteneği yüksek Ateş Böceği Algoritması (*ABA*) ile bütünleştiren alternatif bir gravite ters çözüm yöntemi sunulmaktadır.

Arayüzey geometrisi, konum (x, y), yayılım (D) ve genlik (A) parametreleriyle tanımlanan üç parametrik bileşenin süperpozisyonu olarak modellenmiştir. Bu sayede tüm $h(x, y)$ yüzeyinin doğrudan çözülmesi yerine daha düşük boyutlu, fiziksel olarak anlamlı ve kontrol edilebilir bir parametre uzayı elde edilmiştir. Bu parametrik temsil, çözüm uzayını daraltarak ters çözümün kararlılığını artırmakta ve *ABA*'nın küresel arama kapasitesinin daha etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Uygulamada, ortalama derinlik bilgisi Parker yaklaşımında sabit bir referans parametre olarak kullanılmış ancak ters çözüm sürecinde optimize edilen bilinmeyenler arasında yer almamıştır. Böylece çözüm, Fourier tabanlı iteratif yaklaşımlarda sıkça karşılaşılan ortalama derinlik ayarlamasına duyarlılığın etkisini azaltmıştır.

Önerilen yöntemin performansı, gürültüsüz ve sıfır ortalamalı ±0.3 mGal standart sapmalı rastgele gürültü içeren kuramsal gravite veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Her iki koşul için on bağımsız *ABA* çalışması gerçekleştirilmiş ve veri–model uyumu RMS hata ölçütüyle değerlendirilmiştir. Ayrıca çekici çözüm sayısı (nB) ve rastgelelik parametresinin azalma katsayısı (δ) gibi temel algoritma parametrelerinin çözüm doğruluğu, yakınsama davranışı ve hesaplama maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sonuçlar, önerilen parametrik *ABA* yaklaşımının gürültüsüz koşullarda arayüzey geometrisini yüksek doğrulukla yeniden üretebildiğini göstermiştir. Gürültü içeren verilerde ise küçük ölçekli sapmalara rağmen genel arayüzey trendi ve yapısal özellikler başarıyla korunmuştur. Çoklu bağımsız çalışmalarda elde edilen çözümlerin tutarlılığı, yöntemin kararlılığını ortaya koymuştur. Ayrıca, elde edilen bulgular, *ABA* tabanlı parametrik yaklaşımın klasik gravite ters çözüm yöntemlerine güçlü ve esnek bir alternatif sunduğunu göstermiştir. Hibrit optimizasyon stratejileriyle geliştirilecek ve gerçek arazi verileri üzerinde uygulanacak çalışmaların, önerilen yöntemin etkin başarısını daha kapsamlı biçimde ortaya koyması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler – Parametrik modelleme, Metasezgisel optimizasyon, Ateşböceği Algoritması, Parker yaklaşımı, Gravite

GİRİŞ

Gravite verilerinin ters çözümü, yeraltı yapılarının belirlenmesinde uzun süredir temel yöntemlerden biri olarak kullanılmaktadır. Ancak, çözüm uzayında çok sayıda yerel minimum bulunması, gözlemlerin sınırlı çözünürlüğü ve model parametreleri arasındaki güçlü bağımlılıklar nedeniyle doğası gereği *kötü koşullu* bir problem niteliği taşır. Yerçekimi alanında ölçülen düşük genlikli varyasyonların, farklı derinlik ve geometri kombinasyonlarıyla benzer şekilde üretilebilmesi hem çözümün tekilliğini zayıflatmakta hem de küçük veri bozulmalarına karşı yüksek duyarlılık oluşturarak matematiksel kararlılığın sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum birçok çalışmada ayrıntılı olarak tartışılmakta, özellikle parametrik kestirim problemlerinde maliyet fonksiyonunun çoklu minimum yapısı ve çözüm kararsızlığı açıkça ortaya konmaktadır (Ekinci vd., 2016; Ekinci vd., 2019). Ayrıca, geniş ölçekli taban topoğrafyası modellemelerinde gözlenen zayıf duyarlılık alanları ve kötü koşullu yapı, küresel ölçekte arama yapabilen optimizasyon algoritmalarının gerekliliğini daha da belirgin hâle getirmektedir (Ekinci vd., 2021a; Ekinci vd., 2023). Dolayısıyla, gravite ters çözümünde güvenilir ve fiziksel olarak anlamlı sonuçlara ulaşmak, hem çözüm uzayının etkin şekilde taranmasına hem de parametrelerin uygun biçimde temsil edildiği modellerin kullanılmasına bağlıdır.

Gravite verilerinin arayüzey topoğrafyası ile ilişkilendirilmesinde kullanılan temel yaklaşımlardan biri, Parker'ın (1973) geliştirdiği Fourier tabanlı seri açılım yöntemidir. Bu formülasyon, yarı sonsuz bir ortamda yoğunluk kontrastına sahip bir arayüzeyin $h(x,y)$ topoğrafyasını gözlenen Bouguer gravite anomalisiyle doğrudan ilişkilendirir ve yerçekimi etkisinin Fourier uzayında hesaplanmasını sağlar. Parker yaklaşımı, arayüzey geometrisinin küçük genlikli kabul edildiği durumlarda yüksek hesaplama verimliliği sunarken karmaşık geometrilerin ileri modellemesinde önemli bir esneklik sağlamaktadır. Oldenburg'un (1974) bu formülasyonu ters çözüm yönünde yeniden düzenlemesiyle geliştirilen iteratif Parker–Oldenburg yöntemi ise arayüzeyin doğrudan $h(x,y)$ yüzeyi olarak hesaplanmasına olanak tanımıştır. Ancak, ortalama derinlik, yoğunluk kontrastı ve yüksek frekans bileşenlerinin filtrelenmesine duyarlı yapısı nedeniyle bazı kısıtlamalar içermektedir. Bu bağlamda, Sarı ve Akyol (2002), yöntemin özellikle $\Delta\rho$ ve z_0 gibi temel parametreler açısından çoğul (*non-unique*) bir çözüm yapısına sahip olduğunu ve yüksek frekans bileşenlerinde kararsızlık eğilimleri gösterdiğini ayrıntılı şekilde ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Pham vd. (2021) iteratif Parker–Oldenburg yönteminin gürültüye karşı duyarlılığını vurgulayarak stabilite sorunlarına dikkat çekmiştir. Bu bulgular, klasik Fourier tabanlı yöntemin hız ve pratiklik avantajlarına karşın, karmaşık jeolojik ortamlarda ve gürültülü veri koşullarında ilave düzenleme, filtreleme ve başlangıç parametrelerine gereksinim duyduğunu göstermektedir.

Bu kısıtları aşmak için son yıllarda parametrik modelleme ile küresel optimizasyon tekniklerinin birlikte kullanıldığı yaklaşımlar potansiyel alan jeofiziğinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Parametrik ters çözüm, arayüzeyi doğrudan çözmek yerine belirli sayıda fiziksel parametreyle temsil ederek çözüm uzayını sıkı biçimde tanımlar ve kötü koşullu yapının etkisini azaltır. Ekinci vd. (2016), diferansiyel evrim (*differential evolution*, *DE*) algoritmasını kullanarak rezidüel gravite anomalilerinden basit geometrili kaynakların parametre kestiriminde parametrik modellerin sağladığı kararlılığı göstermiştir. Ekinci vd. (2019), *DE* ve parçacık sürü optimizasyonu (*particle swarm optimization*, *PSO*) algoritmalarını derin fay kaynaklarının parametrik kestiriminde karşılaştırarak metasezgisel yöntemlerin yüksek doğruluk ve kararlılık sağladığını ortaya koymuştur. Ekinci vd. (2021a), gravite verilerinin küresel optimizasyonunda elde edilen verimli sonuçların ardından parametrik yaklaşımı Batı Anadolu graben sisteminde taban topoğrafyasının belirlenmesine başarıyla uygulamıştır. Ekinci vd. (2021b) ise geri-izleme arama optimizasyon algoritmasının (*backtracking search optimization*, *BSA*) gravite anomalilerinin çözümündeki etkinliğini göstermiştir. Metasezgisel yöntemlerin gelişimine paralel olarak, Ekinci vd. (2023), *DE* algoritmasının başarı geçmişine dayalı parametre güncellemelerini kullanan bir yaklaşımının (*Success-History Based Adaptive Differential Evolution*, *SHADE*) karmaşık kaynak geometrilerinde yüksek performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, açlık oyunları arama algoritması (*hunger game search*, *HGS*) ile gerçekleştirilen çalışmalar (Ai vd., 2024) ve derin öğrenme tabanlı yeni izlenceler (Roy vd., 2025) gravite verisinin yüksek boyutlu ve belirgin biçimde kötü koşullu ters çözüm problemlerinde hem kestirim doğruluğunu hem de kararlılığı artıran güçlü alternatifler sunmaktadır. *HGS* algoritmasının gravite ve manyetik verilerin birlikte değerlendirildiği çoklu veri kümesi içeren ters çözüm uygulamalarında da etkili sonuçlar verdiği Ekinci vd. (2026) tarafından gösterilmiştir.

Bu çalışma, klasik iteratif yöntemlerin belirgin kısıtlarını aşmayı amaçlayan yeni bir ters çözüm yaklaşımı sunmakta ve Parker formülasyonunun ileri çözüm yapısını koruyarak arayüzeyi sınırlı sayıda fiziksel parametreyle temsil eden parametrik bir modelle birleştirmektedir. Arayüzey geometrisi, üç Gauss bileşeninin süperpozisyonu ile ifade edilmektedir. Bu sayede $h(x, y)$ yüzeyinin tamamını çözmek yerine daha sıkı tanımlanmış ve kontrol edilebilir bir parametre uzayı elde edilmektedir. Bu parametrik yapı, küresel ölçekte etkili arama yapabilen Ateş Böceği Algoritmasının (*ABA*) arama performansıyla birleştirildiğinde, çözüm uzayındaki çoklu minimumların etkisi azaltılarak daha kararlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Yang (2008) tarafından önerilen *ABA*'nın çekicilik temelli stokastik hareket mekanizması, gravite gibi kötü koşullu ve geniş çözüm uzayına sahip problemlerde parametre aramasını kolaylaştırmaktadır. Parametrik temsil hem arama verimliliğini hem de kestirim doğruluğunu

artırmaktadır. Bu yönleriyle çalışma, Parker yaklaşımının ileri çözümdeki avantajlarını, parametrik arayüzey temsili ve *ABA* tabanlı küresel optimizasyon çerçevesiyle birleştirerek literatürdeki mevcut gravite ters çözüm stratejilerine alternatif bir yaklaşım sunmaktadır.

METODOLOJİ

Parker Yaklaşımı

Parker (1973) tarafından geliştirilen Fourier tabanlı yaklaşım, gravite anomalilerinin üç boyutlu bir arayüzey topoğrafyası ile ilişkisini seri açılımlar yoluyla ifade eden güçlü bir ileri modelleme yöntemidir. Yarı sonsuz bir ortamda, yoğunluk kontrastına sahip bir arayüzeyin $h(x,y)$ ile tanımlanan topoğrafyası, gözlenen Bouguer gravite anomalisiyle doğrudan ilişkilidir. Arayüzey genliklerinin görece küçük kabul edildiği durumlarda, yerçekimi etkisi Fourier uzayında oldukça verimli şekilde hesaplanabilir. Bu özellik, Parker yaklaşımını karmaşık geometrilerin temsilinde esnek ve yüksek çözünürlüklü uygulamalar için hesaplama açısından son derece elverişli bir araç haline getirmektedir.

Parker formülasyonu, arayüzeye bağlı gravite anomalisi $g(x,y)$'nin Fourier dönüşümünün seri açılım biçiminde ifade edilmesine dayanır. Bu seri açılımın genel formu aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\mathcal{F}[\Delta g(f)] = -2\pi G\rho e^{-|k|z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} \mathcal{F}[h^n(f)], \qquad (1)$$

burada $\Delta g(f)$, yüzeyde veya gözlem düzleminde ölçülen Bouguer gravite anomalisini (mGal), f ise uzaydaki konum vektörünün x–y düzlemine izdüşümünü göstermektedir. Parker'ın notasyonunda $r = (x,y,z)$, $f = (x,y)$ şeklindedir. $\mathcal{F}[\cdot]$ iki boyutlu Fourier dönüşümünü, G ($6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$) evrensel kütle çekim sabitini, ρ tabaka ile üst ortam arasındaki yoğunluk kontrastını (kg/m^3), h^f arayüzeyin topoğrafyasını (derinlik/topoğrafya fonksiyonu), $h^n(f)$ arayüzey topoğrafyasının n-inci kuvvetini (Parker serisinin n-inci terimi), $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ dalga sayısı büyüklüğünü, z_0 gözlem düzleminin arayüzeyin referans düzlemine (örneğin ortalama derinlik) göre yüksekliğini, $e^{-|k|z_0}$ yüksek frekansların bastırılmasında kullanılan derinlik sönümünü ve $n!$ ise Taylor serisi açılımının faktöriyelini tanımlamaktadır. $\frac{|k|^{n-1}}{n!}$ ifadesi, her terimin büyüklüğünün hem $|k|$'ye hem de üst mertebe topoğrafya terimlerine bağlı olduğunu gösterir. Bu seri açılım, arayüzey topoğrafyasının gravite alanına katkısını artan mertebelerde tanımlar. Pratik uygulamalarda genellikle sınırlı sayıda terim kullanılarak yakınsama sağlanır. Terim sayısının seçimi hem arayüzey

genliğinin büyüklüğü hem de yüksek frekans bileşenlerinin davranışı açısından kritik öneme sahiptir.

Parker yaklaşımı esas olarak ileri çözüme yönelik olsa da formülasyonun ters yönde düzenlenmesi, yani $h(x, y)$ topoğrafyasının gravite verisinden iteratif olarak kestirilmesi, Oldenburg (1974) tarafından geliştirilmiş ve potansiyel alan yöntemlerinde yaygın olarak uygulanmıştır. Ancak, seri açılımın yüksek frekans bileşenlerine duyarlılığı özellikle gürültülü verilerde kararlılık sorunlarına yol açmaktadır. Karmaşık veya yüksek genlikli arayüzeylerin modellendiği durumlarda ise yakınsama davranışı dikkatle yönetilmesi gereken bir unsur olmaktadır.

Bu çalışmada, Parker yaklaşımındaki ortalama derinlik parametresi, ileri çözüm aşamasında sabit bir referans düzlemi olarak tanımlanıp kuramsal gravite anomalilerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Ancak, klasik Fourier tabanlı iteratif ters çözüm yaklaşımlarından farklı olarak, ortalama derinlik bilgisi bu çalışmada ters çözümün bir bilinmeyeni olarak ele alınmamış ve optimizasyon sürecine dahil edilmemiştir. Ters çözüm, arayüzey geometrisinin göreli değişimini temsil eden parametrik Gauss bileşenlerinin konum, yayılım ve genlik parametreleri üzerinden yürütülmüştür. Bu yaklaşımla, çözüm önceden tanımlanan ortalama derinlik gibi referans parametrelere doğrudan bağımlı olmak yerine, arayüzeyin göreli geometrik özellikleri tarafından belirlenmekte ve böylece Fourier tabanlı iteratif yöntemlerde sıkça karşılaşılan kararlılık sorunlarının etkisi azaltılmaktadır.

Parker yaklaşımında seri açılımı temelde sonsuz bir toplam olarak tanımlansa da pratikte hesaplama verimliliği ve sayısal kararlılık açısından yalnızca sınırlı sayıda terim kullanılır. Seri açılımındaki her terim, arayüzey topoğrafyasının gravite alanına daha yüksek mertebeden katkılarını temsil eder. n değeri arttıkça terimlerin büyüklüğü hızla azalır ve toplam kısa sürede yakınsar. Parker (1973) tarafından gösterildiği gibi, yakınsama hızını belirleyen temel etken, arayüzey genliğinin (H) gözlem düzlemi yüksekliğine (z_0) oranıdır. Bu oran küçük olduğunda seri çok hızlı yakınsar. Bu nedenle, uygulamada hem sayısal kararlılığı sağlamak hem de gereksiz hesaplamaları önlemek için genellikle ilk birkaç terimin (örneğin 4-6 terim) hesaplanması yeterlidir. Bu çalışmada da Parker yaklaşımı hesaplamalarında 6 terim kullanılarak gravite alanı hesaplanmıştır. Böylece, optimizasyon sürecinin toplam hesaplama yükü azaltılmış ve Parker yaklaşımının doğal yakınsama özelliklerinden yararlanılarak kararlı sonuçlar elde edilmiştir.

Parametrik Arayüzey Modeli

Bu çalışmada arayüzey topoğrafyası, üç Gauss tabanlı bileşenin süperpozisyonu ile temsil edilmektedir. Bu yaklaşım, arayüzeyi $h(x, y)$ fonksiyonunun tamamını çözmek yerine daha sınırlı bir parametre kümesiyle ifade ederek çözüm uzayını daraltır, kötü koşullu yapının etkisini azaltır ve metasezgisel optimizasyonun daha etkin çalışmasını sağlar.

$$h(x,y) = \sum_{i=1}^{m} A_i exp\left[-\left(\frac{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}{D_i^2}\right)\right], \quad (2)$$

burada A_i, i-inci Gauss bileşeninin genlik (derinlik katkısı) parametresi ve x_i, y_i ise bileşenin yatay konum koordinatlarıdır. D_i, x ve y yönlerinde aynı kabul edilen izotropik yayılım (ölçek) parametresini tanımlamaktadır. $h(x,y)$ ise toplam arayüzey topoğrafyasını temsil etmektedir. Böylece optimizasyon, daha sınırlı bir arama uzayında yürütülürken Parker yaklaşımıyla hesaplanan alan çözümünün hızı korunmaktadır.

Gauss bileşenlerinin seçilmesinin temel motivasyonu, bu fonksiyonların matematiksel olarak düzgün ve türevlenebilir olmalarının yanı sıra yer altındaki sınırlı geometrili yapıları başarıyla temsil edebilmeleridir. Ayrıca, Gauss fonksiyonlarının lokalize yapısı, çözümün hem fiziksel hem de hesaplama açısından kararlı olmasını sağlar. Parametrik temsilin bir diğer avantajı ise Parker ileri çözümüne entegre edildiğinde maliyet fonksiyonunun hesaplanmasında önemli bir verimlilik sağlamasıdır. Böylece, *ABA*'nın çoklu aday çözümleri değerlendirdiği süreçte model gravitesinin hızlı biçimde hesaplanması mümkün olmaktadır.

Parametrik arayüzey modellemesi, $h(x,y)$ alanının tüm noktalarda çözülmesini gerektiren klasik yöntemlere kıyasla, ters çözümün boyutunu önemli ölçüde azaltır ve çözüm uzayını fiziksel olarak daha anlamlı sınırlara çeker. Bu yaklaşım, özellikle gravite ters çözümünün kötü koşullu doğası göz önüne alındığında, parametreler arasındaki belirsizliğin kontrol altına alınmasını ve çözümün daha kararlı olmasını sağlar. Gauss tabanlı bileşenlerle temsil edilen arayüzeyde her yapının konum, genlik ve karakteristik genişlik gibi fiziksel parametrelerle tanımlanması, optimizasyon algoritmalarının küresel arama yeteneğini artırır ve maliyet fonksiyonunun çoklu minimum içeren karmaşık yapısının daha etkin taranmasını sağlar. Böylece, çözüm uzayında yerel minimumlara sıkışma olasılığı azalır ve metasezgisel arama süreci daha hızlı yakınsar. Ayrıca, parametrik yapı, geometrinin fiziksel özellikleri üzerinde doğrudan kontrol sağladığından gürültü etkilerinin baskılanmasına katkıda bulunur ve model değerlendirmesinin daha yorumlanabilir bir bağlama taşınmasını sağlar.

Model Parametrizasyonunun Avantajları

Parametrik arayüzey modellemesi, $h(x,y)$, gravite ters çözümünde sıkça karşılaşılan kötü koşulluluk, çoklu minimum yapısı ve gürültüye duyarlılık gibi sorunların azaltılmasına önemli katkı sağlar. Arayüzey topoğrafyasının tüm grid noktalarında doğrudan çözülmesi yerine, sınırlı sayıda fiziksel parametreyle ifade edilmesi çözüm uzayını daha sıkı tanımlar ve ters çözümün kararlılığını artırır. Bu yaklaşımın başlıca avantajları aşağıda özetlenmiştir:

(i) Kötü koşullu yapının hafifletilmesi: Arayüzeyin binlerce grid noktasında çözülmesi yerine, az sayıda parametrik değişkenle modellenmesi

problem boyutunu küçültür ve fonksiyonel bağımlılıkları daha iyi kontrol ederek çözümün kararlılığını artırır. Böylece, gravite verisindeki belirsizliklerin çözüm üzerindeki etkisi daha sınırlı olur.

(ii) Küresel optimizasyona uygunluk: Metasezgisel algoritmalar, yüksek boyutlu ve çoklu minimum içeren problemlerde oldukça etkili olmakla birlikte, arama uzayının gereksiz yere geniş olması performansı düşürebilir. Parametrik temsil, arama uzayını anlamlı fiziksel parametrelerle sınırlandırdığı için *ABA* gibi küresel arama yöntemlerinin daha verimli çalışmasına olanak tanır.

(iii) Hesaplama maliyetinin azalması: Her iterasyonda Parker yaklaşımının uygulanması gerektiğinden, parametre sayısının azaltılması işlem maliyetini önemli ölçüde düşürür. Bu durum, çoklu çalışma gerektiren optimizasyon süreçlerinde özellikle avantaj sağlar.

(iv) Fiziksel yorum kolaylığı: Gauss tabanlı bileşenlerin konum, genlik ve derinlik parametreleri doğrudan fiziksel anlam taşıdığından, elde edilen sonuçlar jeolojik açıdan daha sezgisel ve anlaşılır olur. Bu, iteratif yöntemlerle elde edilen grid tabanlı çözümlere göre önemli bir üstünlük sunar.

Bu avantajlar, parametrik yaklaşımı hem tek başına etkin bir yöntem haline getirir hem de *ABA* ile bütünleştirildiğinde daha kararlı, hesaplama açısından verimli ve fiziksel olarak anlamlı çözümler elde edilmesini sağlar.

Ateş Böceği Algoritması (ABA)

ABA, Yang (2008) tarafından geliştirilen ve doğadaki ateş böceklerinin ışık yayarak birbirlerine yönelme davranışını temel alan sezgisel bir küresel optimizasyon yaklaşımıdır. Algoritma, popülasyondaki bireylerin (ateş böceklerinin) parlaklık düzeylerine bağlı olarak birbirlerine doğru hareket etmesine dayanır. Her ateş böceğinin parlaklığı, optimizasyon problemindeki amaç fonksiyonunun değeriyle ilişkilidir. Bu nedenle, amaç fonksiyonu daha düşük olan bireyler diğerlerini kendilerine çeker.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2}, \tag{3}$$

burada β_0 başlangıç çekim katsayısı, γ ortamın ışık soğurma katsayısı ve r iki ateş böceği arasındaki Öklid uzaklığıdır. Ateş böceklerinin birbirine yönelme hareketi temel olarak aşağıdaki güncelleme bağıntısıyla ifade edilir:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}\left(x_j^t - x_i^t\right) + \alpha\varepsilon_i, \tag{4}$$

burada x_i, i-inci ateş böceğinin konumu (parametre vektörü), x_j ise i'den daha parlak olan j-inci ateş böceğinin konumudur. α rastgelelik (keşif) parametresi, ε_i [-1,1] aralığında rastgelelik sağlayan sayı vektörü ve t ise iterasyon indeksidir. Bu yapı, keşif (*exploration*) ve sömürü (*exploitation*) mekanizmalarını dengeli bir şekilde birleştirerek algoritmanın hem geniş bir

çözüm uzayını taramasını hem de iyi çözümlerin yakınında hassas arama yapmasını sağlar.

Bu çalışmada α parametresi, *ABA*'da keşif düzeyini kontrol eden rastgelelik parametresi olarak ele alınmış ve iterasyonlar boyunca azalan bir yapı ile kullanılmıştır. Rastgelelik parametresinin iterasyona bağlı olarak azaltılması, algoritmanın başlangıç aşamalarında çözüm uzayını daha geniş ölçekte taramasına, ilerleyen iterasyonlarda ise daha parlak çözümlerin yakınında hassas bir arama yapmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda α, literatürde yaygın olarak önerilen bir azalma katsayısı yardımıyla güncellenmiştir. Ayrıca, farklı azalma oranlarının çözüm doğruluğu, yakınsama davranışı ve hesaplama maliyeti üzerindeki etkileri bu çalışmada karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

$$\alpha^{(t)} = \alpha_0 \delta^t, \tag{5}$$

burada α_0 başlangıç rastgelelik katsayısını, δ $(0 < \delta < 1)$ ise rastgelelik parametresinin iterasyonlarla birlikte azalmasını kontrol eden azalma katsayısını ifade etmektedir (Yang ve He, 2013). Bu tanımlama, algoritmanın erken iterasyonlarda çözüm uzayını daha geniş ölçekte taramasına, ilerleyen iterasyonlarda ise daha parlak çözümlerin yakınında daha hassas bir arama yapmasına olanak sağlamaktadır. *ABA*'nın deterministik, doğrusal veya türev tabanlı bir yönteme bağlı olmaması, onu türevin hesaplanamadığı, gürültülü, çok modlu veya yüksek boyutlu ters çözüm problemleri için uygun ve esnek bir optimizasyon aracı yapar.

Gravite ters çözümünde, maliyet fonksiyonunun çoklu minimuma sahip olması, klasik yöntemlerin başlangıç noktalarına duyarlı olması ve çözüm yüzeyinin yüksek derecede düzensiz bir yapı sergilemesi nedeniyle, *ABA* çözüm uzayını küresel ölçekte tarayabilme yeteneğiyle önemli bir avantaj sunar. Bu çalışmada algoritma, her ateş böceğinin bir parametre vektörüyle (üç Gauss bileşeninin toplam 12 parametresi) temsil edildiği bir yapı içinde uygulanmaktadır. Maliyet fonksiyonu olarak gözlenen gravite ile Parker yaklaşımıyla hesaplanan gravite modeli arasındaki RMS hata ($RMSE$) kullanılmaktadır.

Maliyet Fonksiyonu ve Optimizasyon Stratejisi

Parametrik arayüzey modelinin optimizasyonundaki temel amaç, ileri çözümden elde edilen kuramsal gravite anomalisi ile gözlenen gravite verisi arasındaki farkı en aza indirmektir. Bu çalışmada kullanılan maliyet fonksiyonu, model tahmini ile gözlenen veri arasındaki uyumsuzluğu niceliksel olarak ölçen *RMSE* ölçütüne dayanmaktadır. *RMSE*, gözlenen veri kümesi g_{obs} ile Parker yaklaşımıyla hesaplanan model gravitesi $g_{mod}(\theta)$ arasındaki fark üzerinden izleyen şekilde hesaplanır.

$$RMSE(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[g_{obs}(x_i, yi) - g_{mod}(x_i, y_i)|\theta]^2}, \quad (6)$$

burada N, veri noktası sayısını; g_{obs}, gözlenen veya kuramsal gravite verisini; g_{mod}, parametrik modelden Parker yaklaşımıyla hesaplanan gravite anomalisini; θ ise üç Gauss bileşenini temsil eden ve her bir yapı için x_0, y_0, D, A parametrelerinden oluşan 12 boyutlu parametre vektörünü ifade eder. (x_i, y_i) ise veri noktalarının konumlarını belirtir. Bu fonksiyon, parametre uzayında tekil bir minimum garanti etmez, çoklu minimum içerir ve kötü koşullu bir yüzey tanımlar. Bu nedenle optimum çözümün bulunmasında küresel arama yeteneği yüksek olan *ABA* gibi bir optimizasyon yaklaşımı gereklidir.

Optimizasyon stratejisi, her iterasyonda tüm popülasyonun değerlendirilmesi, bireylerin parlaklıklarına göre birbirlerine yaklaşmaları ve yeni konumların Parker yaklaşımıyla yeniden test edilmesi adımlarına dayanır. Optimizasyon, belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşılana veya çözümde ek bir iyileşme gözlenmeyene kadar sürdürülür. Bu strateji, parametrik modelin temsil ettiği arayüzey topoğrafyasının hem gürültüsüz hem de gürültülü veri koşullarında yüksek doğrulukla yeniden üretilmesini sağlar.

ABA UYGULAMA BULGULARI

Bu bölümde, Parker yaklaşımına dayalı parametrik gravite ters çözümünde *ABA*'nın performansı, gürültüsüz ve gürültülü kuramsal veri kümeleriyle ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Amaç, sınırlı sayıda parametreyle tanımlanan arayüzey geometrisinin farklı optimizasyon koşullarında ne kadar doğru ve kararlı şekilde yeniden üretilebildiğini göstermektir. Bu kapsamda, üç Gauss bileşeninden oluşan parametrik bir arayüzey modeli tanımlanmıştır. Bu modelden elde edilen gravite anomalileri üzerinde *ABA* ile yapılan çoklu bağımsız ters çözüm çalışmalarıyla yöntem, doğruluk ve yakınsama davranışı açısından incelenmiştir.

Kuramsal veri üretiminde kullanılan gerçek arayüzey parametreleri ile *ABA* tabanlı ters çözümde tanımlanan parametre arama uzayları Tablo 1'de verilmiştir. Arayüzey, her biri genlik (A), plan düzlemindeki konum koordinatları (x_0 ve y_0) ile yayılım (D) parametreleriyle tanımlanan üç anomali bileşeninin süperpozisyonu olarak modellenmiştir. Tablo 1'de verilen arama uzayı sınırları, gerçek parametreleri kapsayacak ancak çözüm uzayını gereksiz yere genişletmeyecek şekilde belirlenmiştir. Kuramsal anomalilere ait arama uzaylarının tanımlanmasında, ters çözüm sürecinin kullanıcıya bağlı öznel tercihlerden bağımsız yürütülmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, gravite anomali haritaları üzerinde gerçekleştirilen otomatik yapı sayısı belirleme adımıyla anomali alanını baskın şekilde temsil eden temel yapıların sayısı

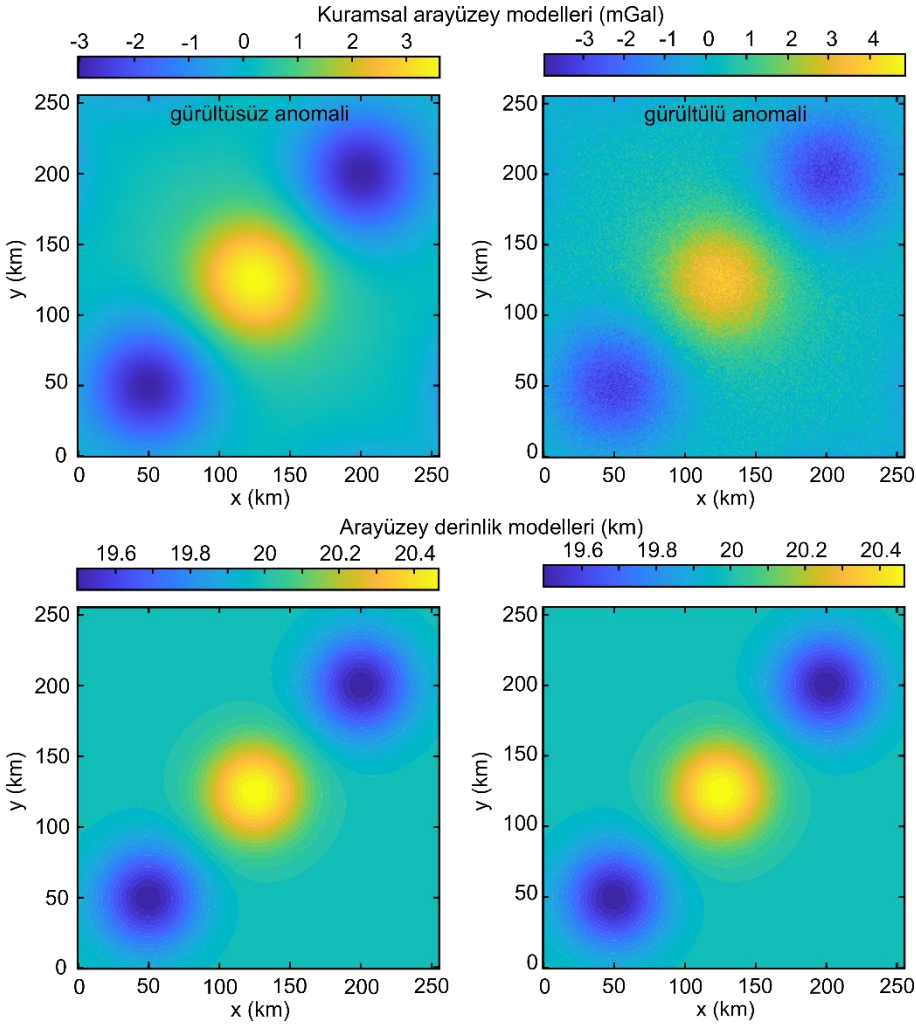
kestirilmiş ve parametrik arayüzey modeli bu yapı sayısına göre tanımlanmıştır.

Tablo 1: Parametrik arayüzey modeline ait sentetik gerçek parametreler ve *ABA* optimizasyonunda kullanılan arama uzayları

Parametreler		Gerçek değerler	Arama Uzayı	
			Min	Maks
Anomali I	$x_{0,1}$	50	24.5	64.5
	$y_{0,1}$	50	24.5	64.5
	D_1	100	20	150
	A_1	-0.5	-5	5
Anomali II	$x_{0,2}$	125	104.5	144.5
	$y_{0,2}$	125	104.5	144.5
	D_2	100	20	150
	A_2	0.5	-5	5
Anomali III	$x_{0,3}$	200	184.5	224.5
	$y_{0,3}$	200	184.5	224.5
	D_3	100	20	150
	A_3	-0.5	-5	5

Analiz sonucunda üç baskın yapının varlığı belirlenmiş ve her bir yapı için ayrı parametre kümeleri oluşturulmuştur. Genlik parametresi (A) için yalnızca anomalinin pozitif veya negatif karakteri belirlenerek işaret bilgisi tanımlanmış, genlik büyüklüğüne ilişkin arama uzayı ise gerçek değeri kapsayacak şekilde yeterince geniş tutulmuştur. Buna karşılık, her bir yapının x–y düzlemindeki konum koordinatları ve yayılım parametrelerine ait aralıklar, anomalinin yatay konumu ve mekânsal dağılımı dikkate alınarak otomatik olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımla, arama uzayı fiziksel olarak anlamlı sınırlar içinde tutulurken, *ABA*'nın çözüm uzayını küresel ölçekte etkin şekilde taramasına olanak tanıyan esnek bir yapı elde edilmiştir.

Tablo 1'de tanımlanan parametrik model kullanılarak hesaplanan gürültüsüz ve sıfır ortalamalı, ±0.3 mGal standart sapmaya sahip rastgele gürültü içeren kuramsal gravite anomalileri ile bu anomalilere karşılık gelen gerçek arayüzey derinlik modelleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekil 1'de sunulan gürültüsüz anomali haritası, parametrik arayüzey geometrisinin gravite alanına etkisini açıkça ortaya koyarken, gürültü eklendiğinde yüksek frekanslı bileşenlerin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Ancak her iki durumda da arayüzeyin genel geometrik trendi korunmakta ve bu durum parametrik modellemenin ve Parker yaklaşımının sentetik veri üretimindeki tutarlılığını göstermektedir. Şekil 1'de verilen bu modeller, izleyen ters çözüm uygulamalarında elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için referans niteliğindedir.



Şekil 1: Gürültüsüz ve gürültülü sentetik gravite anomalileri ile karşılık gelen arayüzey derinlik modelleri

ABA uygulamalarında kullanılan algoritma parametreleri, arama sürecinde keşif ve sömürü dengesi gözetilerek belirlenmiştir. Bu çalışmada nB parametresi, her ateş böceğinin hareketinde dikkate alınan çekici çözüm (*attractor*) sayısını temsil etmekte olup, çözüm uzayındaki baskın bireylerin etkisini sınırlı fakat yönlendirici şekilde modele dâhil etmeyi amaçlamaktadır. nB değerinin küçük seçilmesi, algoritmanın yerel minimumlara erken sıkışma riskini artırırken, aşırı büyük değerler yakınsama hızını düşürüp hesaplama maliyetini artırabilir. Bu kapsamda nB = 3, 6 ve 10 değerleri için karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiş ve bu parametrenin çözüm kararlılığı ile hesaplama verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Rastgelelik parametresi α ve buna bağlı azalma katsayısı δ, algoritmanın iterasyonlar boyunca keşiften sömürüye kademeli geçişini kontrol eder. δ azalma katsayısının yüksek seçilmesi, erken iterasyonlarda çözüm uzayının daha geniş taranmasını sağlarken, düşük değerlere yaklaşıldığında iyi çözümler çevresinde daha hassas arama yapılmasına olanak tanır. Bu bağlamda, çalışmada δ azalma katsayısı için 0.99 ve 0.98 değerleri ayrı ayrı test edilerek, yakınsama davranışı, çözüm tutarlılığı ve hesaplama maliyeti üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Gürültüsüz Kuramsal Veri Bulguları

Gürültüsüz veri kümesinde ABA'nın etkinliği ve hesaplama verimliliği, çekici çözüm sayısı (nB) ve rastgelelik parametresinin azalma katsayısı (δ) farklı kombinasyonlarda test edilerek değerlendirilmiştir. Tablo 2, her senaryo için 10 bağımsız çalışmadan elde edilen $RMSE$ istatistiklerini (min–maks–ortalama–SS) ve hesaplama süresi ölçütlerini (min–maks–ortalama ve toplam) birlikte sunarak, doğruluk–maliyet dengesini doğrudan karşılaştırma olanağı sağlamaktadır.

Tablo 2: Gürültüsüz koşulda ABA ayarlarının yakınsama kalitesi ($RMSE$) ve hesaplama maliyetine etkisi

nB	δ	$RMSE$ (mGal)				Zaman (s)			
		Min	Maks	Ort	SS	Min	Maks	Ort	Toplam
3	0.99	0.175	0.447	0.285	0.071	24.82	83.74	55.83	558.29
	0.98	0.103	0.444	0.278	0.096	23.10	139.31	60.05	600.49
6	0.99	0.190	0.329	0.252	0.040	42.12	236.11	113.49	1134.89
	0.98	0.093	0.276	0.194	0.060	81.53	320.52	153.69	1536.94
10	0.99	0.193	0.345	0.262	0.050	85.23	317.31	138.85	1388.48
	0.98	0.064	0.254	0.141	0.064	113.85	516.92	317.13	3171.30

Tablo 2'ye göre, nB'nin artırılması genel olarak çözüm kalitesini iyileştirme eğilimindedir. Ancak, bu iyileşme hesaplama maliyetinde belirgin bir artışla birlikte gerçekleşmektedir. Özellikle δ = 0.98 için ortalama $RMSE$, nB = 3'te 0.278 mGal iken nB = 6'da 0.194 mGal'a ve nB = 10'da 0.141 mGal'a düşmektedir. Bu, görece daha agresif azalma oranının gürültüsüz koşulda daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, aynı parametre setinde ortalama süre nB arttıkça hızla yükselmektedir. Bu nedenle, nB = 10 ve δ = 0.98 kombinasyonu yüksek doğruluk üretse de toplam süre açısından en maliyetli senaryoyu oluşturmaktadır.

δ = 0.99 için ise ortalama $RMSE$ değerleri nB = 6'da daha düşük ve daha kararlı bir davranış sergilemekte (ortalama $RMSE$ 0.252 mGal, SS 0.040) ve bu yönüyle nB = 3'e göre çözüm tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gürültüsüz koşulda nB = 6 değeri doğruluk–maliyet dengesi açısından uygun bir ara çözüm sunmaktadır. δ azalma katsayısı ise 0.99 ve 0.98 arasında çözüm kalitesi ve hesaplama süresi bakımından farklı bir denge noktası oluşturmaktadır.

Hesaplama maliyetindeki bu artışın bir diğer nedeni, *ABA*'da kullanılan durdurma ölçütleriyle ilgilidir. Bu çalışmada algoritma için üç farklı durdurma koşulu:

(i) maksimum yineleme sayısının 100 ile sınırlandırılması,

(ii) ardışık 10 yineleme boyunca $RMSE$ değerinde anlamlı bir iyileşme gözlenmemesi durumunda erken durdurma uygulanması ve

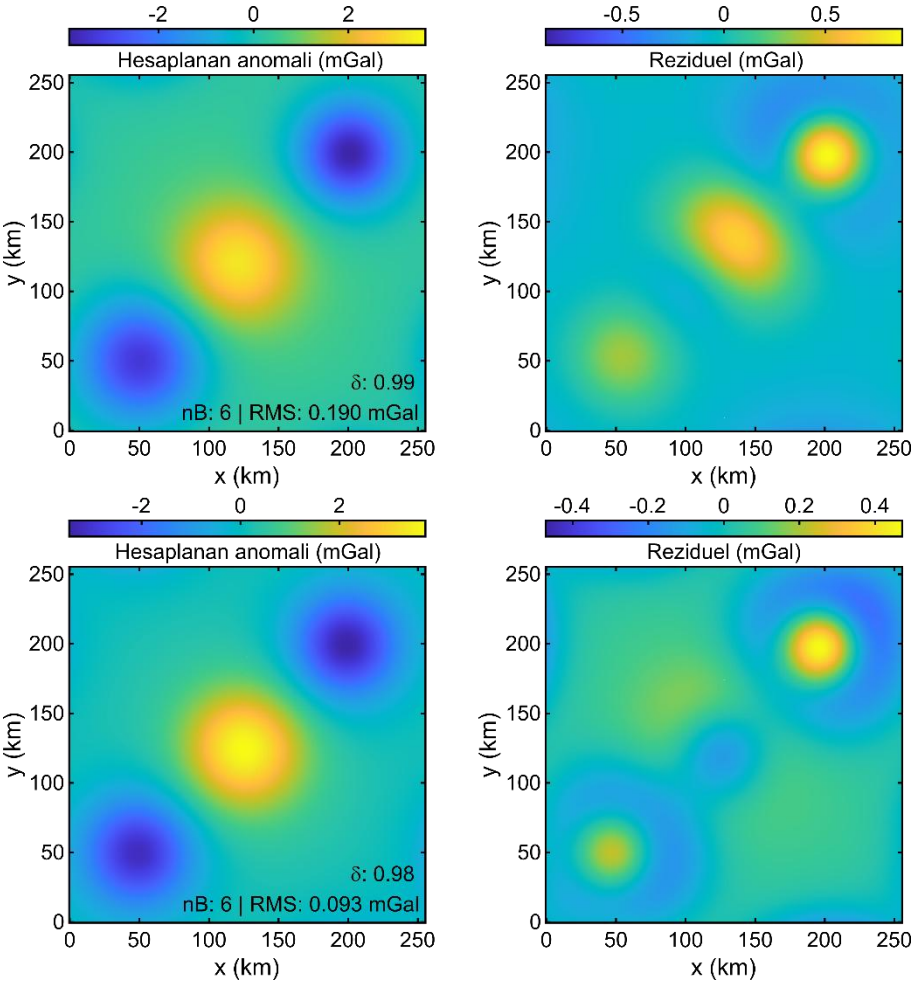
(iii) önceden tanımlanan bir hata eşiğine (*threshold*) ulaşılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Uygulamalar sırasında, *ABA*'nın yüksek doğruluk üretmesine rağmen üçüncü ölçütle tanımlanan eşik değere pratikte ulaşamadığı, bu nedenle algoritmanın çoğunlukla ilk iki durdurma koşuluna bağlı olarak sonlandığı gözlenmiştir. nB değerinin artmasıyla, çözüm uzayındaki çekici birey sayısının artması algoritmanın daha uzun süre keşif aşamasında kalmasına neden olmaktadır. Bu durum ardışık 10 yineleme boyunca iyileşme olmaması koşulunun daha geç iterasyonlarda devreye girmesiyle sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla, nB arttıkça gözlenen hesaplama maliyeti artışı, yalnızca popülasyon içi etkileşimlerin sayısının artmasından değil, aynı zamanda erken durdurma mekanizmasının gecikmesinden de kaynaklanmaktadır.

Seçilen nB = 6 durumunda, δ azalma katsayısı 0.99 ve 0.98 olarak alındığında elde edilen en iyi çözümlerin anomali ve rezidüel haritaları Şekil 2'de sunulmuştur. Her iki senaryoda da modelden hesaplanan anomali haritalarının kuramsal veriyi yüksek ölçüde temsil ettiği, rezidüellerin ise genellikle düşük genlikli ve sınırlı alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, *ABA*'nın gürültüsüz koşulda Parker tabanlı yaklaşımı etkin biçimde kullanarak veri uyumunu artırabildiğini ve çözümlerin yalnızca $RMSE$ düzeyinde değil, harita düzeyinde de tutarlı bir temsil sağladığını göstermektedir.

Şekil 2'deki rezidüel haritalar incelendiğinde, δ azalma katsayısı 0.98 olduğunda rezidüellerin mekânsal olarak daha homojen dağıldığı ve genlik farklarının daha dar bir aralıkta toplandığı, buna karşılık azalma katsayısı 0.99 olduğunda rezidüel saçılımının görece arttığı görülmektedir.

ABA'nın gürültüsüz veri kümesi üzerindeki uygulamasından elde edilen en iyi ve ortalama çözümlerin parametre düzeyindeki sonuçları Tablo 3'te sunulmaktadır. Tablo 3'te, her bir nB ve δ parametre kombinasyonu için gerçekleştirilen 10 bağımsız çalışmadan elde edilen en iyi çözüm ile bu çalışmalara ait ortalama değerler (*italik gösterim*) birlikte verilmekte, böylece yöntemin hem en iyi performansı hem de çalıştırmalar arası kararlılığı eşzamanlı olarak değerlendirilebilmektedir.



Şekil 2: Gürültüsüz veride *ABA* ile elde edilen en iyi çözümlerin gravite anomali ve rezidüel dağılımları

Sonuçlar genel olarak, üç anomalinin x–y düzlemindeki konum parametrelerinin doğru değerlere yakın şekilde belirlenebildiğini ve genlik parametresinde ise işaretin (pozitif/negatif karakterin) korunduğunu göstermektedir. Ancak, özellikle bazı senaryolarda yayılım parametreleri ve genlik büyüklüklerinde daha belirgin sapmaların ortaya çıkması, farklı parametre kombinasyonlarının çözümün kararlılığı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, Tablo 2'deki $RMSE$–zaman istatistikleri ile Tablo 3'teki parametre kestirim eğilimleri birlikte değerlendirildiğinde, nB'nin artırılmasının çözüm uzayındaki yönlendiriciliği güçlendirerek doğruluğu artırdığı, ancak hesaplama maliyeti açısından belirgin bir bedel oluşturduğu görülmektedir.

Tablo 3: Gürültüsüz veri kümesinde 10 bağımsız *ABA* çalışmasından elde edilen parametre kestirimleri: en iyi çözümler ve çalışma ortalamaları (*italik gösterim*)

nB	Parametreler		δ azalma katsayısı			
			0.99		0.98	
			En iyi	Ort.	En iyi	Ort.
3	Anomali I	$x_{0,1}$	48.76	*49.20*	46.27	*47.11*
		$y_{0,1}$	44.85	*48.71*	51.35	*50.14*
		D_1	101.65	*78.26*	87.53	*82.45*
		A_1	-0.51	*-0.72*	-0.57	*-0.75*
	Anomali II	$x_{0,2}$	124.59	*126.70*	125.69	*124.01*
		$y_{0,2}$	123.44	*124.98*	124.16	*122.34*
		D_2	72.62	*79.59*	86.28	*73.20*
		A_2	0.74	*0.75*	0.60	*0.79*
	Anomali III	$x_{0,3}$	202.92	*204.75*	201.21	*204.42*
		$y_{0,3}$	200.11	*201.06*	201.10	*201.92*
		D_3	79.70	*75.40*	87.13	*74.35*
		A_3	-0.78	*-0.90*	-0.57	*-0.76*
6	Anomali I	$x_{0,1}$	50.82	*48.96*	49.26	*48.63*
		$y_{0,1}$	50.54	*49.49*	49.96	*49.52*
		D_1	97.46	*69.72*	85.6	*86.84*
		A_1	-0.58	*-0.89*	-0.58	*-0.59*
	Anomali II	$x_{0,2}$	120.02	*123.47*	125.28	*123.9*
		$y_{0,2}$	119.69	*124.66*	124.16	*124.76*
		D_2	95.68	*85.85*	93.81	*83.86*
		A_2	0.44	*0.68*	0.55	*0.71*
	Anomali III	$x_{0,3}$	201.12	*203.62*	198.61	*200.31*
		$y_{0,3}$	199	*203.74*	19.97	*200.59*
		D_3	76.42	*75.81*	79.5	*71.54*
		A_3	-0.79	*-0.67*	-0.66	*-0.81*
10	Anomali I	$x_{0,1}$	49.72	47.61	51.35	49.38
		$y_{0,1}$	46.75	45.28	48.7	48.48
		D_1	78.03	74.84	101.56	85.69
		A_1	-0.7	-0.75	-0.51	-0.6
	Anomali II	$x_{0,2}$	128.23	126.14	124.31	123.94
		$y_{0,2}$	125.89	125.45	125.49	125.36
		D_2	65.55	74.54	101.71	89.32
		A_2	0.88	0.1	0.47	0.59
	Anomali III	$x_{0,3}$	204.04	201.73	198.87	200.61
		$y_{0,3}$	198.62	201.23	198.69	201.2
		D_3	85.96	80.61	91.47	85.63
		A_3	-0.55	-0.67	-0.56	-0.62

Gürültü Eklenmiş Kuramsal Veri Bulguları

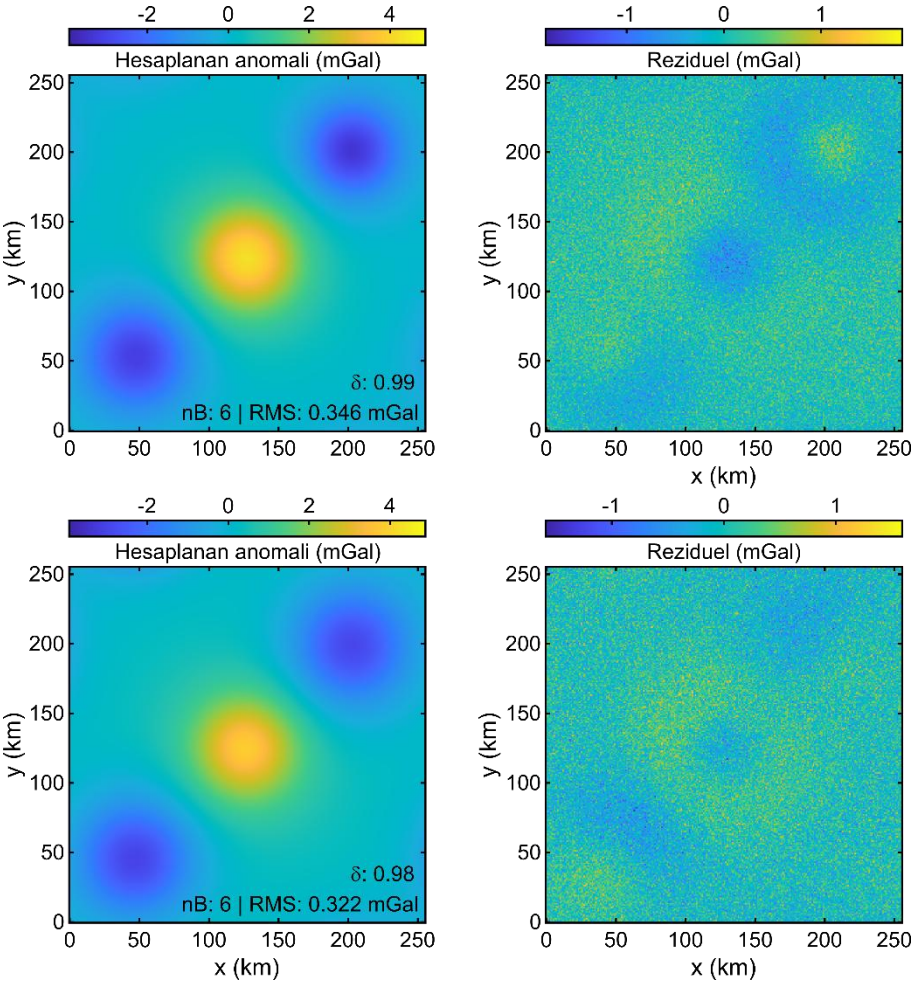
Gürültülü veri kümesinde *ABA*'nın performansı, ±0.3 mGal genliğinde rastgele gürültü içeren gravite anomalileriyle değerlendirilmiştir. Tablo 4, farklı nB ve δ azalma katsayısı kombinasyonları için 10 bağımsız çalışmadan elde edilen $RMSE$ istatistikleri ve hesaplama sürelerini sunarak gürültü varlığında algoritmanın doğruluk-maliyet dengesini göstermektedir. Gürültüsüz duruma kıyasla tüm kombinasyonlarda $RMSE$ değerlerinin doğal olarak arttığı görülmekte ve bu durum gürültünün ters çözüm üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Tablo 4: Gürültülü koşulda *ABA* ayarlarının yakınsama kalitesi ($RMSE$) ve hesaplama maliyetine etkisi

nB	δ	$RMSE$ (mGal)				Zaman (s)			
		Min	Maks	Ort	SS	Min	Maks	Ort	Toplam
3	0.99	0.362	0.469	0.422	0.032	34.78	85.30	57.03	570.35
	0.98	0.327	0.466	0.384	0.046	37.15	162.73	84.98	849.83
6	0.99	0.346	0.451	0.395	0.035	39.19	282.24	114.31	1143.10
	0.98	0.322	0.437	0.375	0.038	58.36	333.80	130.77	1307.71
10	0.99	0.354	0.404	0.383	0.017	77.80	255.74	160.18	1601.78
	0.98	0.332	0.459	0.376	0.040	60.83	348.45	181.78	1817.83

Tablo 4 incelendiğinde, nB değerinin artırılmasının gürültülü koşulda da ortalama $RMSE$ değerlerini düşürme eğiliminde olduğu görülmektedir. Özellikle δ = 0.98 için nB = 6 ve nB = 10 durumlarında, nB = 3'e kıyasla daha düşük $RMSE$ değerleri elde edilmiştir. Ancak bu iyileşme, hesaplama süresinde belirgin bir artışla birlikte gerçekleşmektedir. Gürültülü koşulda, çözüm uzayının daha düzensiz bir yapıya sahip olması nedeniyle *ABA*'nın erken durdurma ölçütlerinin daha geç devreye girdiği ve bunun özellikle yüksek nB değerlerinde toplam hesaplama maliyetinin artışına neden olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda, gürültüsüz durumda olduğu gibi nB = 6, çözüm kalitesi ile hesaplama maliyeti arasında dengeli bir ara seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Seçilen nB = 6 değeri için, δ azalma katsayılarının 0.99 ve 0.98 olarak alınmasıyla elde edilen en iyi çözümlere ait model anomali ve rezidüel haritaları Şekil 3'te sunulmuştur. Gürültünün etkisiyle rezidüel genliklerinin gürültüsüz duruma kıyasla arttığı ve bazı bölgelerde mekânsal yoğunlaşmaların oluştuğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, her iki δ değeri için de model anomalilerinin gözlenen verinin genel karakterini başarılı biçimde temsil ettiği söylenebilir. Rezidüel haritaları karşılaştırıldığında, δ = 0.99 ve δ = 0.98 durumlarında rezidüel genliklerinin benzer ve yakın aralıklarda dağıldığı dikkat çekmektedir. Bu gözlem, gürültü varlığında her iki rastgelelik parametresi seçiminin de çözüm kararlılığı açısından benzer bir performans sergilediğini ve *ABA*'nın rezidüel düzeyinde tutarlı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 3: Gürültülü veride *ABA* ile elde edilen en iyi çözümlerin gravite anomali ve rezidüel dağılımları

ABA'nın gürültü eklenmiş veri kümesi üzerindeki uygulamasından elde edilen en iyi ve ortalama çözümlerin parametre düzeyindeki sonuçları Tablo 5'te sunulmaktadır. Tablo 5'te, her bir nB ve δ parametre çifti için gerçekleştirilen 10 bağımsız çalışmadan elde edilen en iyi ve ortalama çözümler (*italik gösterim*) birlikte verilerek, gürültünün parametre kestirimi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Sonuçlar, özellikle x–y düzlemindeki konum parametrelerinin gürültüye rağmen genel olarak doğru değerlere yakın biçimde kestirilebildiğini göstermektedir. Buna karşılık, genlik ve yayılım parametrelerinde gürültüsüz duruma kıyasla daha belirgin sapmalar ve çalıştırmalar arası saçılım gözlenmektedir. Bu durum, gürültünün öncelikle parametre büyüklükleri üzerinde etkili olduğunu, konumsal bilgilerin ise *ABA* tarafından daha kararlı biçimde elde edilebildiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5: Gürültülü veri kümesinde 10 bağımsız *ABA* çalışmasından elde edilen parametre kestirimleri: en iyi çözümler ve çalışma ortalamaları (*italik gösterim*)

nB	Parametreler		δ azalma katsayısı			
			0.99		0.98	
			En iyi	Ort.	En iyi	Ort.
3	Anomali I	$x_{0,1}$	48.85	*49.04*	51.44	*47.36*
		$y_{0,1}$	52.91	*46.02*	49.31	*48.01*
		D_1	87.93	*75.62*	80.06	*83.72*
		A_1	-0.61	*-0.871*	-0.62	*-0.70*
	Anomali II	$x_{0,2}$	124.49	*124.52*	126.23	*125.56*
		$y_{0,2}$	124.52	*127.24*	126.16	*124.64*
		D_2	93.68	*68.75*	102.32	*73.19*
		A_2	0.59	*0.89*	0.45	*1.00*
	Anomali III	$x_{0,3}$	198.43	*201.67*	203.26	*202.03*
		$y_{0,3}$	201.68	*203.24*	200.63	*200.91*
		D_3	61.00	*73.31*	78.67	*82.08*
		A_3	-1.09	*-0.73*	-0.67	*-0.7*
6	Anomali I	$x_{0,1}$	48.07	*48.02*	47.1	*47.48*
		$y_{0,1}$	53.42	*46.75*	45.53	*48.3*
		D_1	86.3	*83.1*	93.95	*71.49*
		A_1	-0.56	*-0.68*	-0.52	*-0.78*
	Anomali II	$x_{0,2}$	127.03	*126.55*	126.31	*125.95*
		$y_{0,2}$	123.54	*125.04*	124.79	*125.07*
		D_2	82.59	*74.19*	81.16	*81.69*
		A_2	0.71	*0.81*	0.62	*0.67*
	Anomali III	$x_{0,3}$	202.7	*202.09*	202.59	*202.21*
		$y_{0,3}$	201.23	*201.08*	198.06	*200.54*
		D_3	70.84	*76.65*	95.72	*83.8*
		A_3	-0.71	*-0.73*	-0.5	*-0.65*
10	Anomali I	$x_{0,1}$	47.74	*48.95*	50.56	*48.46*
		$y_{0,1}$	48.81	*47.5*	50.15	*46.62*
		D_1	77.51	*70.18*	95.28	*78.12*
		A_1	-0.69	*-0.77*	-0.53	*0.74*
	Anomali II	$x_{0,2}$	119.02	*123.12*	122.5	*123.97*
		$y_{0,2}$	125.86	*125.94*	122.8	*123.52*
		D_2	72.65	*81.5*	96.28	*78.18*
		A_2	0.79	*0.69*	0.51	*0.77*
	Anomali III	$x_{0,3}$	201.56	*201.55*	208.98	*203.45*
		$y_{0,3}$	202.07	*201.82*	200.99	*201.67*
		D_3	74.56	*70.49*	100.47	*83.77*
		A_3	-0.7	*-0.77*	-0.44	*-0.64*

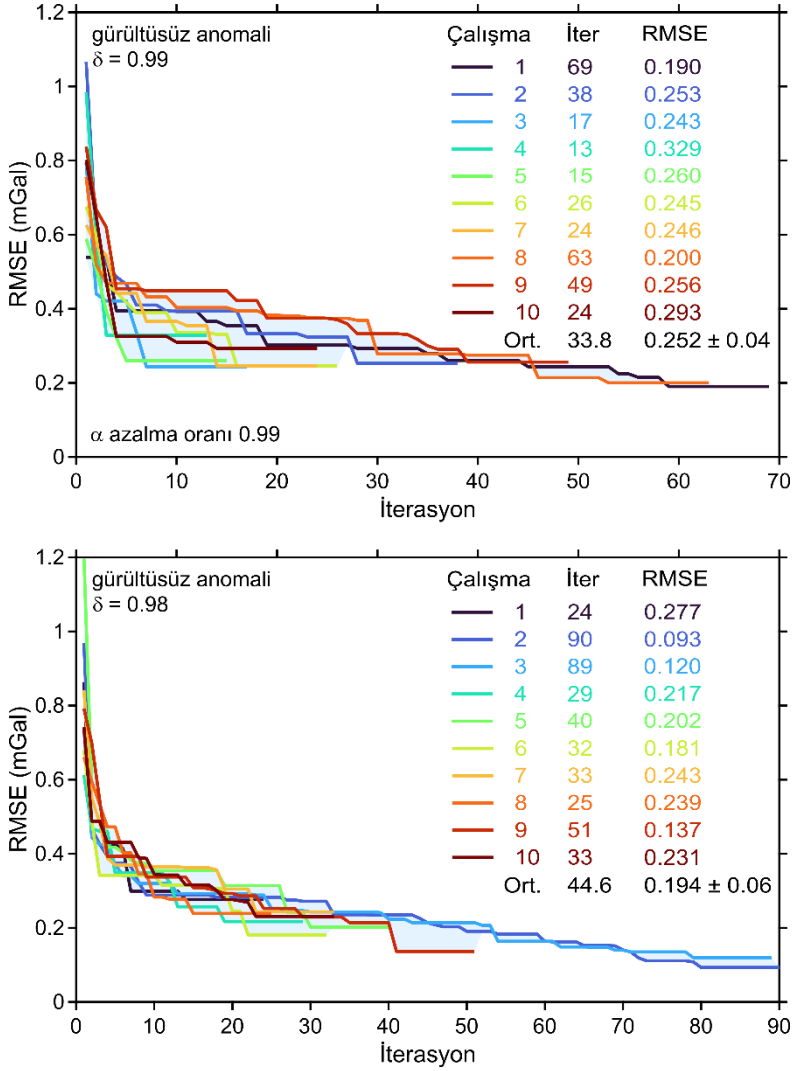
Genel olarak, Tablo 4 ve Tablo 5 birlikte değerlendirildiğinde, ABA'nın gürültülü koşullarda bile arayüzey geometrisinin temel özelliklerini başarıyla yeniden üretebildiği görülmüştür. Ancak, çözüm doğruluğu ile hesaplama maliyeti arasındaki dengenin kullanılan parametre kombinasyonlarına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Özellikle nB'nin artırılması hem gürültüsüz hem de gürültülü veri kümelerinde çözüm kalitesini iyileştirmiştir. Ancak, bu kazanım her iki durumda da daha yüksek hesaplama maliyetiyle gerçekleşmektedir.

ABA Yakınsama Karakteri

ABA'nın çözüme yakınsama davranışı ve çalıştırmalar arası kararlılığı, gürültüsüz ve gürültülü veri kümeleri için 10 bağımsız çalıştırmadan elde edilen *RMSE*–iterasyon eğrileriyle incelenmiştir. Gürültüsüz veri kümesine ait sonuçlar Şekil 4'te, gürültülü veri kümesine ait sonuçlar ise Şekil 5'te sunulmuştur. Her iki şekilde de seçilen nB = 6 değeri için δ azalma katsayılarının 0.99 (üst paneller) ve 0.98 (alt paneller) olması durumunda elde edilen tüm çalıştırmalara ait $RMSE$ değişimleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4 ve 5'te, her bir bağımsız çalıştırmanın iterasyon–$RMSE$ ilişkisi ayrı ayrı gösterilmiş, tüm çalıştırmalara ait ortalama iterasyon sayısı ve ortalama $RMSE$ değerleri ise genel yakınsama davranışını temsil edecek şekilde ayrıca verilmiştir.

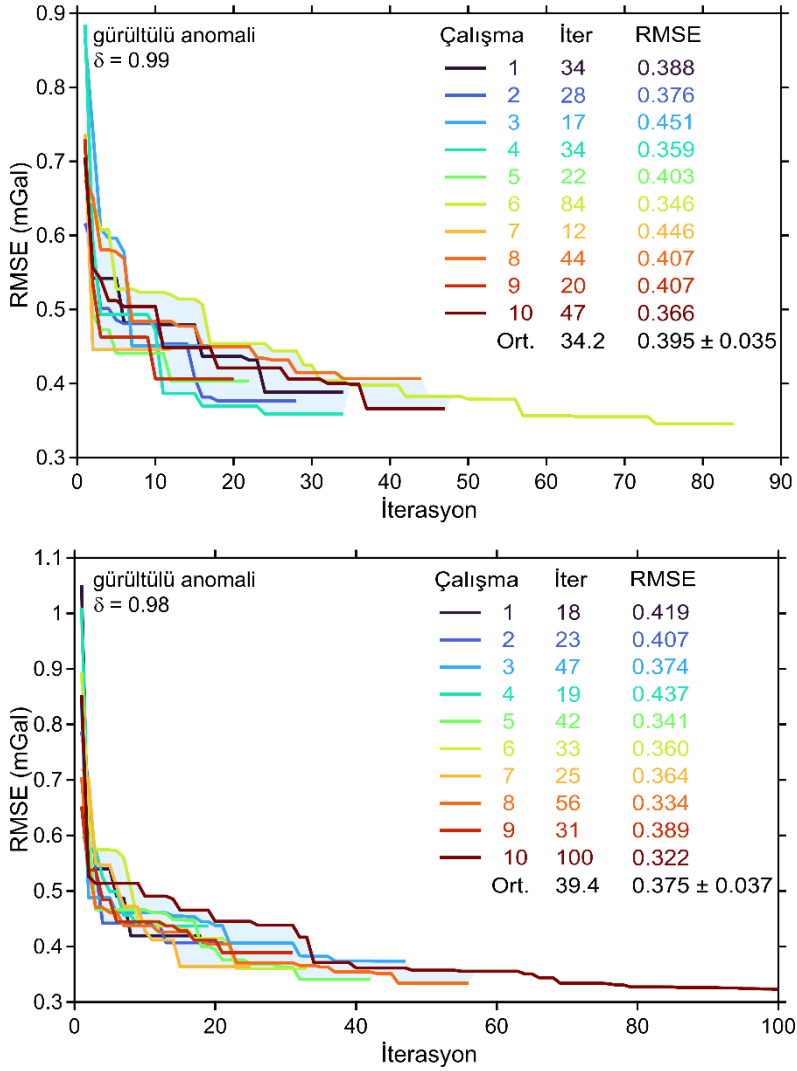
Şekil 4 incelendiğinde, gürültüsüz koşulda *ABA*'nın tüm bağımsız çalışmalarda hızlı ve kararlı bir yakınsama gösterdiği görülmektedir. $RMSE$ değerleri erken iterasyonlarda belirgin şekilde azalmakta ve çoğu çalıştırmada yakınsama, maksimum yineleme sayısına ulaşılmadan gerçekleşmektedir. Özellikle δ = 0.98 durumunda, $RMSE$ eğrilerinin daha dar bir bantta toplandığı ve ortalama yakınsama davranışının daha düzgün olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, rastgelelik parametresinin daha hızlı azalmasının gürültüsüz koşulda çözüm uzayında etkin bir sömürü aşamasına geçişi kolaylaştırdığını göstermektedir.

Gürültülü veri kümesine ait $RMSE$ yakınsama eğrileri (Şekil 5) ise, gürültüsüz duruma kıyasla daha yüksek nihai $RMSE$ seviyeleri ve çalıştırmalar arasında daha belirgin saçılım göstermektedir. Bununla birlikte, tüm çalışmalarda $RMSE$ değerlerinin iterasyon ilerledikçe düzenli şekilde azaldığı ve *ABA*'nın gürültü varlığında da kararlı bir yakınsama sergilediği görülmektedir. δ = 0.99 ve δ = 0.98 durumları karşılaştırıldığında, her iki seçimin de benzer yakınsama seviyelerine ulaştığı fakat δ = 0.98 için bazı çalıştırmalarda daha erken yakınsama eğilimi gösterdiği gözlenmektedir. Bu sonuç, gürültü içeren koşullarda dahi rastgelelik parametresinin uygun seçiminin yakınsama hızını etkileyebileceğini göstermektedir.



Şekil 4: Gürültüsüz veri kümesi için 10 bağımsız *ABA* çalışmasından elde edilen RMSE yakınsama eğrileri: $nB = 6$ için δ azalma katsayısı 0.99 (üst panel) ve 0.98 (alt panel). Her bir çalışmaya ait $RMSE$–iterasyon değişimleri ve bunların ortalama değerleri gösterilmektedir.

Şekil 4 ve 5 birlikte değerlendirildiğinde, *ABA*'nın hem gürültüsüz hem de gürültülü veri koşullarında çoklu bağımsız çalışmalarda tutarlı yakınsama sergilediği ve yerel minimumlara sıkışma eğilimi göstermediği anlaşılmaktadır. Çalıştırmalar arası $RMSE$ dağılımlarının sınırlı aralıklar içinde kalması, algoritmanın parametrik arayüzey modellemesiyle kararlı bir ters çözüm çerçevesi sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5: Gürültülü veri kümesi için 10 bağımsız *ABA* çalışmasından elde edilen $RMSE$ yakınsama eğrileri: $nB = 6$ için δ azalma katsayısı 0.99 (üst panel) ve 0.98 (alt panel). Her bir çalışmaya ait $RMSE$–iterasyon değişimleri ve bunların ortalama değerleri gösterilmektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Parker yaklaşımına dayalı parametrik gravite ters çözümünde *ABA*'nın etkinliği, gürültüsüz ve gürültülü kuramsal veri kümeleri üzerinde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Arayüzeyin sınırlı sayıda fiziksel parametreyle temsil edilmesi, çözüm uzayının daha sıkı tanımlanmasını sağlamıştır. Böylece, gravite ters çözümünün doğasında bulunan kötü koşulluluk ve çoklu minimum problemlerinin etkisi belirgin şekilde azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar, parametrik yaklaşım ile küresel arama yeteneği yüksek bir metasezgisel algoritmanın birlikte kullanılmasının hem çözüm kararlılığı hem de hesaplama verimliliği açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Gürültüsüz koşullarda elde edilen sonuçlar, *ABA*'nın arayüzey geometrisinin temel özelliklerini yüksek doğrulukla yeniden üretebildiğini göstermiştir. Özellikle x–y düzlemindeki konum parametrelerinin, farklı parametre kombinasyonlarında dahi doğru değerlere yakın şekilde kestirilebildiği fakat genlik ve yayılım parametrelerinde, algoritma ayarlarına bağlı olarak daha belirgin sapmaların ortaya çıkabildiği gözlenmiştir. Bu durum, konumsal bilgilerin gravite alanı üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olduğunu, buna karşın parametre büyüklüklerinin çözüm uzayındaki belirsizliklerden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Gürültülü veri kümesinde ise rezidüel genlikler artsa da *ABA*'nın genel arayüzey trendini ve yapısal özelliklerini koruduğu, çözümlerin bağımsız çalıştırmalar arasındaki tutarlılığının ise büyük ölçüde devam ettiği görülmüştür.

Algoritma parametrelerinin etkisi incelendiğinde, çekici çözüm sayısının (nB) artırılmasının çözüm kalitesini iyileştirme potansiyeli sunduğu, ancak bu iyileşmenin hesaplama maliyetinde belirgin bir artışa yol açtığı görülmektedir. Rastgelelik parametresinin azalma katsayısı δ için 0.99 ve 0.98 değerleri karşılaştırıldığında, her iki seçimin de benzer nihai çözüm kalitesine ulaştığı gözlenmiştir. Ancak, δ = 0.98 durumunda hem rezidüel haritalar hem de yakınsama eğrileri açısından daha tutarlı bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, *ABA*'nın performansının yalnızca küresel arama yeteneğine değil, aynı zamanda rastgelelik–sömürü dengesinin uygun şekilde ayarlanmasına da duyarlı olduğunu göstermektedir.

Yakınsama analizleri, *ABA*'nın hem gürültüsüz hem de gürültülü koşullarda çoklu bağımsız çalışmalarda kararlı bir yakınsama sergilediğini ve yerel minimumlara sıkışma eğilimi göstermediğini ortaya koymaktadır. Ancak, özellikle gürültülü veri koşullarında çözüm uzayının daha karmaşık hale gelmesi, algoritmanın yakınsama süresini uzatmakta ve erken durdurma ölçütlerinin daha geç devreye girmesine neden olmaktadır. Bu durum, hesaplama maliyeti ile çözüm doğruluğu arasındaki dengenin kullanılan algoritma parametreleri ve durdurma stratejileriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, *ABA*'nın parametrik gravite ters çözümünde güçlü bir küresel arama aracı olduğunu ortaya koymakla birlikte, yöntemin performansının daha da artırılabilmesi için farklı stratejilerin araştırılması gerektiğini düşündürmektedir. Özellikle, *ABA*'nın küresel arama yeteneğinin yerel arama yöntemleriyle birleştirildiği hibrit global–lokal optimizasyon yaklaşımlarının test edilmesi, çözümün hassasiyetini ve yakınsama hızını artırabilecek potansiyel bir yol olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, türev tabanlı yerel iyileştirme yöntemleri veya basit sezgisel lokal arama teknikleri ile *ABA*'nın birlikte kullanılması, gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, Parker yaklaşımına dayalı parametrik arayüzey temsilinin *ABA* ile entegrasyonunun kullanılmasının gravite ters çözümü için özgün, etkili ve esnek bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Ancak, elde edilen olumlu sonuçlar yalnızca kuramsal veri kümeleriyle sınırlandırılmıştır. Parametrik *ABA* yaklaşımının gerçek arazi verileri üzerinde uygulanması, yöntemin gürültü, veri eksikliği ve karmaşık jeolojik koşullar altındaki performansının daha gerçekçi şekilde değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür uygulamalar, önerilen yaklaşımın pratik jeofizik problemlerdeki uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini ortaya koyacak, ayrıca Parker yaklaşımına dayalı parametrik ters çözüm çerçevesinin gerçek saha koşullarındaki potansiyelini daha açık gösterecektir.

REFERANSLAR

Ai, H., Essa, K. S., Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., and Géraud, Y. (2024). Hunger Games Search optimization for the inversion of gravity anomalies of active mud diapir from SW Taiwan using inclined anticlinal source approximation. Journal of Applied Geophysics, 227, 105443.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., and Turan, S. (2016). Model parameter estimations from residual gravity anomalies due to simple-shaped sources using Differential Evolution Algorithm. Journal of Applied Geophysics, 129, 133-147.

Ekinci, Y. L, Balkaya, Ç, and Göktürkler, G. (2019). Parameter estimations from gravity and magnetic anomalies due to deep-seated faults:differential evolution versus particle swarm optimization. Turkish Journal of Earth Sciences 28(6): 860-881.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., and Özyalın, Ş. (2021a). Gravity data inversion for the basement relief delineation through global optimization: a case study from the Aegean Graben System, western Anatolia, Turkey. Geophysical Journal International, 224(2), 923-944.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., and Göktürkler, G. (2021b). Backtracking search optimization: A novel global optimization algorithm for the inversion of gravity anomalies. Pure and Applied Geophysics, 178(11), 4507-4527.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., and Ai, H. (2023). 3-D gravity inversion for the basement relief reconstruction through modified success-history-based

adaptive differential evolution. Geophysical Journal International, 235(1), 377-400.
Oldenburg, D. W. (1974). The inversion and interpretation of gravity anomalies. Geophysics, 39(4), 526-536.
Parker, R. L. (1973). The rapid calculation of potential anomalies. Geophysical Journal International, 31(4), 447-455.
Pham, L. T., Oksum, E., and Dolmaz, M. N. (2021). GRV_D_inv: A graphical user interface for 3D forward and inverse modeling of gravity data. Geofizicheskiy Zhurnal, 43(1), 181-193.
Roy, A., Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., and Ai, H. (2024). Deep learning-based inversion with discrete cosine transform discretization for two-dimensional basement relief imaging of sedimentary basins from observed gravity anomalies. Geophysical Prospecting, 73(1), 113-129.
Sarı, C., ve Akyol, A. L. (2002). Parker-Oldenburg yöntemi ile gravite verilerinin düz ve ters modellemesi (yoğunluk arayüzeyinin saptanması). DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(1), 37-51.
Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Bristol, Luniver Press.
Yang, X. S and He, X. (2013). Firefly algorithm: Recent advances and applications. International Journal of Swarm Intelligence, 1(1), 36-50.

Taşkın Erken Uyarı Sistemleri: Modelleme Yaklaşımları ve Uygulamaları

Fatma DEMİR[1]

Osman SÖNMEZ[2]

1- Dr.; Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. ftm.sagin@gmail.com ORCID No: 0000-0001-8295-1958

2- Doç. Dr.; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. osonmez@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5642-6391

ÖZET

Taşkınlar, can ve mal kaybına yol açan en yaygın doğal afet türlerinden biri olup, özellikle iklim değişkenliği, hızlı kentleşme ve arazi kullanımındaki dönüşümler nedeniyle etkilerini giderek artırmaktadır. Bu bağlamda, taşkın erken uyarı sistemleri, risk azaltma stratejilerinin temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmakta; karar vericilere, acil durum yöneticilerine ve topluma zamanında ve güvenilir bilgi sunmayı amaçlamaktadır. Son yıllarda taşkın erken uyarı sistemlerinin yapısı ve işleyişinde belirgin değişimler gözlenmiş; geleneksel hidrolojik ve hidrolik modelleme yaklaşımlarına ek olarak, çoklu veri kaynaklarını kullanan ve belirsizliği dikkate alan yöntemlerin daha yaygın biçimde kullanılmaya başlandığı görülmüştür.

Bu kitap bölümü, taşkın erken uyarı sistemlerinin modelleme yaklaşımlarını ve uygulama alanlarını, literatürde yaygın olarak başvurulan çalışmalar temelinde kapsamlı bir biçimde ele almaktadır. Bölümde, farklı modelleme yaklaşımları ve bunların birlikte kullanıldığı bütünleşik stratejiler sistematik olarak incelenmekte; farklı taşkın türleri ve mekansal ölçekler için geliştirilen uygulamalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, meteorolojik tahminlerin entegrasyonu, uzaktan algılama verilerinin kullanımı, gerçek zamanlı güncelleme yaklaşımları ve karar destek süreçleri gibi teknik bileşenlerin taşkın erken uyarı sistemlerindeki yeri tartışılmaktadır.

Bölümün temel amacı, taşkın erken uyarı sistemlerinin kavramsal ve yöntemsel gelişimini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymak, farklı modelleme yaklaşımlarının güçlü ve sınırlı yönlerini açıklamak ve uygulamaya dönük çıkarımlar sunmaktır. Bu kapsamda, literatürde öne çıkan eğilimler, mevcut sorun alanları ve gelecekteki araştırma yönleri değerlendirilerek, taşkın risk yönetimi alanında çalışan araştırmacılar ve uygulayıcılar için sistematik bir başvuru kaynağı oluşturulması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler – Taşkın erken uyarı sistemleri, taşkın modellemesi, hidrolojik ve hidrolik modeller, risk yönetimi

GİRİŞ

Taşkınlar, dünya genelinde en sık karşılaşılan ve etkileri giderek artan doğal afetler arasında yer almakta; özellikle can kaybı, ekonomik zararlar ve altyapı hasarı açısından ciddi sonuçlar doğurmaktadır. İklim sistemindeki değişimler, aşırı yağışların sıklık ve şiddetindeki artış, hızlı kentleşme ve doğal drenaj sistemlerinin bozulması, taşkın riskini hem mekansal hem de zamansal olarak genişletmektedir (Rabuffetti ve ark., 2005; Perera ve ark., 2020; Fernández-Nóvoa ve ark., 2024). Bu gelişmeler, taşkınlara müdahalede yalnızca yapısal önlemlere dayalı yaklaşımların yetersiz kaldığını ve erken uyarıya dayalı risk azaltma stratejilerinin kritik önem taşıdığını giderek daha görünür hale getirmektedir.

Taşkın erken uyarı sistemleri, yaklaşan taşkın olaylarının önceden tahmin edilmesi, olası etkilerinin değerlendirilmesi ve ilgili paydaşlara zamanında bilgi aktarılması amacıyla geliştirilen bütünleşik sistemlerdir. Bu sistemler; meteorolojik gözlemler ve tahminler, hidrolojik ve hidrolik modelleme araçları, gerçek zamanlı veri toplama altyapıları ve karar destek mekanizmalarından oluşan çok bileşenli bir yapıya sahiptir (Abebe ve ark., 2005; Roy ve ark., 2017; Antwi-Agyakwa ve ark., 2023). Erken uyarı sistemlerinin etkinliği, yalnızca tahmin doğruluğuna değil; aynı zamanda uyarıların anlaşılabilirliği, zamanlaması ve karar alma süreçleriyle bütünleşmesine de bağlıdır (Brown ve ark., 2016; Quigley ve ark., 2019).

Son yirmi yıl içerisinde taşkın erken uyarı sistemlerinin modelleme altyapısında belirgin bir dönüşüm yaşanmıştır. İlk dönem çalışmalarda yağış–akış ilişkisini ve akımın nehir sistemlerindeki davranışını süreç temelli biçimde temsil eden hidrolojik ve hidrolik modeller yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar özellikle veri altyapısının güçlü olduğu büyük havzalarda uygulanmıştır (Lu ve ark., 2008; Casagrande ve ark., 2017). Ancak bu yaklaşımlar, hesaplama maliyetleri, belirsizliklerin yeterince temsil edilememesi ve ani taşkınlar gibi hızlı gelişen olaylara sınırlı yanıt verebilmesi nedeniyle zamanla eleştirilmiştir (Rodríguez-Rincón ve ark., 2015; Lamichhane ve ark., 2018). Bu sınırlılıklar, farklı modelleme yaklaşımlarının araştırılmasını ve mevcut yöntemlerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir.

Bu çerçevede, veri temelli yöntemler ve istatistiksel öğrenme yaklaşımları taşkın tahmin çalışmalarında giderek daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Özellikle kısa vadeli tahminlerde ve ölçüm istasyonlarının sınırlı olduğu havzalarda, bu yöntemlerin hesaplama hızı ve uyarlanabilirliği önemli avantajlar sunmaktadır (Hussain ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2022; Nearing ve ark., 2023). Bununla birlikte, literatürde tek bir yaklaşımın tüm

taşkın türleri ve mekansal ölçekler için yeterli olmadığı; bu nedenle farklı yöntemlerin birlikte ele alındığı bütüncül modelleme stratejilerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Xu ve ark., 2024; Qian ve ark., 2019; Hauswirth ve ark., 2023).

Taşkın erken uyarı sistemlerinin gelişiminde bir diğer önemli boyut, meteorolojik tahminlerin, uzaktan algılama verilerinin ve gerçek zamanlı gözlemlerin modelleme süreçlerine entegre edilmesidir. Uydu tabanlı yağış ve su seviyesi verileri, özellikle veri kısıtlı bölgelerde erken uyarı sistemlerinin kurulmasına olanak sağlamış; bu sayede küresel ölçekte uygulanabilir sistemlerin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir (Koriche ve ark., 2016; Zelentsov ve ark., 2019; Byaruhanga ve ark., 2024). Aynı zamanda, bu verilerin model çıktılarıyla birlikte değerlendirilmesi, tahmin belirsizliklerinin daha açık biçimde ortaya konmasına katkı sağlamıştır (Dietrich ve ark., 2009).

Bu kitap bölümü, taşkın erken uyarı sistemlerini modelleme yaklaşımları ve uygulama alanları çerçevesinde ele alarak, literatürdeki yöntemsel çeşitliliği ve tarihsel gelişimi bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bölüm kapsamında, farklı taşkın türleri ve ölçekler için kullanılan modelleme stratejileri, uygulama örnekleri üzerinden tartışılmakta; güçlü yönler, sınırlılıklar ve geleceğe yönelik eğilimler ortaya konulmaktadır. Böylece, taşkın erken uyarı sistemlerine ilişkin modelleme yaklaşımları ve uygulama örnekleri, literatür temelli bir çerçevede değerlendirilerek taşkın risk yönetimi alanına yönelik bütüncül bir bakış açısı sunulmaktadır.

TAŞKIN ERKEN UYARI SİSTEMLERİNİN YAPISI VE İŞLEYİŞİ

Taşkın erken uyarı sistemleri, tek bir model ya da yazılımdan ziyade, farklı mühendislik bileşenlerinin birlikte çalıştığı bütünleşik yapılar olarak ele alınmaktadır. Bu sistemlerin başarısı, yalnızca kullanılan modelleme yaklaşımına değil, veri toplama altyapısından karar destek mekanizmalarına kadar uzanan tüm bileşenlerin uyumlu biçimde çalışmasına bağlıdır. Literatürde taşkın erken uyarı sistemleri çoğunlukla gözlem, tahmin, değerlendirme ve uyarı aşamalarından oluşan bir yapı içinde ele alınmaktadır (Abebe ve ark., 2005; Perera ve ark., 2020).

Gözlem ve Veri Toplama

Erken uyarı sistemlerinin işleyişinde, sahadan elde edilen hidrometeorolojik verilerin sürekliliği ve güvenilirliği literatürde sistem performansını doğrudan etkileyen unsurlar arasında gösterilmektedir. Yağış, akım ve su seviyesi gibi temel değişkenlerdeki belirsizlikler, özellikle küçük ve hızlı tepki veren havzalarda tahmin sonuçlarını belirgin biçimde

etkileyebilmektedir (Rabuffetti ve ark., 2005). Bu nedenle erken uyarı sistemlerinin ilk ve en kritik bileşeni, uygun konumlandırılmış ölçüm istasyonları ve güvenilir veri iletim altyapısıdır. Gerçek zamanlı su seviyesi ve debi izleme altyapılarının erken uyarı sistemlerindeki önemi, Türkiye'de Sakarya Nehri üzerinde kurulan ve operasyonel olarak test edilen izleme istasyonu örneğinde de ortaya konulmuştur (Demir ve Sönmez, 2025).

Yer tabanlı gözlem ağları, uzun yıllar boyunca taşkın tahmin çalışmalarının ana veri kaynağını oluşturmuştur. Ancak özellikle dağlık, kırsal veya erişimi zor bölgelerde ölçüm istasyonu sayısının yetersiz olması, erken uyarı sistemlerinin mekansal kapsamını sınırlamıştır. Bu eksiklik, uydu tabanlı gözlem sistemlerinin taşkın erken uyarı uygulamalarında daha yaygın kullanılmasına zemin hazırlamıştır (Koriche ve ark., 2016; Zelentsov ve ark., 2019). Uydu kaynaklı yağış ve yüzey suyu verileri, geniş alanlar için sürekli gözlem olanağı sağlarken, yerel ölçekte doğruluk ve çözünürlük açısından halen dikkatli değerlendirilmesi gereken sınırlılıklar içermektedir (Byaruhanga ve ark., 2024). Uzaktan algılama tabanlı izleme yaklaşımlarının erken uyarı sistemlerindeki rolü, yalnızca hidrolojik değişkenlerle sınırlı olmayıp, farklı afet türleri için geliştirilen DInSAR ve MT-DInSAR tabanlı izleme ve erken uyarı uygulamaları aracılığıyla da ortaya konulmaktadır (Sefercik ve ark., 2025).

Meteorolojik Tahminler

Meteorolojik tahminler, taşkın erken uyarı sistemlerinde tahmin süresini belirleyen temel girdiler arasında yer almaktadır. Özellikle yoğun yağışların taşkın oluşumundaki belirleyici rolü dikkate alındığında, yağış tahminlerinin doğruluğu sistem performansı açısından kritik önem taşımaktadır (Schellekens ve ark., 2011). Büyük havzalarda birkaç günlük tahmin süreleri kabul edilebilir sonuçlar üretirken, ani taşkınlara duyarlı küçük havzalarda saatlik tahmin hataları dahi ciddi sapmalara yol açabilmektedir (Casagrande ve ark., 2017).

Meteorolojik tahminlerin hidrolojik modellere doğrudan aktarılması, tahmin süresini uzatmakla birlikte, belirsizliklerin de sisteme taşınmasına neden olmaktadır. Bu durum, taşkın erken uyarı sistemlerinde meteorolojik verilerin uygun ön işlemlerden geçirilmesini ve hidrometeorolojik uyumun dikkatle ele alınmasını gerekli kılmaktadır (Dietrich ve ark., 2009; Rodríguez-Rincón ve ark., 2015). Bu bağlamda, meteorolojik bileşen yalnızca bir girdi olarak değil, sistemin belirsizlik yapısını şekillendiren temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Hidrolojik ve Hidrolik Modelleme

Hidrolojik ve hidrolik modeller, taşkın erken uyarı sistemlerinin hesaplama temelini oluşturmaktadır. Hidrolojik modeller, yağış-akış ilişkisini temsil ederek nehir veya drenaj sistemi çıkışındaki akımları tahmin ederken; hidrolik modeller bu akımların nehir yatakları ve taşkın

alanlarındaki yayılımını tanımlamaktadır (Lu ve ark., 2008; Lamichhane ve ark., 2018).

Büyük havzalar için geliştirilen erken uyarı sistemlerinde hidrolojik modeller yaygın olarak kullanılmakta ve yeterli kalibrasyon verisi bulunan alanlarda tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir (Casagrande ve ark., 2017). Buna karşılık, kentsel alanlar ve ani taşkınlara duyarlı havzalarda, bu modellerin hesaplama maliyetleri ve zaman kısıtları önemli bir sınırlayıcı unsur haline gelmektedir (Hussain ve ark., 2021). Bu durum, taşkın erken uyarı sistemlerinde modelleme yaklaşımının havza özelliklerine ve uyarı süresine bağlı olarak seçilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Gerçek Zamanlı Güncelleme

Modern taşkın erken uyarı sistemlerinde, model çıktılarının sahadan gelen gözlemlerle sürekli olarak karşılaştırılması ve gerektiğinde güncellenmesi temel bir yaklaşımdır. Gerçek zamanlı veri akışı, model tahminlerinin dinamik olarak iyileştirilmesine olanak tanımakta ve özellikle tahmin süresi uzadıkça artan belirsizliklerin kontrol altına alınmasına katkı sağlamaktadır (Annis ve ark., 2018; Xu ve ark., 2022).

Bu tür güncelleme mekanizmaları, erken uyarı sistemlerinin yalnızca tahmin üretmesini değil, aynı zamanda değişen koşullara uyum sağlayabilmesini mümkün kılmaktadır. Literatürde, gerçek zamanlı değerlendirme süreçlerinin özellikle baraj işletmesi, kentsel drenaj yönetimi ve ani taşkın uyarıları gibi uygulamalarda sistem performansını belirgin biçimde artırdığı bildirilmektedir (Shibuo ve ark., 2016).

Uyarı ve Karar Destek Mekanizmaları

Taşkın erken uyarı sistemlerinin teknik olarak doğru sonuçlar üretmesi, tek başına etkili bir risk azaltma için yeterli değildir. Üretilen bilginin, karar vericiler ve uygulayıcılar tarafından anlaşılabilir ve zamanında kullanılabilir olması gerekmektedir. Bu nedenle erken uyarı sistemleri, yalnızca tahmin üreten mühendislik araçları değil, aynı zamanda karar destek sistemleri olarak değerlendirilmelidir (Brown ve ark., 2016).
Literatürde, taşkın uyarılarının yalnızca su seviyesi veya debi eşiklerine dayalı olarak değil, olası etkilerle ilişkilendirilerek sunulmasının uyarıların etkinliğini artırdığı vurgulanmaktadır (Apel ve ark., 2022; Mattos ve ark., 2022). Bu yaklaşım, mühendislik modellemelerinin sonuçlarının uygulamaya aktarılmasında önemli bir ara yüz oluşturmaktadır.

TAŞKIN ERKEN UYARI SİSTEMLERİNDE MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Taşkın erken uyarı sistemlerinde modelleme, tek bir yöntem ya da yaklaşım etrafında gelişmiş bir yapı sunmamaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, kullanılan yöntemlerin ele alınan havzanın özelliklerine, mevcut veri altyapısına ve uyarıdan beklenen yanıt süresine bağlı olarak farklılaştığı görülmektedir (Rabuffetti ve ark., 2005; Perera ve ark., 2020; Antwi-Agyakwa ve ark., 2023). Erken uyarı uygulamalarında, bazı durumlarda taşkın oluşumana etki eden süreçlerin ayrıntılı biçimde temsil edilmesi ön plana çıkarken, bazı durumlarda hızlı ve operasyonel çözümler daha belirleyici hale gelmektedir (Lu ve ark., 2008; Hussain ve ark., 2021). Bu çeşitlilik, taşkın erken uyarı sistemlerinin zaman içerisinde farklı modelleme anlayışları etrafında şekillendiğini ve tek bir yaklaşımın tüm uygulama koşullarını kapsamasının mümkün olmadığını göstermektedir (Qian ve ark., 2019; Hauswirth ve ark., 2023; Xu ve ark., 2024).

Süreç Odaklı Modelleme Yaklaşımları

Hidrolojik ve hidrolik modelleme yaklaşımları, taşkın erken uyarı sistemlerinde yağışın havza içerisindeki akışa dönüşümünü ve bu akışın nehir yatakları ile taşkın alanlarındaki davranışını fiziksel süreçler üzerinden temsil etmeyi hedeflemektedir. Bu tür modeller, özellikle yeterli gözlem verisinin bulunduğu ve hidrolojik tepki süresinin görece uzun olduğu havzalarda, taşkın oluşumuna ilişkin tutarlı bir çerçeve sunabilmektedir (Lu ve ark., 2008; Casagrande ve ark., 2017).

Bu yaklaşımların temel avantajı, model çıktılarının hidrometeorolojik girdiler ve havza özellikleri ile tutarlı bir çerçevede yorumlanabilmesine olanak sağlaması ve farklı senaryolar altında sistem davranışının değerlendirilebilmesidir. Buna karşılık, ayrıntılı veri gereksinimi ve hesaplama maliyeti, özellikle gerçek zamanlı erken uyarı uygulamalarında bu tür modellerin kullanımını sınırlandırabilmektedir (Lamichhane ve ark., 2018; Rodríguez-Rincón ve ark., 2015). Bu nedenle bu modeller, güncel erken uyarı sistemlerinde çoğu zaman tek başına bir çözüm olarak değil, sistemin genel yapısı içerisinde belirli işlevleri yerine getiren bileşenler olarak ele alınmaktadır.

Veri Temelli Yaklaşımlar

Veri temelli yaklaşımlar, taşkın tahmininde fiziksel süreçleri açık biçimde temsil etmekten ziyade, geçmiş gözlemlerden elde edilen örüntüler üzerinden tahmin üretmeye odaklanmaktadır. Bu yöntemler, özellikle kısa vadeli tahminlerde ve hesaplama süresinin kritik olduğu uygulamalarda dikkat çekici avantajlar sunmaktadır (Zhou ve ark., 2022).

Bu yaklaşımların öne çıkan yönü, hızlı çalışmaları ve karmaşık fiziksel tanımlara ihtiyaç duymamalarıdır. Gerçek zamanlı sistemlerde,

saniyeler mertebesinde tahmin üretilebilmesi, özellikle kentsel alanlar ve ani taşkınlar için önemli bir kazanım olarak değerlendirilmektedir (Hussain ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu yöntemlerin başarısı büyük ölçüde kullanılan veri setlerinin kapsayıcılığına bağlıdır. Nadir ve aşırı taşkın olaylarının sınırlı sayıda gözlenmiş olması, veri temelli modellerin bu tür durumlarda daha temkinli değerlendirilmesini gerektirmektedir (Byaruhanga ve ark., 2024).

Bu nedenle literatürde, veri temelli yaklaşımların hidrolojik ve hidrolik modellere dayalı yöntemlerin yerine geçmesi değil; belirli uygulama koşullarında bu yöntemleri tamamlayıcı biçimde kullanılması gerektiği yönünde ortak bir görüş öne çıkmaktadır. Özellikle kısa süreli uyarıların üretildiği ve hızlı güncellemenin gerekli olduğu sistemlerde, veri temelli yaklaşımların erken uyarı sürecine anlamlı katkılar sağladığı bildirilmektedir (Zhou ve ark., 2022; Byaruhanga ve ark., 2024).

Birleşik Modelleme Yaklaşımları

Son yıllarda taşkın erken uyarı sistemlerinde, hidrolojik ve hidrolik modellere dayalı yaklaşımlar ile veri temelli tahmin yöntemlerinin birlikte kullanıldığı birleşik modelleme stratejilerinin giderek daha yaygınlaştığı görülmektedir (Zhou ve ark., 2022; Xu ve ark., 2024). Bu çalışmalarda, havza davranışını tanımlamaya yönelik model çıktıları ile geçmiş gözlemlerden öğrenilen istatistiksel ilişkiler birlikte değerlendirilmekte ve erken uyarı üretim sürecinde tamamlayıcı roller üstlenmektedir.

Birleşik yaklaşımlar, özellikle farklı zaman ölçeklerinde çalışan erken uyarı sistemleri açısından işlevsel bir çözüm sunmaktadır. Görece daha uzun tahmin sürelerinde hidrolojik ve hidrolik modellere dayalı öngörüler kullanılırken, kısa vadeli ve sık güncelleme gerektiren durumlarda veri temelli bileşenler devreye alınabilmektedir. Bu yapı, taşkın erken uyarı sistemlerinin tek bir modelleme yaklaşımına bağımlı kalmadan, uygulama koşullarına göre uyarlanabilmesine olanak tanımaktadır (Qian ve ark., 2019; Hauswirth ve ark., 2023).

TAŞKIN TÜRLERİ AÇISINDAN MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Taşkın erken uyarı sistemlerinde kullanılan modelleme yaklaşımları, taşkının ortaya çıkış biçimi, etki alanı ve zamansal ölçeği ile doğrudan ilişkilidir. Nehir taşkınları, ani taşkınlar ve kentsel taşkınlar; hidrolojik süreçler, tepki süreleri ve mekansal yayılım bakımından birbirinden belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu farklılıklar, erken uyarı sistemlerinin tasarımında tek bir modelleme yaklaşımının tüm durumlar için yeterli olmayacağını açık biçimde ortaya koymaktadır (Perera ve ark., 2020; Fernández-Nóvoa ve ark., 2024).

Geniş havzalarda gelişen nehir taşkınları, genellikle yağışın zamana yayılmış etkisiyle oluşmakta ve görece daha uzun tepki sürelerine sahip

olmaktadır. Bu özellik, yağış–akış dönüşümünü ve nehir davranışını süreç temsiline dayalı modeller aracılığıyla birlikte ele alan yaklaşımların kullanılmasına olanak tanımaktadır. Uygulamada bu tür taşkınlar için geliştirilen erken uyarı sistemlerinde, yağış-akış dönüşümünün havza ölçeğinde modellenmesi ve elde edilen debilerin hidrolik modeller aracılığıyla su seviyesi ve taşkın yayılımına dönüştürülmesi yaygın bir yaklaşımdır (Lu ve ark., 2008; Casagrande ve ark., 2017). Ancak bu tür modellerin veri gereksinimi ve hesaplama süresi, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda sistemin tasarımını sınırlayan unsurlar arasında yer almaktadır (Wells ve ark., 2016).

Ani taşkınlar, kısa sürede gelişmeleri ve sınırlı bir uyarı süresi sunmaları nedeniyle modelleme açısından daha zorlayıcı bir problem alanı oluşturmaktadır. Küçük ve dik eğimli havzalarda yoğun yağışlara bağlı olarak ortaya çıkan bu tür olaylarda, süreçlerin ayrıntılı biçimde temsil edilmesi çoğu zaman ikincil planda kalmakta; hızlı ve güvenilir bir uyarının üretilmesi öncelik kazanmaktadır (Broxton ve ark., 2014; Trošelj ve ark., 2023). Bu nedenle ani taşkınlara yönelik erken uyarı sistemlerinde, daha sadeleştirilmiş hidrolojik ve hidrolik esaslara dayalı modeller ya da geçmiş gözlemlerden öğrenen veri temelli yaklaşımlar tercih edilmektedir. Bu yaklaşım, mühendislik uygulamalarında doğruluk ile zaman arasında kurulan bilinçli bir dengeyi yansıtmaktadır (Hussain ve ark., 2021; Rozos ve ark., 2023).

Kentsel alanlarda meydana gelen taşkınlar ise yoğun yapılaşma, geçirimsiz yüzey oranının yüksekliği ve karmaşık drenaj sistemleri nedeniyle farklı bir modelleme yaklaşımı gerektirmektedir. Bu ortamlarda taşkınlar çoğu zaman çok kısa sürede gelişmekte ve sınırlı alanlarda ciddi etkiler oluşturmaktadır. Bu durum, yüksek mekansal çözünürlük gereksinimini ve aynı zamanda hızlı hesaplama ihtiyacını beraberinde getirmektedir (Chitwatkulsiri ve ark., 2023). Ayrıntılı hidrolik modeller kentsel taşkın süreçlerini başarılı biçimde temsil edebilse de, gerçek zamanlı erken uyarı uygulamalarında hesaplama süresi önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Bu nedenle son yıllarda, kentsel taşkın erken uyarı sistemlerinde daha hızlı çalışan veri temelli ya da sadeleştirilmiş modelleme yaklaşımlarına yönelim artmıştır. Bu tür sistemlerde modelleme başarısı, yalnızca hidrolik doğrulukla değil, üretilen bilginin karar vericiler tarafından ne ölçüde kullanılabildiğiyle de yakından ilişkilidir (Mattos ve ark., 2022).

Ölçüm ağının sınırlı olduğu veya hiç bulunmadığı havzalar, taşkın erken uyarı sistemleri açısından ayrı bir zorluk alanı oluşturmaktadır. Bu tür bölgelerde, hidrolojik ve hidrolik modellere ait parametrelerin yerel gözlemlerle güvenilir biçimde belirlenmesi güçleşmekte; bu durum erken uyarı sistemlerinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir. (Koriche ve ark., 2016). Bu bağlamda, uydu tabanlı gözlemler ve geniş veri kümeleriyle eğitilmiş veri temelli yaklaşımlar, erken uyarı sistemlerinin daha geniş coğrafyalara yayılmasına olanak sağlamıştır. Küresel ölçekte

geliştirilen bu tür sistemler, yerel ölçümlere duyulan bağımlılığı azaltmakla birlikte, belirsizliklerin dikkatle ele alınmasını da zorunlu kılmaktadır (Nearing ve ark., 2023; Byaruhanga ve ark., 2024).

Genel olarak değerlendirildiğinde, taşkın erken uyarı sistemlerinde modelleme yaklaşımının seçimi, taşkının türüne, havzanın özelliklerine, veri mevcudiyetine ve sistemden beklenen yanıt süresine bağlı olarak şekillenmektedir. Bu nedenle başarılı bir erken uyarı sistemi, tek bir yönteme dayanmaktan ziyade, farklı yaklaşımların güçlü yönlerini bir araya getiren ve uygulama koşullarına uyarlanabilen esnek bir yapı gerektirmektedir.

MODELLEME YAKLAŞIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRİLMESİ

Taşkın erken uyarı sistemlerinde kullanılan modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılması, yalnızca teknik doğruluk üzerinden yapılabilecek bir değerlendirme değildir. Aksine bu karşılaştırma; modelin hangi ölçekte, hangi veri koşulları altında ve hangi karar sürecine hizmet etmek üzere kullanıldığı dikkate alınarak ele alınmalıdır. Literatürde son yirmi yıl içerisinde yayımlanan çalışmalar, tek bir modelleme anlayışının tüm taşkın koşulları için yeterli olmadığını açık biçimde ortaya koymaktadır (Abebe ve ark., 2005; Wells ve ark., 2016).

Hidrolojik ve hidrolik modeller, taşkın süreçlerini neden–sonuç ilişkileri çerçevesinde temsil etme yetenekleri sayesinde özellikle mühendislik uygulamalarında uzun süre temel araçlar olarak kullanılmıştır. Bu modellerin güçlü yönü, havza davranışını fiziksel ilkeler üzerinden tanımlamaları ve senaryo temelli analizlere olanak tanımalarıdır. Ancak farklı ülkelerde yürütülen operasyonel uygulamalar, bu yaklaşımın veri yoğunluğu ve hesaplama süresi açısından önemli sınırlılıklar barındırdığını göstermektedir (Schellekens ve ark., 2011; Casagrande ve ark., 2017). Özellikle yüksek çözünürlüklü hidrolik modellerin gerçek zamanlı işletimi, erken uyarı süresini kısıtlayan bir unsur haline gelebilmektedir.

Bu sınırlılıklar, veri temelli yaklaşımların taşkın erken uyarı literatüründe daha görünür hale gelmesine zemin hazırlamıştır. İstatistiksel öğrenme ve derin öğrenme temelli modeller, özellikle kısa vadeli tahminlerde ve hızlı hesaplama gerektiren uygulamalarda dikkat çekici sonuçlar üretmektedir. Farklı havzalarda yürütülen karşılaştırmalı çalışmalar, bu tür modellerin geçmişte gözlenen desenleri başarıyla yakalayabildiğini ve gerçek zamanlı sistemlerde pratik avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır (Zhou ve ark., 2022). Bununla birlikte, bu yaklaşımların aşırı ve nadir olaylar karşısındaki davranışı, kullanılan eğitim verisinin kapsayıcılığı ile doğrudan ilişkilidir.

Karşılaştırmalı değerlendirmelerde öne çıkan bir diğer boyut, modelleme yaklaşımının belirsizlikle kurduğu ilişkidir. Hidrolik modellerde belirsizlik çoğunlukla giriş verileri, parametreler ve sınır koşulları üzerinden ele alınırken, veri temelli yaklaşımlarda belirsizlik daha çok modelin

öğrenme süreci ve veri temsiliyetiyle bağlantılıdır. Bu farklılık, erken uyarı sistemlerinde üretilen bilginin nasıl sunulacağı ve karar vericiler tarafından nasıl yorumlanacağı üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır (Dietrich ve ark., 2009; Quigley ve ark., 2019). Literatürde, belirsizliğin açık biçimde ifade edilmediği sistemlerin operasyonel faydasının sınırlı kaldığına işaret eden çok sayıda örnek bulunmaktadır.

Son yıllarda yayımlanan çalışmalar, bu iki yaklaşımın avantajlarını bir araya getirmeyi hedefleyen birleşik modelleme stratejilerinin giderek yaygınlaştığını göstermektedir. Bu tür sistemlerde hidrolojik ve hidrolik modeller, taşkın süreçlerine ilişkin yapısal bir çerçeve sunarken; veri temelli bileşenler, kısa vadeli tahminlerde hız ve uyarlanabilirlik sağlamaktadır. Farklı coğrafyalarda gerçekleştirilen uygulamalar, bu tür bütünleşik yapıların tek başına kullanılan modellere kıyasla daha dengeli performans sergileyebildiğini ortaya koymaktadır (Xu ve ark., 2024; Hauswirth ve ark., 2023).

Modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılmasında dikkate alınması gereken bir diğer unsur da sistemin operasyonel sürdürülebilirliğidir. Ulusal ve bölgesel erken uyarı sistemleri üzerine yapılan değerlendirmeler, teknik olarak yüksek doğruluk sağlayan modellerin her zaman uygulamada tercih edilmediğini göstermektedir. Bunun yerine, bakım gereksinimi düşük, güncellenmesi kolay ve karar süreçlerine hızlı biçimde entegre edilebilen sistemlerin öne çıktığı görülmektedir (Roy ve ark., 2017; Cole ve ark., 2016). Bu durum, modelleme yaklaşımının yalnızca bilimsel başarıya değil, aynı zamanda kurumsal kapasiteye ve operasyonel gerçekliğe de uyum sağlaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, taşkın erken uyarı sistemlerinde modelleme yaklaşımlarının karşılaştırılması, tek bir yöntemin üstünlüğünü ortaya koymaktan ziyade, farklı yöntemlerin hangi bağlamlarda anlam kazandığını göstermektedir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında model seçimi, doğruluk, hız, veri erişimi ve karar destek gereksinimleri birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır. Literatürde son yirmi yılda ortaya konan çalışmalar, esnek ve bağlama duyarlı erken uyarı sistemlerinin, tek tip çözümlere kıyasla daha sürdürülebilir ve etkili olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

ÖLÇEĞE BAĞLI MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Taşkın erken uyarı sistemlerinde ölçek, yalnızca mekansal bir büyüklük değil, aynı zamanda sistemden beklenen karar türünü belirleyen temel bir unsurdur. Havza büyüklüğü, hidrolojik tepki süresi, veri yoğunluğu ve uyarıdan beklenen karar düzeyi, modelleme tercihlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle literatürde taşkın erken uyarı sistemleri, tek bir ölçek veya yöntem etrafında şekillenen yapılar olarak değil; farklı ölçeklerde farklı önceliklerin öne çıktığı dinamik sistemler olarak ele alınmaktadır (Alfieri ve ark., 2012; Thielen ve ark., 2009).

Geniş ölçekli havzalarda geliştirilen erken uyarı sistemleri, genellikle uzun tepki sürelerine ve daha yaygın ölçüm ağlarına dayanmaktadır. Bu tür sistemlerde amaç, taşkın olayının yalnızca başlangıcını değil, gelişimini ve olası etkilerini de önceden değerlendirebilmektir. Bu bağlamda, havza genelinde yağış–akış ilişkisini temsil eden hidrolojik modeller ile nehir ağında akım ve su seviyesi değişimlerini tanımlayan hidrolik modeller birlikte kullanılmaktadır. Avrupa ve Kuzey Amerika'da geliştirilen çeşitli ulusal ve bölgesel erken uyarı sistemleri, bu yaklaşımın operasyonel olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Bartholmes ve ark., 2009; Pappenberger ve ark., 2011; Alfieri ve ark., 2013). Bu ölçeklerde modelleme başarısı, çoğu zaman meteorolojik tahminlerin doğruluğu ve havza genelindeki veri tutarlılığı ile ilişkilendirilmektedir.

Buna karşılık daha küçük havzalarda ve kısa tepki sürelerine sahip sistemlerde, modelleme sürecinde zaman faktörü belirleyici hale gelmektedir. Bu tür alanlarda taşkınlar, saatler hatta bazen dakikalar içinde gelişebilmekte; dolayısıyla erken uyarı sistemlerinden beklenen temel çıktı, yüksek ayrıntılı fiziksel temsilden ziyade, hızlı ve güvenilir bir uyarı üretimidir. Literatürde bu ölçeklerde geliştirilen sistemlerde, daha sadeleştirilmiş modelleme yaklaşımlarının veya geçmiş gözlemlerden doğrudan öğrenen yöntemlerin öne çıktığı görülmektedir (Borga ve ark., 2011; Hapuarachchi ve ark., 2011; Marchi ve ark., 2010). Bu yaklaşım, mühendislik uygulamalarında doğruluk ile zaman arasında kurulan bilinçli bir dengeyi yansıtmaktadır.

Kentsel alanlar söz konusu olduğunda ölçek tartışması daha karmaşık bir hal almaktadır. Mekansal olarak sınırlı olmasına rağmen, yüksek nüfus yoğunluğu ve altyapı hassasiyeti nedeniyle kentsel taşkınlar, erken uyarı sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu alanlarda taşkın süreçleri, geçirimsiz yüzeyler, drenaj ağları ve yerel topoğrafya tarafından güçlü biçimde kontrol edilmektedir. Yüksek çözünürlüklü hidrolik modeller, bu süreçleri ayrıntılı biçimde temsil edebilse de gerçek zamanlı uygulamalarda hesaplama süresi önemli bir sınırlayıcı unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kentsel ölçekte geliştirilen erken uyarı sistemlerinde, modelleme yaklaşımı çoğu zaman hesaplama hızını önceleyen çözümler etrafında şekillenmektedir.

Veri altyapısının sınırlı olduğu veya hiç bulunmadığı bölgelerde ise ölçekten bağımsız olarak farklı bir problem alanı ortaya çıkmaktadır. Bu tür alanlarda geleneksel modelleme yaklaşımlarının uygulanabilirliği azalmakta; taşkın erken uyarı sistemleri daha çok uzaktan algılama verilerine ve geniş ölçekli gözlem ağlarına dayanmaktadır. Son yıllarda küresel ölçekte geliştirilen taşkın erken uyarı sistemleri, farklı coğrafyalarda benzer yöntemlerin uygulanabileceğini göstermiştir (Hirpa ve ark., 2018; Tellman ve ark., 2020). Ancak bu sistemlerde üretilen uyarıların belirsizlik düzeyi, yerel ölçekte geliştirilen sistemlere kıyasla daha yüksek olabilmekte ve bu durumun karar süreçlerine yansıtılması gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, taşkın erken uyarı sistemlerinde ölçeğe bağlı modelleme yaklaşımları, birbirinin alternatifi olarak değil, farklı ihtiyaçlara yanıt veren tamamlayıcı yapılar olarak ortaya çıkmaktadır. Büyük ölçekli sistemler stratejik kararlar için bilgi üretirken, daha küçük ölçekli uygulamalar operasyonel müdahaleler için zaman kazandırmaktadır. Bu nedenle başarılı bir erken uyarı sistemi, belirli bir ölçeğe sabitlenmiş bir modelleme anlayışından ziyade, ele alınan alanın özelliklerine uyum sağlayabilen esnek bir yapı gerektirmektedir. Literatürde giderek daha fazla vurgulanan bu yaklaşım, taşkın riskinin karmaşık ve çok boyutlu doğasıyla da örtüşmektedir.

BELİRSİZLİK VE SİSTEM PERFORMANSI

Taşkın erken uyarı sistemlerinin değerlendirilmesinde, tahmin doğruluğunun yanı sıra belirsizliklerin karar vericilere nasıl aktarıldığı da belirleyici bir rol oynamaktadır. Taşkın süreçleri, meteorolojik koşullardan arazi özelliklerine kadar çok sayıda değişkene bağlı olarak geliştiği için, erken uyarı sistemlerinde üretilen tahminlerin mutlak doğruluk iddiası taşıması çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle literatürde, taşkın erken uyarı sistemlerinin başarısı yalnızca tahmin edilen değerlerle değil, bu tahminlere eşlik eden belirsizliklerin nasıl tanımlandığı ve iletildiği üzerinden değerlendirilmektedir (Dietrich ve ark., 2009; Pappenberger ve ark., 2011).

Belirsizlikler, erken uyarı sistemlerinin hemen her aşamasında ortaya çıkabilmektedir. Meteorolojik tahminlerdeki hata payları, hidrolojik ve hidrolik modellerde kullanılan parametrelerin kesin olarak belirlenememesi ve ölçüm verilerindeki eksiklikler, bu belirsizliklerin başlıca kaynakları arasında yer almaktadır (Thielen ve ark., 2009; Alfieri ve ark., 2012). Literatürde bu durum, özellikle tahmin süresi uzadıkça daha belirgin hale gelmekte; kısa vadeli tahminlerde model yapısına bağlı belirsizlikler öne çıkarken, daha uzun vadeli öngörülerde meteorolojik girdilerin etkisi baskın hale gelmektedir.

Erken uyarı sistemlerinin performansını değerlendirmeye yönelik çalışmalarda, klasik hata ölçütlerinin yanı sıra belirsizliği dikkate alan yaklaşımların giderek daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Akım ve su seviyesi tahminleri için yaygın olarak kullanılan istatistiksel ölçütler, sistemlerin geçmiş olaylar karşısındaki davranışını ortaya koyarken; taşkın yayılımına ilişkin değerlendirmelerde mekansal uyumu temel alan ölçütler ön plana çıkmaktadır. Ancak bu tür ölçütlerin tek başına kullanılması, erken uyarı sistemlerinin operasyonel değerini tam olarak yansıtmayabilmektedir.

Bu noktada literatürde, performans değerlendirmesinin yalnızca sayısal doğruluk üzerinden değil, uyarıların zamanlaması ve karar süreçlerine katkısı üzerinden ele alınması gerektiği yönünde güçlü bir eğilim bulunmaktadır. Erken uyarının birkaç saat erken ya da geç üretilmesi, özellikle hızlı gelişen taşkınlarda, teknik doğruluktan çok daha kritik

sonuçlar doğurabilmektedir (Borga ve ark., 2011; Marchi ve ark., 2010). Bu nedenle erken uyarı sistemlerinin değerlendirilmesinde, "doğru tahmin" kavramı çoğu zaman "kullanılabilir tahmin" kavramı ile birlikte ele alınmaktadır.

Belirsizliğin açık biçimde ifade edilmesi, erken uyarı sistemlerinin karar destek işlevini doğrudan etkilemektedir. Literatürde yer alan uygulama örnekleri, belirsizlik bilgisi sunulmayan uyarıların, karar vericiler tarafından ya aşırı temkinli ya da tamamen göz ardı edilen tepkilere yol açabildiğini göstermektedir (Pappenberger ve ark., 2011; Tellman ve ark., 2020). Buna karşılık, belirsizliklerin açık ve anlaşılır biçimde sunulduğu sistemlerde, erken uyarıların daha etkin biçimde kullanıldığına dair bulgular mevcuttur (Hirpa ve ark., 2018).

Genel olarak değerlendirildiğinde, taşkın erken uyarı sistemlerinde performans ve belirsizlik, birbirinden bağımsız kavramlar olarak ele alınmamaktadır. Literatürdeki eğilim, teknik doğruluk ile karar süreçlerine katkının birlikte değerlendirilmesi yönündedir. Bu yaklaşım, erken uyarı sistemlerinin yalnızca modelleme başarısı üzerinden değil, risk yönetimi sürecine sağladığı katkı üzerinden anlam kazanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle modern taşkın erken uyarı sistemleri, belirsizliği ortadan kaldırmayı değil, belirsizlikle birlikte karar üretmeyi hedefleyen yapılar olarak değerlendirilmektedir.

DEĞERLENDİRME

Bu bölüm boyunca ele alınan çalışmalar, taşkın erken uyarı sistemlerinin tek bir teknik çözüm ya da tek bir modelleme anlayışı üzerinden tanımlanamayacağını açık biçimde ortaya koymaktadır. Literatürde son yirmi yılda geliştirilen yaklaşımlar incelendiğinde, erken uyarı sistemlerinin giderek daha esnek, bağlama duyarlı ve çok bileşenli yapılar haline geldiği görülmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca modelleme tekniklerindeki gelişmelerle değil, taşkın riskinin mekansal, zamansal ve toplumsal boyutlarının daha iyi anlaşılmasıyla da ilişkilidir.

Farklı ölçeklerde geliştirilen erken uyarı sistemleri, taşkın süreçlerinin doğasına bağlı olarak farklı öncelikler etrafında şekillenmektedir. Geniş havzalarda daha uzun tahmin süreleri ve stratejik değerlendirmeler ön plana çıkarken, küçük ve hızlı tepki veren sistemlerde zamanlama ve operasyonel hız belirleyici olmaktadır. Kentsel alanlarda ise bu iki uç arasında, hem yüksek mekansal ayrıntı hem de hızlı karar üretimi gereksinimi birlikte ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki uygulamalar, bu farklılıkların tek bir modelleme yaklaşımıyla karşılanamayacağını; buna karşılık, uygulama koşullarına uyarlanabilen esnek sistemlerin daha sürdürülebilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesinde dikkat çeken ortak noktalardan biri, teknik doğruluğun tek başına yeterli bir ölçüt olarak görülmemesidir. Erken uyarı sistemlerinin gerçek değeri, ürettikleri bilginin

karar süreçlerine ne ölçüde katkı sağladığıyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle literatürde, tahmin performansının yalnızca istatistiksel ölçütlerle değil, uyarıların zamanlaması, anlaşılabilirliği ve kullanılabilirliği üzerinden de ele alındığı görülmektedir. Özellikle hızlı gelişen taşkınlarda, teknik olarak daha ayrıntılı fakat geç üretilen bir tahminin, daha sade fakat zamanında sunulan bir uyarıya kıyasla daha az etkili olabildiği vurgulanmaktadır.

Belirsizlik konusu, bu bütüncül değerlendirmenin merkezinde yer almaktadır. Taşkın erken uyarı sistemlerinde belirsizliğin tamamen ortadan kaldırılması mümkün olmamakta; esas mesele, bu belirsizliğin nasıl yönetildiği ve karar vericilere nasıl aktarıldığı olmaktadır. Literatürde yer alan uygulama deneyimleri, belirsizliğin açık biçimde ifade edildiği sistemlerde erken uyarıların daha etkin kullanıldığını, belirsizliğin gizlendiği ya da ihmal edildiği durumlarda ise uyarıların ya aşırı temkinli ya da etkisiz tepkilerle karşılandığını göstermektedir. Bu durum, erken uyarı sistemlerinin yalnızca teknik araçlar değil, aynı zamanda iletişim ve karar destek mekanizmaları olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda geliştirilen taşkın erken uyarı sistemleri, bu çok boyutlu yapıyı giderek daha fazla dikkate almaktadır. Farklı veri kaynaklarının birlikte kullanılması, modelleme yaklaşımlarının uygulama ölçeğine göre uyarlanması ve belirsizlik bilgisinin karar süreçlerine entegre edilmesi, literatürde öne çıkan ortak eğilimler arasında yer almaktadır. Bu eğilimler, erken uyarı sistemlerinin sabit ve tamamlanmış çözümlerden ziyade, sürekli geliştirilen ve yerel deneyimlerle şekillenen yapılar olduğunu göstermektedir.

Bu çerçevede taşkın erken uyarı sistemleri, yalnızca mühendislik hesaplarının bir çıktısı olarak değil, risk yönetimi sürecinin bütünleyici bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Literatürdeki çalışmalar birlikte ele alındığında, başarılı erken uyarı sistemlerinin ortak özelliğinin belirli bir yönteme bağlı kalmak değil, farklı yaklaşımları uygulama koşullarıyla uyumlu biçimde bir araya getirebilmek olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım, taşkın riskinin karmaşık doğasına daha gerçekçi bir yanıt sunmakta ve erken uyarı sistemlerinin sahadaki etkinliğini artırmaktadır.

SONUÇ

Bu kitap bölümünde, taşkın erken uyarı sistemleri son yirmi yılda yayımlanan çalışmalar çerçevesinde ele alınmış; kullanılan modelleme yaklaşımları ve uygulama pratikleri, farklı ölçekler ve kullanım bağlamları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Literatürdeki gelişim incelendiğinde, taşkın erken uyarı sistemlerinin zaman içerisinde tekil modelleme çözümlerinden uzaklaştığı ve giderek daha bütünleşik yapılar haline geldiği görülmektedir. Bu dönüşüm, teknik ilerlemelerin yanı sıra taşkın riskinin çok boyutlu doğasının daha açık biçimde kavranmasının da bir sonucudur.

İncelenen çalışmalar, erken uyarı sistemlerinin başarısının belirli bir modelleme yaklaşımına bağlı olmadığını; bunun yerine, seçilen yöntemin uygulama ölçeği, veri altyapısı ve karar süreçleriyle kurduğu ilişkiyle anlam kazandığını ortaya koymaktadır. Geniş havzalarda geliştirilen sistemler ile küçük ve hızlı tepki veren alanlara yönelik uygulamalar arasında belirgin farklılıklar bulunmakta; kentsel alanlar ise bu iki uç arasında özgün gereksinimler barındırmaktadır. Bu durum, taşkın erken uyarı sistemlerinin tasarımında bağlama duyarlı ve esnek yaklaşımların önemini açık biçimde göstermektedir.

Modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesinde, teknik doğruluk kadar zamanlama, belirsizlik ve karar süreçlerine katkı gibi unsurların da belirleyici olduğu görülmektedir. Literatürde yer alan uygulama deneyimleri, erken uyarı sistemlerinin yalnızca tahmin üreten araçlar olarak değil, risk yönetimi sürecinin bir parçası olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Özellikle belirsizliğin açık biçimde tanımlanması ve karar vericilere anlaşılabilir şekilde aktarılması, erken uyarıların etkinliği açısından kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda geliştirilen sistemlerde, farklı veri kaynaklarının birlikte kullanılması, modelleme yaklaşımlarının uygulama koşullarına göre uyarlanması ve belirsizliğin karar destek süreçlerine entegre edilmesi yönünde ortak bir eğilim gözlenmektedir. Bu eğilim, taşkın erken uyarı sistemlerinin sabit ve tamamlanmış çözümlerden ziyade, sürekli geliştirilen ve yerel deneyimlerle şekillenen yapılar olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda erken uyarı sistemleri, yalnızca mühendislik hesaplarının bir çıktısı değil, dinamik bir risk yönetimi sürecinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Genel olarak ele alındığında, bu bölümde incelenen literatür, taşkın erken uyarı sistemlerinin gelecekte de tek bir yaklaşım etrafında şekillenmeyeceğini; farklı ölçekler, veri koşulları ve uygulama ihtiyaçlarına göre uyarlanabilen bütünleşik sistemlerin önemini koruyacağını göstermektedir. Bu çerçevede sunulan değerlendirmelerin, taşkın erken uyarı sistemlerine yönelik yürütülecek çalışmalara ve uygulamalara literatür temelli bir bakış açısı kazandırması amaçlanmaktadır.

REFERANSLAR

Abebe, Y., Ghorbani, A., ve Vojinovic, Z. (2005). Decision support system for urban flood management. Journal of Hydroinformatics, 7(1), 3–15. https://doi.org/10.2166/hydro.2005.0002

Alfieri, L., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Haiden, T., Richardson, D., ve Salamon, P. (2012). Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. Journal of Hydrology, 517, 913–922.

Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., ve Thielen, J. (2013). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. Environmental Science and Policy, 21, 35–49.

Annis, A., Nardi, F., Morrison, R. R., ve Annis, A. (2018). Integrating a 2D hydraulic model and GIS algorithms into a data assimilation framework for real time flood forecasting and mapping. Proceedings of E3S Web of Conferences. https://doi.org/10.29007/29ND

Antwi-Agyakwa, K., Adu-Manu, K. S., ve Amponsah, W. (2023). Know to predict, forecast to warn: A review of flood risk prediction tools. Water, 15(3), 427. https://doi.org/10.3390/w15030427

Apel, H., Vorogushyn, S., Merz, B., ve Thieken, A. (2022). Impact forecasting could substantially improve the emergency management of deadly floods. Natural Hazards and Earth System Sciences. https://doi.org/10.5194/nhess-2022-33

Bartholmes, J., Thielen, J., Ramos, M. H., ve Gentilini, S. (2009). The European flood alert system EFAS – Part 2. Hydrology and Earth System Sciences, 13, 141–153.

Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G., ve Creutin, J. D. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management. Journal of Hydrology, 394, 1–3.

Broxton, P. D., Troch, P. A., ve Lyon, S. W. (2014). An all-season flash flood forecasting system for real-time operations. Bulletin of the American Meteorological Society, 95(3), 381–394. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00212.1

Brown, J. D., Ramos, M. H., ve He, Y. (2016). Methods and tools to support real time risk-based flood forecasting. E3S Web of Conferences, 7, 18019.

Byaruhanga, P., Mutanga, O., ve Sibanda, M. (2024). Evolution of flood prediction and forecasting models for flood early warning systems: A scoping review. Water, 16(13), 1763. https://doi.org/10.3390/w16131763

Casagrande, E., Borga, M., ve Zanon, F. (2017). Early flood warning in the Itajaí-Açu River basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling. Natural Hazards, 88, 91–122. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2889-0

Chitwatkulsiri, D., Tran, D. D., ve Le, T. (2023). Real-time urban flood forecasting systems for Southeast Asia. Water, 15(1), 178. https://doi.org/10.3390/w15010178

Cole, S. J., Moore, R. J., ve Bell, V. A. (2016). Real-time forecasts of flood hazard and impact. E3S Web of Conferences, 7, 18015.

Demir, F., ve Sönmez, O. (2025). A real-time water level and discharge monitoring station: A case study of the Sakarya River. *Applied Sciences*, 15(4), 1910. https://doi.org/10.3390/app15041910

Dietrich, J. C., Trahan, C. J., ve Westerink, J. J. (2009). Assessing uncertainties in flood forecasts for decision making. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1529–1540. https://doi.org/10.5194/nhess-9-1529-2009

Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., ve González-Cao, J. (2024). Enhancing flood risk management. Water, 16(10), 1408. https://doi.org/10.3390/w16101408

Hauswirth, S. M., Schellenberg, G., ve Weiler, M. (2023). The suitability of a seasonal ensemble hybrid framework. Hydrology and Earth System Sciences, 27, 501–517. https://doi.org/10.5194/hess-27-501-2023

Hirpa, F. A., Alfieri, L., Salamon, P., ve Pappenberger, F. (2018). Validation of global flood forecasting models. Hydrology and Earth System Sciences, 22, 4387–4404.

Hussain, M., Kim, S., ve Lee, H. (2021). Comparative study of very short-term flood forecasting. Natural Hazards, 107, 1531–1550. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04582-3

Koriche, S. A., Brissette, F., ve Leconte, R. (2016). Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. Physics and Chemistry of the Earth, 93, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.007

Lamichhane, S., Sharma, S., ve Shrestha, S. (2018). Effect of input data in hydraulic modeling. Hydrological Sciences Journal, 63(6), 857–870. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1464166

Lu, G., Wu, Z., ve Wang, L. (2008). Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River Basin. Science China Technological Sciences, 51, 104–113. https://doi.org/10.1007/s11431-008-0093-x

Marchi, L., Borga, M., ve Preciso, E. (2010). Characterisation of flash floods. Journal of Hydrology, 394, 1–15.

Mattos, T. S., Mendiondo, E. M., ve Rodrigues, D. B. B. (2022). Flood alert web application for risk reduction. Environmental Modelling and Software, 151, 105367. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105367

Nearing, G. S., Kratzert, F., ve Gupta, H. V. (2023). AI increases global access to reliable flood forecasts. arXiv. https://doi.org/10.48550/arxiv.2307.16104

Perera, D., Seidou, O., ve Rautela, P. (2020). Challenges and technical advances in flood early warning systems. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93069

Quigley, M. C., Attanayake, J., ve King, A. (2019). The provision and utility of science and uncertainty to decision makers. Environment Systems and Decisions, 39, 1–16. https://doi.org/10.1007/s10669-019-09728-0

Rabuffetti, D., Milelli, M., ve Salandin, A. (2005). Operational hydro-meteorological warning. Hydrology and Earth System Sciences, 9(5), 457–466. https://doi.org/10.5194/hess-9-457-2005

Rodríguez-Rincón, J. P., Velásquez, J. D., ve Ruiz, A. (2015). Propagation of hydro-meteorological uncertainty. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 2981–2998. https://doi.org/10.5194/hess-19-2981-2015

Rozos, E., Efstratiadis, A., ve Koussis, A. (2023). Efficient flood early warning system. Hydrology, 10(10), 203. https://doi.org/10.3390/hydrology10100203

Roy, S., Thirel, G., ve Pappenberger, F. (2017). Design and implementation of an operational multimodel platform. Journal of Hydroinformatics, 19(6), 1105–1121. https://doi.org/10.2166/hydro.2017.111

Sefercik, U. G., Nazar, M., ve Görken, M. (2025). DInSAR ve MT-DInSAR teknolojileri ile afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetimi. *Geomatik*, 10(2), 251–273.

Schellekens, J., Weerts, A. H., ve Moore, R. J. (2011). The use of MOGREPS ensemble rainfall forecasts. Advances in Geosciences, 29, 77–84. https://doi.org/10.5194/adgeo-29-77-2011

Tellman, B., Sullivan, J. A., ve Kuhn, C. (2020). Satellite-based flood monitoring. Nature Climate Change, 10, 395–402.

Thielen, J., Bartholmes, J., ve Ramos, M. H. (2009). The European flood alert system. Hydrology and Earth System Sciences, 13, 125–136.

Trošelj, M., Rubinić, J., ve Kapović Solomun, M. (2023). Real-time flash flood forecasting approach. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 14(1), 1–18. https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2269295

Xu, Y., Nearing, G. S., ve Shen, C. (2024). A hybrid model coupling process-driven and data-driven models. Journal of Hydrology, 635, 131494. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131494

Zelentsov, V., Ozturk, D., ve Arslan, H. (2019). Integrated use of GIS and remote sensing data. ISPRS Archives, XLII-3/W8, 477–484. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-477-2019

Zhou, Y., Fang, K., ve Chen, X. (2022). A deep learning technique-based data-driven model. Hydrology and Earth System Sciences, 26, 1–15. https://doi.org/10.5194/hess-2021-596

9

Magnezyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı: Mekanizmalar, Çözelti Ortamları ve Koruma Stratejileri

Boshra AJLOUNI[1]

Muhammet Emre TURAN[2]

1- Yüksek Lisans Öğrencisi; Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. boshraajlouni@gmail.com ORCID No: 0009-0000-6987-7968

2- Doç. Dr.; Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. memreturan@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6807-9646

ÖZET

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunluk (1.74 g/cm³) ve yüksek özgül mukavemet özellikleriyle otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde stratejik öneme sahip hafif yapısal malzemelerdir. Ancak bu alaşımların -2.37 V gibi çok düşük standart elektrot potansiyeli, özellikle klorür içeren sulu ortamlarda ciddi korozyon sorunlarına yol açmaktadır. Bu derleme, 2020-2025 yılları arasında yayınlanan güncel araştırmaları temel alarak, magnezyum alaşımlarının farklı kimyasal ortamlardaki korozyon davranışlarını sistematik olarak incelemektedir. Çalışmada, klorür konsantrasyonunun, çözelti pH değerinin, sülfat ve amonyum iyonlarının varlığının korozyon kinetikleri ve mekanizmaları üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Magnezyum yüzeyinde oluşan $Mg(OH)_2$ filminin pH'a bağlı kararlılığı, asidik ortamlarda filmin çözünme mekanizmaları ve alkalin ortamlarda pasivasyonu detaylı olarak tartışılmaktadır. Negatif fark etkisi (NDE) gibi magnezyuma özgü benzersiz elektrokimyasal fenomenler, anodik polarizasyon altında anormal hidrojen evrimi, galvanik korozyon mekanizmaları ve mikroyapısal heterojenliklerden kaynaklanan mikro-galvanik çiftlerin korozyon süreçlerindeki rolü incelenmektedir. Deniz suyu ve endüstriyel atmosferlerdeki gerçek maruziyet koşullarının, laboratuvar testlerinden önemli ölçüde farklı sonuçlar verdiği ve dinamik çevre faktörlerinin korozyon hızını belirgin şekilde etkilediği vurgulanmaktadır. Katmanlı çift hidroksit (LDH) filmleri, mikro-ark oksidasyon (MAO) kaplamaları ve kendini onarabilen akıllı kaplama sistemleri gibi güncel yüzey modifikasyon teknolojilerinin korozyon kontrolündeki etkinliği, farklı çözelti ortamlarındaki performansları ve uzun vadeli dayanıklılıkları bağlamında değerlendirilmektedir. Derleme, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve in-situ karakterizasyon teknikleriyle elde edilen mekanistik bulguları sentezleyerek, endüstriyel uygulamalar için daha güvenilir korozyon tahmin modelleri ve standart test protokollerinin geliştirilmesi gerekliliğine dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler – Magnezyum, Korozyon mekanizmaları, Elektrokimyasal davranış, Çözelti ortamı, pH etkisi

GİRİŞ

Magnezyum (Mg), -2.37 V standart elektrot potansiyeli ile yapısal metaller arasında en reaktif olanıdır (Song ve Atrens, 2023). Bu yüksek elektrokimyasal aktivite, magnezyum alaşımlarının sulu ortamlarda hızla korozyona uğramasına neden olmaktadır. Magnezyumun yüzeyinde oluşan doğal oksit/hidroksit filmi, nem varlığında gözeneklidir ve koruyucu özelliği zayıf olan bir yapıya sahiptir.

2023 yılında Wei ve Gao tarafından yapılan kapsamlı bir derleme çalışması, magnezyum alaşımlarının korozyon mekanizması ve koruması üzerine son araştırma gelişmelerini özetlemiştir. Çalışmaya göre, nötr veya zayıf asidik düşük konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde, Al-Mg galvanik çifti başlangıçta Mg'yi anot olarak kullanmakta, ancak Mg'nin çözünmesiyle çözelti alkalin hale gelmekte ve Al anot haline dönüşmektedir. Bu nedenle alkalin ortamda (pH > 8.5), alaşımın korozyon süreci büyük ölçüde inhibe edilmektedir (Wei ve Gao, 2023). Lin ve Fang (2017), magnezyum oksit filminin pH 8.5'in altında kararsız hale geldiğini ve hemen çözündüğünü bildirmişlerdir. Magnezyumun korozyon davranışı, çözelti kimyasından (pH, klorür konsantrasyonu, çözünmüş oksijen), sıcaklıktan, alaşım bileşiminden ve mikroyapısal özelliklerden büyük ölçüde etkilenmektedir.

Bu çalışma, magnezyum alaşımlarının farklı çözelti ortamlarındaki korozyon davranışlarını 2020-2025 döneminde yayınlanan güncel araştırmalar ışığında kapsamlı olarak incelemektedir. 2022 yılında yayınlanan bibliometrik analizlere göre, Web of Science Core Collection veritabanında Mg ve alaşımları alanında 4600'den fazla makale yayınlanmış ve mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyonun hala ana araştırma odakları olduğu gösterilmiştir (Song vd., 2023).

Bu çalışma kapsamında, aşağıdaki ana çözelti sistemlerini ele alınmaktadır:

1. Klorür İçeren Çözeltiler: NaCl çözeltileri (değişen konsantrasyonlarda), deniz suyu, tuzlu sprey ortamları
2. pH Değişimli Çözeltiler: Asidik çözeltiler (pH < 7), nötr çözeltiler (pH ≈ 7), alkalin çözeltiler (pH > 7)
3. Sülfat İçeren Çözeltiler: Na_2SO_4 çözeltileri ve karışık sülfat-klorür sistemleri
4. Amonyum İçeren Çözeltiler: NH_4^+ iyonlarının korozyon üzerindeki etkileri

Her çözelti sistemi için, korozyon mekanizmaları, elektrokimyasal davranış, korozyon ürünlerinin karakterizasyonu ve korozyon hızına etki eden faktörler detaylı olarak ele alınmaktadır.

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ TEMEL KOROZYON MEKANİZMALARI

Magnezyumun sulu çözeltilerdeki korozyon mekanizması, anodik çözünme ve katodik reaksiyonların eşzamanlı olarak gerçekleştiği elektrokimyasal bir süreçtir (Song ve Atrens, 2023). Temel reaksiyonlar şu şekilde ifade edilmektedir:

Anodik reaksiyon: $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$
Katodik reaksiyonlar:
- Asidik ortamlarda: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

- Nötr/alkalin ortamlarda: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- Oksijenli ortamlarda: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Bu reaksiyonların sonucunda yüzey yakınında pH yükselmekte ve magnezyum hidroksit oluşmaktadır.

$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$

2023 yılında yayınlanan bir çalışma, pH değişiminin galvanik metallerin elektrolit reaksiyonunu ve polaritesini değiştirebileceğini göstermiştir. Magnezyum alaşımları kompoziyon, mikroyapı ve kristalografik oryantasyonda homojen değildir. Bu farklılıklar, çeşitli elektrokimyasal aktivitelere yol açarak mikroskobik ölçekte galvanik çiftlerin oluşmasına neden olmaktadır (Wei ve Gao, 2023). Bir diğer korozif etki olarak gösterilen Negatif fark etkisi (NDE), magnezyum alaşımlarının en ilginç ve benzersiz özelliklerinden biridir. Klasik elektrokimyasal teori, anodik polarizasyonla korozyon hızının azalması gerektiğini öne sürmektedir. Ancak magnezyumda, termodinamik olarak beklenmeyecek şekilde, anodik potansiyellerde bile hidrojen gazı açığa çıkmaya devam etmektedir. Li ve arkadaşları (Li vd., 2021) magnezyum üzerinde anodik hidrojen evrimini detaylı olarak incelemişler ve anodik polarizasyon altında bile hidrojen üretiminin devam etmesinin mekanizmasını açıklamışlardır. Kararsız tek değerlikli Mg^+ iyonlarının oluşması ve anodik polarizasyon altında yüzey filmindeki kusurların daha fazla katodik reaksiyona neden olması çalışmalarında raporlanmıştır.

KLORÜR İÇEREN ÇÖZELTİLERDE KOROZYON

Farklı Konsantrasyonlarda NaCl Çözeltileri

Sodyum klorür çözeltileri, magnezyum alaşımlarının korozyon testleri için en yaygın kullanılan ortamlardır. Kumar ve arkadaşları (Kumar vd., 2024) AZ31 magnezyum alaşımının farklı konsantrasyonlarda NaCl çözeltilerindeki korozyon performansını sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmada 0.9%, 3.5% ve 5M NaCl çözeltilerinde 2 haftalık ağırlık kaybı ölçümleri yapılmıştır. Bulgular:
- 3.5% NaCl (deniz suyu benzeri): 0.27 mm/yıl korozyon hızı
- 5M NaCl (yüksek konsantrasyon): 9.7 mm/yıl korozyon hızı
Bu sonuçlar, klorür konsantrasyonunun korozyon hızı üzerindeki dramatik etkisini açıkça göstermektedir. Düşük klorür seviyelerinde, yüzeyde oluşan $Mg(OH)_2$ filmi koruyucu özellik gösterebilmektedir. Ancak klorür konsantrasyonu arttıkça, bu film daha hızlı çözünmekte ve $MgCl_2$ oluşumu artmaktadır.

2023 yılında yayınlanan bir çalışmada, %3.5 ağırlık NaCl çözeltisinde Mg-Al-Ca-Mn alaşımlarının (A04, A08 ve A12 olarak adlandırılan) korozyon potansiyeli (Ecorr) ve korozyon akımı (Icorr) değerleri sistematik olarak incelenmiştir (Liu vd., 2023).Al içeriği %1.2 olan alaşım (A12), Fe içeriğinin ve dolayısıyla katodik etkinin azalması sayesinde en düşük korozyon oranına ve en iyi korozyon direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Deniz Suyu ve Dinamik Maruziyet Koşulları

2024 yılında Li ve arkadaşları (Li vd., 2024) tarafından yapılan çalışma, AZ91 magnezyum alaşımının Batı Pasifik Okyanusu'na uzanan bir okyanus yolculuğu sırasındaki dinamik deniz atmosferi korozyonunu incelemiştir. Bu gerçek ortam çalışması, laboratuvar testlerinin korozyon hızını önemli ölçüde hafife aldığını göstermiştir. 12 aylık maruziyet sonrasında:

- Yıllık korozyon hızı: 32.50 μm/yıl (statik testlerden birkaç kat yüksek)
- Maksimum çukurcuk derinliği: 197 μm
- Klorür birikme hızı: 100 mg/m²·gün üzerinde (3. ayda 1100 mg/m²·gün)

2022 yılında yapılan bir başka gerçek ortam çalışmasında, EW75 magnezyum alaşımının araştırma gemisi KEXUE'deki korozyon davranışı incelenmiştir. Batı Pasifik çevresinde yaklaşık 3 aylık okyanus yolculuğu sırasında korozyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve EW75 alaşımının ekstrüzyon yüzeyinde ortalama korozyon hızı 0.0903 mm/yıl, kesit yüzeyinde ise 0.1537 mm/yıl olarak bulunmuştur (Liu vd., 2022).

Klorür İyonlarının Korozyon Mekanizması

Klorür iyonlarının magnezyum korozyonunu hızlandırma mekanizması çok yönlüdür. Kwon ve arkadaşları (Kwon vd., 2023), AZ31 Mg alaşımının farklı anyonlar (klorür, sülfat, nitrat) içeren nötr sulu çözeltilerdeki korozyon davranışını karşılaştırmışlardır.

Klorür iyonlarının etkileri:

1. Film Çözünmesi: Klorür iyonları, $Mg(OH)_2$ filmindeki zayıf noktalardan geçmekte ve film altında çözünmektedir. Nihayetinde magnezyum klorür komplekslerinin oluşumunu hızlandırmaktadır.
2. pH Düşürücü Etki: Oluşan $MgCl_2$ hidrolize uğramakta ve lokal pH'ı düşürmektedir.
3. Çukurcuk Başlatma: Düşük pH bölgelerinde $Mg(OH)_2$ filmi çözünmekte ve çukurcuk korozyonu başlamaktadır.
4. Otokatalitik Süreç: Çukurcuk içinde magnezyum daha hızlı çözünmekte böylelikle süreç kendini beslemektedir.

pH DEĞİŞİMİNİN KOROZYON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Asidik Ortamlarda Korozyon (pH < 7)

Magnezyum alaşımları asidik çözeltilerde çok hızlı ve şiddetli korozyona uğramaktadır. Wei ve Gao (Wei ve Gao, 2023) tarafından yapılan sistematik bir çalışma, düşük pH (asidik koşullar) değerlerinde korozyon hızının malzeme yüzeyindeki hidrojen açığa çıkma reaksiyonları nedeniyle arttığını göstermiştir. Bu reaksiyon, alaşım yüzeyinde hidrojen kabarcıklarının oluşumuna yol açarak çukurcuk korozyonuna neden olmaktadır. Bu durum korozyon hızını önemli ölçüde arttırmaktadır. Ek olarak, düşük pH koşulları alaşım yüzeyinde oluşan koruyucu oksit tabakasının çözünmesine de yol açmakta ve korozyon sürecini daha da hızlandırmaktadır. pH değeri azaldıkça, korozyon potansiyeli daha negatif (daha aktif) yöne doğru hareket etmektedir. Bu durum klorür iyonu konsantrasyonunun korozyon üzerindeki etkisiyle aynı süreci takip etmektedir.

Asidik çözeltilerdeki korozyon mekanizması:

- pH < 4: $Mg(OH)_2$ filmi tamamen çözünmüş, çok hızlı korozyon
- pH 4-6: Kısmen çözünmüş film, hızlı korozyon
- pH 6-7: Zayıf film oluşumu, orta korozyon hızı

Alkalin Ortamlarda Korozyon (pH > 7)

Yüksek pH değerlerinde (pH > 10.5), magnezyum alaşımları büyük ve kararlı bir magnezyum hidroksit filmi oluştuğu için nispeten iyi korozyon direnci göstermektedir. pH değerinin artmasıyla (alkalin koşullarda) malzeme yüzeyinde pasif bir filmin oluşumu nedeniyle Mg alaşımlarının korozyon hızının azalabilmektedir.

pH 11.5'in üzerine çıkıldığında, pasif kararlı bir $Mg(OH)_2$ tabakası oluşmaktadır. Zhang ve arkadaşları tarafından (Zhang vd., 2020) yapılan bir çalışmada, pH 10 değerinde (optimum veri) hidrotermal işlemle (150°C, 5 saat) saf Mg üzerinde yaklaşık 17 μm kalınlığında uniform ve kompakt bir magnezyum hidroksit kaplamasının oluşturulabileceği rapor edilmiştir.

SÜLFAT VE AMONYUM ÇÖZELTİLERİNDE KOROZYON

Sodyum Sülfat Çözeltilerinde Korozyon

Sülfat iyonları, klorür iyonlarına kıyasla magnezyum korozyonu üzerinde daha az agresif bir etkiye sahiptir. Kwon ve arkadaşları (Kwon vd., 2023) tarafından yayınlanan çalışmada, sülfat çözeltilerinde oluşan yüzey filminin daha koruyucu etki gösterdiği bildirilmiştir. WE43 alaşımının sodyum sülfat çözeltisindeki korozyon davranışına odaklanan önceki bir çalışma, Li ve diğerleri (Li vd., 2023) tarafından yapılmıştır. WE43 ve AZ80 alaşımlarının sodyum klorür ve sodyum sülfat çözeltilerindeki korozyon

davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu araştırmacılar, WE43 alaşımının çözeltisine daldırıldığında kendine özgü bir mikro-galvanik korozyon davranışı sergilediğini tespit etmiştir.

Amonyum İçeren Çözeltilerde Korozyon

Amonyum iyonları (NH_4^+), magnezyum alaşımlarının korozyonunu önemli ölçüde hızlandıran bir faktördür. Pan ve arkadaşları (Pan vd., 2020), sülfat çözeltisinde AZ31 magnezyum alaşımının amonyum kaynaklı korozyonunun mekanistik çalışmasını yayınlamışlardır. Amonyum iyonlarının korozyon mekanizması:

1. Kompleks Oluşumu: NH_4^+ iyonları, Mg^{2+} ile kararlı kompleksler oluşturur.
2. Film Çözünmesi: NH_4^+, $Mg(OH)_2$ filmini çözer.
3. pH Düşürücü Etki: NH_4^+ hidrolizi asidik ortam yaratır.
4. Katodik Reaksiyon Hızlandırması: NH_4^+ indirgenmesi hidrojen üretimini artırır.

Yayınlanan başka bir çalışmada, alkalin NH_4^+ içeren çözeltilerde anodik olarak polarize Mg yüzeyinde pozitif fark etkisi ve anormal hidrojen evrimini sistematik olarak incelenmiştir (Pan vd., 2023). Mg elektrot, alkalin 0.1 M $(NH_4)_2SO_4$, 0.1 M NH_4HCO_3 ve 0.05 M $(NH_4)_2CO_3$ çözeltilerinde anormal hidrojen evrimi ile birlikte geleneksel negatif fark etkisi yerine pozitif bir fark etkisi sergilenmiştir.

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KOROZYONUNDA KIMYASAL AJANLARIN ETKISI

Magnezyum alaşımlarının sulu ortamlardaki yüksek korozyon hassasiyeti, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarında önemli bir sınırlama oluşturmaktadır. Korozyon inhibitörleri, çözeltiye doğrudan ekleme veya yüzey kaplamalarına entegre etme yoluyla magnezyum korozyonunu kontrol etmede ekonomik ve etkili bir strateji sunmaktadır. Son yıllarda, çevre dostu ve toksik olmayan "yeşil" inhibitörlerin geliştirilmesine yönelik artan ilgi, organik karboksilatlar, piridaz türevleri, doğal polimerler ve inorganik oksoanyon bazlı inhibitörler üzerine yoğunlaşmıştır.

Organik İnhibitörler

Karboksilat türevleri, magnezyum yüzeyinde şelat kompleksleri oluşturarak ve Fe(II/III) iyonlarıyla kompleksleşerek etkili korozyon inhibisyonu sağlamaktadırlar. Yasakau ve arkadaşları (Yasakau vd., 2021) 2,5-piridindikarboksilat (PDCA), salisilat ve fumarat inhibitörlerinin farklı Fe içerikli saf magnezyum üzerindeki etkilerini incelemiştir. PDCA'nın hem yüksek hem de düşük Fe içeriğine sahip magnezyumda etkili olduğu, salisilat'ın ise sadece yüksek Fe içerikli magnezyumda etkin korozyon inhibisyonu gösterdiği tespit edilmiştir. Bu fark, salisilat'ın Fe iyonlarıyla

kompleksleşerek demir partiküllerinin yeniden çökelmesini engellediği mekanizmalarıyla açıklanmaktadır.

Piridin Türevleri ve Aminosalisilat

2,5-piridindikarboksilat (PDC) ve 5-aminosalisilat (AS) inhibitörleri, katmanlı çift hidroksit (LDH) nanokapları ile birleştirildiğinde gelişmiş korozyon koruması sağlamaktadır. Zhao ve arkadaşları (Zhao vd., 2021) bu inhibitörlerin gözenekli PEO kaplamalarına vakum yöntemiyle emdirilmesi ve ardından seryum içeren çözeltide hızlı sızdırmazlık işlemiyle elde edilen kompozit kaplamaların üstün korozyon direnci gösterdiğini raporlamıştır. AS/Ce-HT kompozit kaplaması çalışmalarında en iyi korozyon koruması sergilemiştir. Potasyum permanganat'ın (KMnO4) korozyon inhibitörü olarak kullanımı, Akulich ve arkadaşlarının (Akulich vd., 2023) çalışmasında detaylı olarak incelenmiştir. 0.05 M NaCl çözeltisinde 0.150 mol/dm³ KMnO4 konsantrasyonunda, AZ31 magnezyum alaşımı yüzeyinde karışık değerlikli mangan oksitlerinden oluşan koruyucu bir film tabakası oluşmuştur. Bu film, hem anodik hem de katodik reaksiyonları baskılamış ve yüksek inhibitör konsantrasyonlarında etkili korozyon koruması sağlamıştır.

İnorganik Oksoaniyon İnhibitörleri

Vanadat iyonları, aktif metaller için geniş spektrumlu bir inhibitör olarak bilinmektedir. Petrova ve arkadaşları (Petrova vd., 2023) vanadat ve oksalat inhibitörlerinin LDH nanokaplara interkalasyonunu AZ91 magnezyum alaşımı yüzeyinde in-situ olarak gerçekleştirmiştir. Optimum değişim koşulları altında hazırlanan vanadat yüklü LDH katmanları, tuzlu sprey testlerinde gelişmiş korozyon koruması sunmuştur.

Molibdat İnhibitörleri

Molibdat iyonları, kromat bazlı kaplamalara çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Luo ve arkadaşları (Luo vd., 2023) AZ31B magnezyum alaşımı üzerinde zayıf asidik bir çözeltide molibden-mangan-vanadyum dönüşüm kaplaması (MMVCC) geliştirmiştir. Kaplama, MoO_2, MoO_3, MnO_2, VO_2, V_2O_5 ve $Mg(OH)_2$/MgO'dan oluşmakta olup, 15 dakikalık daldırma süresinde 273 nm'den 1068 nm'ye kadar kalınlık artışı göstererek optimum korozyon direnci sağlamıştır.

Sinerjistik İnhibitör Sistemleri

Farklı inhibitörlerin kombinasyonu, tek başlarına gösterdiklerinden daha üstün performans sağlayabilmektedir. Vanadat-fosfat kombinasyonu, sinerjistik etki göstererek korozyon hızını önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna karşılık, vanadat-florür çifti antagonistik etkileşim göstermekte ve korozyon hızında önemli bir azalma sağlamamaktadır. LDH nanokaplar içine korozyon inhibitörlerinin yüklenmesi, akıllı kendini onarabilen kaplama sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

YÜZEY İŞLEMLERİ VE KOROZYON DİRENCİ İYİLEŞTİRME

Katmanlı Çift Hidroksit (LDH) Filmleri

Katmanlı çift hidroksit (LDH) filmleri, benzersiz fiziksel bariyer fonksiyonu ve iyon değişim özellikleri nedeniyle magnezyum alaşımlarının korozyon koruması için geniş ilgi görmüştür. Li ve arkadaşlarının (Li vd., 2024) yapmış olduğu kapsamlı bir çalışmada, AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde magnezyum-alüminyum katmanlı çift hidroksit filminin adım adım in-situ hazırlanması sunulmuştur. Çalışma, hidrotermal yöntemle güçlü kimyasal bağlar kurabilen, yoğun film büyümesi sağlayan ve yeterli kalınlığa sahip LDH filmlerin oluşturulabileceğini göstermiştir

LDH Filmlerinin Özellikleri:
- Genel formül: $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_{x}(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n}\cdot mH_2O$
- Mg-Al LDH için: $[Mg_{1-x}Al_x(OH)_2]^{x+}(CO_3)_{x/2}\cdot mH_2O$
- Kalınlık: 5-20 μm
- Hazırlama: Hidrotermal yöntem (90-200°C, 2-24 saat)

Yapılan başka bir optimizasyon çalışmasında, en iyi korozyon direncinin T = 135°C, pH = 12.0 ve t = 15 saat parametrelerinde elde edildiği gösterilmiştir. Bu koşullarda elde edilen LDH filminin korozyon akım yoğunluğu (Icorr) 1.07×10^{-7} A/cm² olarak bulunmuş, bu değer substratınkinden yaklaşık 3 mertebe daha düşük çıkmıştır. (Wang vd., 2024).

Mikro-Ark Oksidasyon (MAO) Kaplamaları

Mikro-ark oksidasyon (MAO), magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılan bir yüzey işlemi tekniğidir. 2022 yılında Yao ve arkadaşları tarafından yayınlanan kapsamlı bir derlemede MAO işleminin magnezyum alaşımları üzerindeki etkilerini detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, MAO işleminin geleneksel anodik oksidasyon tekniklerinden geliştirildiğini ve mükemmel korozyon direnci, güçlü yapışma, maliyet etkinliği ve tatmin edici aşınma direnci gibi çok sayıda avantaj sunduğunu belirtmiştir. Alkalin elektrolit sistemleri (silikat, fosfat ve alüminat bazlı), çevresel etkisinin düşük olması ve hızlı film büyüme hızları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Yao vd., 2022).

MAO işleminde değişken parametreler kullanılarak 10-100 μm kalınlığında seramik kaplama filmleri oluşturulmaktadır. Oluşan kaplamaların faz kompozisyonu genellikle MgO, Mg_2SiO_4 ve $MgAl_2O_4$ gibi seramik fazları içermektedir. Bu kaplamalar 150-400 HV mikrosertlik değerlerine ulaşabilmekte ve substrata göre 10-50 kat korozyon direnci iyileştirmesi sağlamaktadır. Ancak MAO kaplamaları %5-15 arasında gözeneklilik içermekte olup, bu gözenekliliğin kapatılması için ek yüzey işlemleri gerekebilmektedir.

SONUÇ VE GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA YÖNLERİ

2020-2025 yılları arasında magnezyum alaşımlarının farklı çözeltilerdeki korozyon davranışı üzerine yapılan araştırmalarda, önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Temel bulgular:

Çözelti Kimyası Etkileri:
- Klorür konsantrasyonu korozyon hızının ana belirleyicisidir (3.5% NaCl: 0.27 mm/yıl, 5M NaCl: 9.7 mm/yıl).
- pH değişimi dramatik etkiye sahiptir (pH < 4: çok hızlı korozyon, pH > 8.5: inhibe edilmiş korozyon).
- Sülfat iyonları klorüre göre daha az agresiftir.
- Amonyum iyonları korozyonu 5-10 kat hızlandırabilmektedir.
- Dinamik deniz atmosferinde korozyon hızı statik testlere göre birkaç kat daha yüksektir.

Korozyon Mekanizmaları:
- Negatif fark etkisi (NDE) geniş pH aralığında gözlemlenmektedir.
- Alkalin amonyum çözeltilerinde pozitif fark etkisi tespit edilmiştir.
- Galvanik çiftlerde pH değişimi polariteyi değiştirebilmektedir.

Yüzey İşlemleri:

- LDH kaplamaları 3 mertebe korozyon akımı azalışı sağlamaktadır.
- MAO kaplamaları geniş pH aralığında etkilidir.
- COF bazlı akıllı kaplamalar pH 4-10 aralığında mükemmel performans göstermektedir.

Gelecekteki Araştırma İhtiyaçları:
1. Gerçek Ortam Testleri: Laboratuvar testlerinin gerçek endüstriyel uygulamaları daha iyi temsil etmesi
2. Uzun Vadeli Çalışmalar: 1-5 yıllık maruziyet testleri
3. Karmaşık Çözelti Sistemleri: Çoklu iyon etkileşimlerinin sistematik incelenmesi
4. Çevresel Faktörler: Sıcaklık, basınç, akış hızı etkilerinin detaylı incelenmesi
5. Yeni Kaplama Sistemleri: Çevre dostu, düşük maliyetli, kendini onarabilen kaplamalar
6. Hesaplamalı Modelleme: Çözelti kimyası-korozyon ilişkilerinin sayısal simülasyonu
7. Standart Test Protokolleri: Endüstri-spesifik korozyon test yöntemlerinin geliştirilmesi

REFERANSLAR

Akulich, V.V., Chernik, A.A., Paspelau, A.V., ve Lisenkov, A.D. (2023). Corrosion inhibition of magnesium alloy AZ31 in chloride-containing solutions by aqueous permanganate. Journal of Solid State Electrochemistry, 27(6), 1555-1569.

Kumar, S., Singh, R., ve Patel, M. (2024). Evaluation of corrosion performance of AZ31 Mg alloy in physiological and highly corrosive solutions. ACS Applied Bio Materials, 7(3), 1735-1747.

Kwon, D., Pham, H.V., Song, P., ve Moon, S. (2023). Corrosion behavior of the AZ31 Mg alloy in neutral aqueous solutions containing various anions. Metals, 13(5), 962.

Li, F., Zhang, Y., Liu, H., ve Chen, X. (2024). Step-by-step in-situ preparation of magnesium-aluminum layered double hydroxide film to improve the corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy. Surfaces and Interfaces, 45, 103855.

Li, H., Zhang, Y., Wang, C., Liu, B., Chen, D., ve Feng, Y. (2024). Dynamic marine atmospheric corrosion behavior of AZ91 Mg alloy sailing from Yellow Sea to Western Pacific Ocean. Materials, 17(10), 2358.

Li, Y., Shi, Z., Chen, X., ve Atrens, A. (2021). Anodic hydrogen evolution on Mg. Journal of Magnesium and Alloys, 9(6), 2049-2062.

Li, C., Zhao, Y., Liu, J., Xu, J., Guo, D., Zhang, H., Zhou, X., Yang, P., ve Zhang, S. (2023). Comparison of corrosion behavior of WE43 and AZ80 alloys in NaCl and Na_2SO_4 solutions. Crystals, 13(3), 123.

Lin, C.S., ve Fang, S.K. (2017). Formation of cerium conversion coatings on AZ31 magnesium alloys. Journal of Materials Processing Technology, 189(1-3), 157-163.

Liu, J., Song, Y., Shan, D., ve Han, E.H. (2022). The corrosion behavior of EW75 magnesium alloy in the research vessel KEXUE during the ocean voyage. npj Materials Degradation, 6(1), 23.

Liu, L., Dong, S., ve Wang, F. (2022). Fabrication of uniform and anti-corrosion layered double hydroxides film on Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy through solution pH tailoring. Electrochimica Acta, 411, 140057.

Liu, B.C., Zhang, S., Xiong, H.W., Dai, W.H., ve Ma, Y.L. (2023). Effect of Al content on the corrosion behavior of extruded dilute Mg-Al-Ca-Mn alloy. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 36(1), 77-90.

Luo, Y., Zhu, W., Su, Z., Li, W., Yi, A., Li, K., Chen, K., Song, J., Duan, Y., ve Li, Y. (2023). Formation and characterization analysis of a chromium-free conversion coating on Mg alloy prepared in a Mo-Mn-V based weak acid solution. Surface and Coatings Technology, 458, 129341.

Pan, H., Wang, L., Lin, Y., Ge, F., Zhao, K., Wang, X., ve Cui, Z. (2020). Mechanistic study of ammonium-induced corrosion of AZ31 magnesium alloy in sulfate solution. Journal of Materials Science and Technology, 54, 1-13.

Pan, Y., He, S., Wang, D., ve Huang, D. (2023). The positive difference effect and anomalous hydrogen evolution on the anodically polarized Mg surface in alkaline NH4+ containing solutions. Electrochimica Acta, 447, 142124.

Petrova, A., Lamaka, S.V., Mei, D., Ganiev, I., Zheludkevich, M.L., ve Ogurtsov, N.A. (2023). Corrosion inhibitors intercalated into layered double hydroxides

prepared in situ on AZ91 magnesium alloys: Structure and protection ability. ACS Applied Materials & Interfaces, 15(4), 6098-6112.
Song, G.L., ve Atrens, A. (2023). Recently deepened insights regarding Mg corrosion and advanced engineering applications of Mg alloys. Journal of Magnesium and Alloys, 11(11), 3948-3991.
Song, J., She, J., Chen, D., ve Pan, F. (2023). Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. Journal of Magnesium and Alloys, 11(1), 100-118.
Wang, Y., Li, X., Zhang, H., ve Chen, Q. (2024). Optimization of Mg-Al layered double hydroxide film preparation and corrosion resistance study on AZ91D Mg alloy by multivariate polynomial regression fitting. ACS Omega, 9(2), 2456-2467.
Wei, L., ve Gao, Z. (2023). Recent research advances on corrosion mechanism and protection, and novel coating materials of magnesium alloys: A review. RSC Advances, 13(12), 8427-8463.
Yao, W., Wu, L., Wang, J., Jiang, B., Zhang, D., Serdechnova, M., Shulha, T., Blawert, C., Zheludkevich, M.L., ve Pan, F. (2022). Micro-arc oxidation of magnesium alloys: A review. Journal of Materials Science and Technology, 118, 158-180.
Yasakau, K.A., Maltseva, A., Lamaka, S.V., Mei, D., Orvi, H., Volovitch, P., Ferreira, M.G.S., ve Zheludkevich, M.L. (2021). The effect of carboxylate compounds on Volta potential and corrosion inhibition of Mg containing different levels of iron. Corrosion Science, 194, 109926.
Zhang, C., Wu, L., Huang, G., ve Zhang, B. (2020). A cage-structured protecting coating prepared on pure magnesium by hydrothermal treatment with enhanced corrosion properties. Surfaces and Interfaces, 21, 100706.
Zhang, L., Chen, X., Liu, Y., ve Wang, H. (2024). Stainless magnesium alloy based on self-healing amorphous surface. Materials Today, 65, 112-125.
Zhang, M., Liu, J., Li, Y., ve Wang, F. (2021). Aluminum film deposited on magnesium alloy surface under different sputtering powers. Materials, 14(18), 5360.
Zhang, Y., Wang, P., Li, C., ve Chen, D. (2024). Variation of corrosion characteristics and tensile performances of WE43 alloy under marine atmospheric environment. Materials, 17(21), 5234.
Zhao, J., Xie, X., Zhang, C., Song, P., Lu, X., Huo, H., ve Li, W. (2021). Corrosion protection properties of different inhibitors containing PEO/LDHs composite coating on magnesium alloy AZ31. Scientific Reports, 11(1), 2236.,

Derin Denizel Kırıntılı Sedimanların Keşfi ve Tarihçesi

Onur ALKAÇ[1]

1- Arş. Gör. Dr; Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü. oalkac@firat.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3555-3927

ÖZET

Derin denizel kırıntılı sedimanlar, karasal kökenli kayaç parçalarının (konglomera, kum, silt ve kil) çeşitli fiziksel ve hidrodinamik taşıma mekanizmaları ve süreçleri aracılığıyla kıta sahanlığını aşarak derin okyanus havzalarında birikmesi sonucu oluşur. Bu sedimanların tanımlanması, dağılımı ve çökelme süreçlerinin anlaşılması, oşinografi ve sedimantoloji bilim dallarının gelişimiyle doğrudan ilişkilidir. Modern oşinografinin başlangıcı olarak kabul edilen 1872–1876 yılları arasında dört yıl boyunca bilimsel araştırma ve keşif yolculuğu gerçekleştirilen HMS Challenger Seferi, okyanus sıcaklıkları, deniz suyunun kimyasal özellikleri, okyanus akıntıları, biyolojik çeşitlilik ve deniz tabanı jeolojisi gibi çok sayıda parametreyi kapsayan ilk sistematik bilimsel keşif olmuştur. Bu sefer sayesinde derin deniz topoğrafyası ve bu ortamlarda çökelmiş kırıntılı sedimanların da var olduğu ortaya konmuş, deniz tabanında kırıntılı sedimanların bulunmadığına dair yaklaşık bir asırlık görüş geçerliliğini yitirmiştir.

Özellikle son elli yılda, derin denizel kırıntılı sedimanların çökelme mekanizmaları, fasiyes özellikleri, dağılımları ve okyanusların tektonik ve sedimantolojik evrimiyle olan ilişkileri konusunda önemli bilimsel ilerlemeler kaydedilmiştir. Geliştirilen modeller, deniz tabanı süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamıştır. Bu sedimanlara duyulan ilginin temel nedeni, hidrokarbon sistemleri açısından hem kaynak kaya hem de hazne kaya potansiyeline sahip olmalarıdır.

Bu çalışma, derin deniz sedimantolojisinin gelişime açık alanlarına dikkat çekerek denizel kırıntılı sedimanların keşfi ve kronolojik gelişim süreçlerine genel ve açıklayıcı bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Denizel sediman, tarihsel kronoloji, kırıntılı, türbidit,

GİRİŞ

Derin denizel kırıntılı sedimanlar, karalardan kopup taşınan kaya parçalarının (kum, silt, kil) kıta sahanlığı dışına geçerek derin okyanus ve deniz ortamlarında birikmesiyle oluşur. Bu sedimanların anlaşılması, oşinografinin ve sedimantolojinin gelişimiyle paralel ilerlemiştir. Derin deniz kırıntılı sedimanlarının çökelimine, sığ sulardan derin denizlere malzeme gelimi ve derin denizlerdeki sedimanların yeniden işlenmesine sebep olan süreçler mevcuttur. Bunlar: (1) Dev kaya düşmelerinden ve çökmelerinden kaynaklı yüksek yoğunluklu akışlardan düşük yoğunluklu bulantı akıntılarına kadar uzanan yeniden depolanma süreçleri; (2) Normal dip akıntıları ve (3) su kütlesinde gelişen pelajik çökelimlerdir.

19. yüzyıl öncesinde özellikle antik çağda denizel sedimanların okyanus ve deniz tabanlarında var olmadıkları düşüncesi hakimdi. 1800'lü yılların başında, denizel sedimanlarda yapılan ilksel çalışmalarla beraber ilk

olarak pelajik çökelimlerin varlığı kanıtlanmıştır. Gelişen teknoloji ve detaylı bilimsel kayıtların artmasıyla derin deniz sedimanlarda, pelajik killerle beraber, konglomera ve çok kaba taneden çok ince taneye kadar değişen kum boyutu kırıntılı sedimanların çökeldiği tespit edilmiştir.

Bu kitap bölümünün hazırlanmasındaki amaç, derin denizel kırıntılı sedimanların küresel literatür bilgileri ışığında keşfi ve kronolojik olarak tanımlanmasındaki gelişim süreçleri hakkında bilgi vermektir.

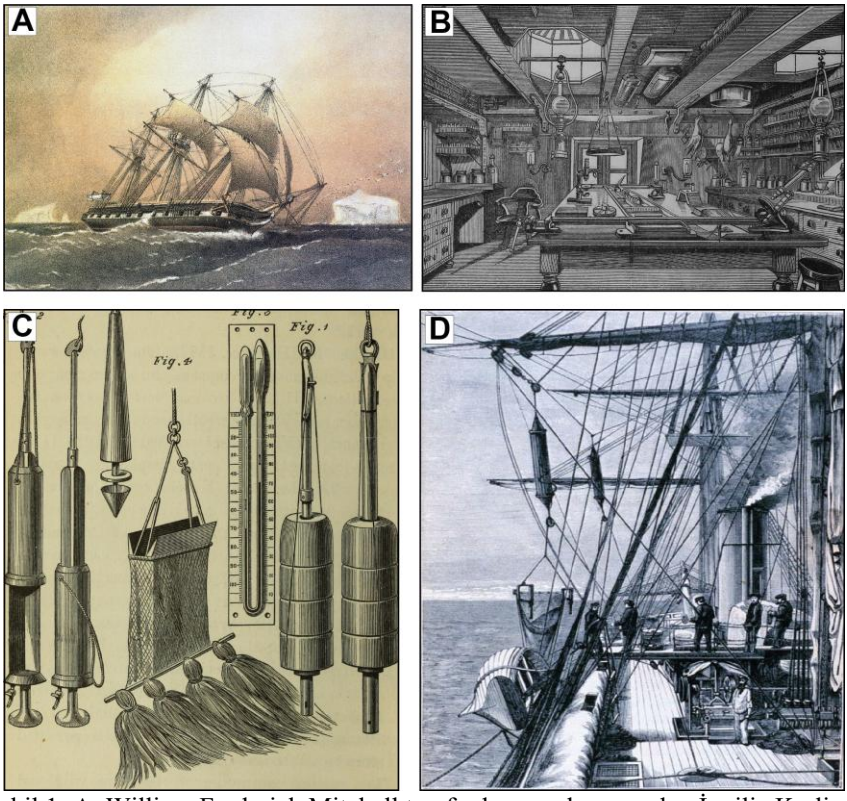
DENİZEL KIRINTILI SEDİMANLARIN KEŞFİ ve KRONOLOJİK GELİŞİM SÜREÇLERİ

Antik ve Orta Çağ'da sadece kıyı ve sığ denizler gözlemlendiğinden ve derin denizlere dair doğrudan gözlem imkânı olmadığından denizlerin derin kısımları çamur birikimi olmayan alanlar olarak düşünülüyordu ve hatta bu dönemde denizlerin derin kısımlarının "tortusuz" ve "ölü" alanlar olduğu düşüncesi hâkimdir. Ancak bu durum jeolojik gerçeklerden çok dönemin tarihsel ve felsefi bilgi çerçevesinin bir ürünüydü. Antik Yunan doğa felsefesinde, özellikle Aristotelesçi anlayışta, doğa durağan ve hiyerarşik bir sistem olarak ele alınmış, doğrudan gözlemlenemeyen derin denizler karanlık, hareketsiz ve değişimsiz boşluklar olarak betimlenmişti. Teknolojik olanaksızlıklar nedeniyle derin deniz tabanına ilişkin ampirik veri üretilememesi, bu metafizik algının yüzyıllar boyunca sorgulanmadan aktarılmasına yol açmış, böylece jeolojik zaman ölçeğinde son derece yavaş gerçekleşen denizel sedimantasyon süreçleri kavranamamıştır.

Modern oşinografi ve derin denizel sedimanların detaylı olarak ilk araştırılması "*HMS Challenger*" adlı İngiltere kraliyet gemisinin 1872 -1876 yılları arasında dört yıl süren çalışmalarla başlamıştır. Bu sefer, okyanus sıcaklıkları, deniz suyunun kimyası, akıntılar, deniz canlıları ve deniz tabanının jeolojisi dâhil olmak üzere çok çeşitli okyanus özellikleri hakkında veri toplamak amacıyla özel olarak düzenlenen ilk keşifti (Thomson ve Murray, 1895). Sefer için, İngiliz Donanmasına ait bir korvet (küçük bir savaş gemisi) olan HMS Challenger (Şekil 1a), üzerinde laboratuvarlar, mikroskoplar ve diğer bilimsel ekipmanların bulunduğu, okyanus araştırmalarına adanmış ilk gemiye dönüştürüldü (Şekil 1b). Sefer, İngiliz doğa bilimci John Murray ve İskoç doğa bilimci Charles Wyville Thompson tarafından yönetildi. Thompson daha önce Kuzey Atlantik ve Akdeniz'in derinliklerinden bazı tuhaf canlıları tarama yöntemiyle çıkarmıştı ve bu keşifler, İngiliz hükümetini okyanus derinliklerini keşfetmek için dünya çapında bir sefer düzenlemeye ikna etti. Challenger Seferi, 1872 yılının Noel'inden hemen önce İngiltere'nin Portsmouth kentinden yola çıkmıştır (Stow, 1985).

Gemide, okyanus tabanından kaya veya çamur almak için kullanılan pek çok farklı örnekleyici ve okyanusun farklı seviyelerindeki canlıları yakalamak için ağlar bulunuyordu (Şekil 1c). Challenger ayrıca, okyanusun

derinliğini ölçmek için kullanılan ve ölçüm halatlarını indirip kaldırmaya yarayan mekanik motorlar olan farklı vinçlere de sahipti (Şekil 1d). Her örnekleme istasyonunda mürettebat, yüzeyden deniz tabanına kadar farklı derinliklere troller, ağlar ve diğer örnekleyicileri indiriyor, ardından bunları canlılar veya kayalarla yüklü şekilde tekrar gemiye çekiyordu.



Şekil 1: A. William Frederick Mitchell tarafından yapılan ve aslen İngiliz Kraliyet Donanması için yayınlanan HMS Challenger gemisinin resmedilmiş tablosu (URL-1). B. Geminin bilimsel ekibinin laboratuvarı (URL-2). C. Geminin bilimsel keşif için kullanılan ve okyanusun derinliğini ölçmek ve örneklemek için kullanılan ekipmanları (URL-3). D. Gemi mürettebatının kullandığı vinç ve diğer ekipmanların temsili çizimi (Thomson, 1885).

Altı adet bilim insanı ve toplamda 243 kişilik keşif ekibinden oluşan HMS Challenger, önce İngiltere'den güneye doğru ilerleyerek Güney Atlantik'e, ardından Afrika'nın güney ucundaki Ümit Burnu'nu dolaşmıştır. Daha sonra Antarktika Dairesi'ni geçerek güney Hint Okyanusu'nun geniş ve çok dalgalı sularını aşmış ve Avustralya ile Yeni Zelanda'ya gitmiştir. Bunun ardından Challenger kuzeye doğru Hawaii Adaları'na yönelerek, sonra tekrar güneye inmiş ve Güney Amerika'nın güney ucundaki, Pasifik ve Atlantik okyanuslarının birleştiği Horn Burnu'na ulaşmıştır. Atlantik

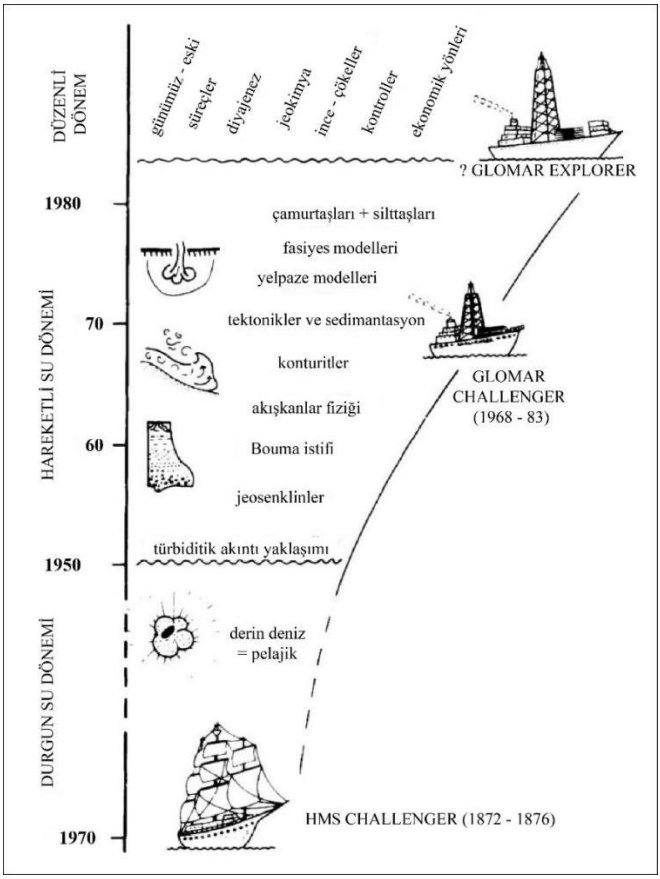
Okyanusu'ndaki ek keşiflerin ardından Challenger, Mayıs 1876'da İngiltere'ye geri dönmüştür (Thomson ve Murray, 1895).

Challenger Seferi'nin keşifleri arasında, batı Pasifik'te bulunan ve deniz tabanının 26.850 fitten (yaklaşık 8.200 metre), yani 4 milden daha derin olduğu "Mariana Çukuru" da yer almaktadır. Okyanusların en derin noktası olarak bilinen yer ise, günümüzde Challenger Çukuru (*Challenger Deep*) olarak da adlandırılmakta olup 37.800 fit (11.524 metre) derinliğindedir ve yine bu sefer sonrasında keşfedilmiştir. Seferde ayrıca, Atlas Okyanusu'nun ortasındaki ve günümüzde "Orta Atlantik Sırtı" olarak bilinen yükseltiyi de içeren, okyanus havzalarının şeklinin ilk genel taslağını ortaya koymuştur. Bilim insanları okyanuslardaki akıntıların ve sıcaklıkların ilk sistematik haritalarını bu seferle beraber hazırlamıştır ve Challenger Seferi'nin heyecan verici keşifleri, diğer ülkeleri de okyanuslara ilgi duymaya ve kendi keşif seferlerini düzenlemeye teşvik etmiştir (Forel, 1985).

Oşinografi çalışmalarının ve okyanus biliminin doğuşu olarak kabul edilen bu seferde okyanuslarda 127 bin km (yaklaşık 69 bin mil) yol kat edilmiş, 133 adet deniz tabanı ses taraması (*sounding*) yapılarak 492 derinlik ölçümü yapılmış ve toplamda 362 örnekleme istasyonundan 4700 bitki ve hayvan canlı türü keşfedilmiştir (Thomson ve Murray, 1895).

Araştırmanın sonuçları 1900 yılında "1872-1876 yılları arası HMS Challenger araştırma gemisinin bilimsel sonuçlarının raporu" adlı makale ve bildirgeyle bilim dünyasına sunulmuştur. Ünlü yerbilimcilerden ve gemideki bilim insanı mürettebatından olan Sir John Murray "Bu sefer 15. ve 16. yüzyıllarda yapılan önemli keşiflerden sonra dünyamız hakkında bilgi sahibi olmak açısından en büyük ilerlemeyi sağladı" ifadesiyle bu araştırmanın önemini vurgulamıştır. Yayınlanan raporda okyanusların bilimsel keşfinin yanı sıra okyanus tabanındaki sediman içeriklerinin fabrik özellikleri (doku, tane boyu vb.) ve okyanus tabanı morfolojisinin farklılıklar gösterdiğine dair bulguların ilk kez bu seferle ortaya çıkarıldığı vurgulanmıştır (Stow, 1985). Böylece bu dönemden itibaren okyanus tabanı çökelleri artık gizemli bir yer olmaktan çıkmış, yer bilimciler için önemli bir dönüm noktası haline gelecektir.

Derin deniz kırıntılı sedimanların tarihsel gelişim süreçleri 1870'lerin başından başlayarak günümüze kadar devam etmektedir (Şekil 2).



Şekil 2: Denizel sedimanlar üzerinde yapılan çalışmaların 1870'lerin başından günümüze kronolojik şeması (Stow, 1985).

HMS Challenger seferinin okyanuslara yönelik bilimsel keşiflerinden yaklaşık 15 yıl sonra yayımlanan ve uzun yıllar boyunca derin deniz sedimantolojisi alanında temel başvuru kaynağı niteliğini taşıyan Murray ve Renard (1891) 'ın "Derin Deniz Sedimanları" adlı çalışmasında, derin deniz ortamlarında varlığı belirlenen biyojenik organizmaların biyozonları sınıflandırılmış ve bu sınıflandırma aracılığıyla derin deniz çökellerinin birikim süreçlerine ilk kez sistematik bir yaklaşım getirilmiştir**.**

Derin deniz sediman çökellerine ait ilk örnekler 20. Yüzyılın ilk yarısında Avrupa ve Amerika okyanuslarında belirlenmiş kesitlerden toplanmıştır (Böggıld, 1916; Andrêe, 1920; Shepard, 1932, 1948; Stocks, 1933; Brumlette ve Bradley, 1940; Arrhenius, 1950). Toplanan örneklerden yapılan analizler, sedimanların karasal ortamlardan, şelf, yamaç ve derin denizlere doğru devam eden bir çökelme süreçleriyle depolandığı ortaya çıkarmıştır. Okyanus tabanından alınan karot örnekleri sayesinde pelajik sedimanlar, hemipelajik sedimanlar, kırıntılı derin deniz çamurları ayırt edilmeye başlanmıştır.. Sedimanların tane boyu, mineralojisi ve çökelme

hızları incelenmiş ancak, taşınma mekanizmaları henüz tam olarak açıklanamamıştır.

Grover ve Howard (1938) derin denizel sedimanların tek bir düzende ve tek bir ortamsal süreçte çökelmediğini ve buna bağlı olarak da okyanus tabanlarının küresel boyutta tüm okyanuslarda düzenli bir morfolojiye sahip olmadığına dair ilk tanımlamaları yapmıştır. Araştırmacılar göl tabanlarındaki yüksek yoğunluklu dip akıntılarına benzer dip akıntılarının okyanus tabanındaki çökelme periyotları boyunca da geliştiğini saptamıştır. Bu dip akıntılarının şelf ortamından başlayarak depremler, aşırı sediman yükü, fırtına dalgaları gibi çeşitli fiziksel etkenlerle yamaç ortamlarına ve oradan da aşağıya doğru kanallar kazarak deniz altı kanyonları oluşturduğunu belirlemişlerdir (Stow, 1985).

Johnson (1938), yüksek yoğunlukla başlayıp düşük yoğunlukla devam eden dip akıntılarına literatürde ilk defa "*turbidity current*" yani "türbidit akış" terimini ortaya koymuştur. Bu tanımlamanın ardından Kuenen (1932, 1950) özellikle yüksek yoğunluklu türbidit akıntıları için laboratuvar ortamında bir takım cam deney setleri tasarlamış ve deneylerin sonucunda elde edilen bulgular Kuenen ve Migliorini (1950) tarafından "Dereceli tabakalanmanın bir nedeni olarak türbidit akıntılar" adlı bir makalede tartışılmıştır. Denizel kırıntılı sedimanların çökelim süreçleri için atılmış bu büyük adım, türbidit akıntılara en iyi yaklaşım olarak nitelendirilmiştir (Kuhn, 1970; Walker, 1973). Türbidit akıntılarının okyanuslardaki keşfiyle denizaltı kanyonlarının kırıntılı sedimanları kıta kenarlarından derin denizlere taşıdığı saptanmıştır. Devam eden süreçte Bouma (1962) türbidit akıntılarının sebep olduğu istiflenmelerin benzer tekrarlanmalarla çökeldiğini tespit etmiş ve benzer istif dizilimine "Bouma Dizisi" veya "Bouma İstifi" adını vermiştir ve bu istif aynı zamanda derin denizel türbiditlerin tipik tabakalanma yapısı olarak tanımlanmıştır. Bu istiflenmenin keşfi ile denizel kırıntılı sedimanların hızlı, ani ve enerjik olaylarla çökelebildiği kabul edilmiştir.

1960'lardan itibaren levha tektoniği kuramının keşfedilmesi ile derin denizel sedimanların oluşum ortamları arasında bütüncül yaklaşımlar yoğunlaşmıştır. Levha tektoniği ile birlikte kıta kenarları, derin deniz yelpazeleri, okyanus hendekleri ile kırıntılı sediman ilişkileri kurulmaya başlanmıştır. Abyssal düzlükler, ince taneli kırıntılı sedimanların birikim alanları olarak tanımlanmış ve sediman dağılımının tektonik ortamlarla doğrudan ilişkili olduğu modeller öne sürülmüştür. Böylelikle bu yaklaşımla beraber günümüz oşinografik ve sedimantolojik çalışmalara daha iyi noktalara gelmesini teşvik etmektedir.

1970'lerden itibaren ise denizel kırıntılı sedimanların keşfi, çökelme süreçleri ve çökelme ortamlarının tanımlanmasına dair bulgular netleştirilmiş olup artık bu sedimanların fasiyes analizlerine bağlı ortamsal yorumlama modellerinin oluşturulmasına ilişkin çalışmalara ağırlık verilmiştir. Normark (1970) deniz altı yelpazelerinin çökelme karakterizasyonunu

tanımlayan ilk araştırmacıdır. Sonrasında Mutti ve Ricci Luchi (1975) bu yelpazelerin istiflerini ilk defa fasiyes bazında modellemiş ve tanımlamıştır. Walker (1975) derin denizel kaba taneli kırıntıların varlığını saptamış, okyanus tabanlarındaki konglomera-kumtaşı ilişkisini ilk defa modellemiştir. Sonraki dönemlerde ise türbiditlerin çökelme karakterine ilişkin fasiyes sınıflamalarına ilişkin çalışmalar (Lowe, 1982; Stow, 1985; Pickering vd., 1986 vb.) yoğunlaşmıştır. Güncel döneme yakın ise Mulder ve Alexander (2001) sediman yoğunluk akış terimini tanımlamış ve türbidit akıntılar ifadesini geliştirerek yeni çökel fasiyes modelleri saptamışlardır.

Derin Denizel kırıntılı sedimanların dönüm noktalarının ilksel tanımlamalarına ilişkin anahtar çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Derin denizel kırıntılı sedimanlarına ait anahtar çalışmaların kronolojik sınıflandırılması.

Araştırmacılar	**Araştırma Konusu**
Ericson vd., (1951)	Dereceli kumtaşlarına ait ilk çalışma
Heezen ve Ewing, (1952)	Büyük türbiditik akıntıların doğası ve oluşumu
Pettijohn, (1957)	Eski istiflerden oluşan havza dolgularının modelini ortaya çıkarmak için paleo-türbiditik akıntı ölçümleri
Kay, (1951) ve Drake vd., (1959)	Jeosenklinal çökellerinin yorumlanması
1960'larda, jeolojide bir bütün olarak, plaka tektoniği teorisinin ortaya çıkarılmasıyla derin deniz sedimantasyon modelinin tektonikle ilişkilendirilmesi (Mitchell ve Reading, 1969)	
Bouma, (1962)	Türbidit yapılarının klasik istifinin tanımlanması (Bouma istifi)
Harms ve Fahneshock, (1965)	Teorik çalışma ve deneylerle türbiditik akıntı akışının fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması
Middleton(1966; 1967), Komar, (1969;1970), Heezen vd., (1966), Hollister ve Heezen, (1972), yapmış oldukları çalışmalarda derin deniz akıntılarının fiziksel özelliklerini türbiditik akıntılara önemli bir alternatif olarak öne sürmüşlerdir.	
Normark, (1970)	Denizaltı yelpazelerinin günümüz okyanuslarındaki karakterizasyonu
Mutti ve Ricci Lucchi, (1972)	Denizaltı yelpazelerine ait istiflerin ilk defa fasiyes bazında tanımlanması
Walker, (1975)	Kaba taneli türbiditlere ait ilk çalışma. Türbidit kumtaşlarının yanı sıra kaotik çökellerden oluşan türbiditlere ait konglomeraların tanımlanması.

Tablo 1: Devamı.

Araştırmacılar	Araştırma Konusu
Piper, (1978), Stow ve Shanmugam, (1980), Stow vd., (1984)	Çamurtaşı ve silttaşı içeren türbiditlerin karakteristik özelliklerinin ilk defa ortaya konulması
Stow, (1985)	Kırıntılı türbidit çökellerine ait detaylı ilk fasiyes sınıflandırmaları
Pickering vd., (1986)	Kırıntılı türbidit çökellerine ait detaylı fasiyes ve alt fasiyes sınıflandırmaları
Mulder ve Alexander (2001)	Kırıntılı türbidit istiflerinin sediman yoğunluk akış karakterine bağlı olarak sınıflandırılması

SONUÇ

Bu çalışmada, derin denizel kırıntılı sedimanların keşfi ve bilimsel olarak tanımlanmasına ilişkin tarihsel gelişim süreci literatür verileri ışığında değerlendirilmiştir. Derin deniz ortamlarının uzun süre tortusuz ve durağan alanlar olarak kabul edilmesi, gözlemsel ve teknolojik sınırlılıkların bilimsel algıyı şekillendirdiğini göstermektedir.

HMS Challenger Seferi, derin deniz sedimantolojisinin ve modern oşinografinin temellerini atmış; derin deniz tabanında kırıntılı sedimanların varlığını ortaya koyarak önceki kabulleri geçersiz kılmıştır. İzleyen çalışmalarla birlikte, karasal kökenli sedimanların şelften derin deniz havzalarına taşındığı ve bu süreçlerin başlıca olarak türbidit ve sediman yoğunluk akışlarıyla gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Levha tektoniği kuramının gelişmesi ve fasiyes temelli yaklaşımların benimsenmesi, derin denizel kırıntılı sedimanların çökelme ortamları ile tektonik yapıların bütüncül biçimde yorumlanmasına olanak sağlamıştır. Günümüzde bu sedimanlar, yalnızca sedimantolojik süreçlerin anlaşılması açısından değil, aynı zamanda hidrokarbon sistemleri bakımından da önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, derin denizel kırıntılı sedimanlara ilişkin bilgi birikimi, betimleyici gözlemlerden süreç ve model temelli yaklaşımlara evrilmiş; bu gelişim, modern deniz jeolojisi ve sedimantoloji çalışmalarına güçlü bir kuramsal temel oluşturmuştur.

REFERANSLAR

Andrêe, K. (1920). *Geologie des Meeresbodens*, 2. Borntraeger, Leipzig, 689s.

Arrhenius, G. (1950). Carbon and Nitrogen in Subaquatic Sediments, Geochimica Et Cosmochimica Acta. 1, 15-21.

Boggild, O.B. (1916). Meeresgrundproben der Sigboga Expedition, Sigboda-Expedite Monogr., 65, 1-50.

Bouma, A. (1962). Sedimentology of Some Flysch Deposits: a Graphical Approach to Facies Interpretation. Amsterdam, Elsevier, 168s.

Brumlette, M. M, Bradley, W. H. (1940). Geology and Biology of North Atlantic Deep-sea Cores between Newfoundland and Ireland. Pt. 1. Lithology and geologic intarptetations, U.S. Geol. Surv., l-34.

Drake, C.L., Gaibar-Puertas, C., Nafe, S.J. and Langseth, M. (1959). Prospeccion sismica submarina en el Golfe de Cadiz. Rev. Cienc. ApL, 71, 492-511.

Ericson, D.B., Ewing, M. and Heezen, B.C. (1951). Deep sea sands and submarine canyons. Bull. Geol. Soc. Am., 62, 961–965.

Forel, F. A. (1885). Les Revins Souslacustre des Fleuves Glaciers, *C.r. hebd, SêANC Acad. Sci., Paris*, 101, 725-728.

Grover, N.C., Howard, C.S. (1938). The Passage of Turbid Water through Lake Mend, Arn. Soc. Civil Engineers Traus, 103, 720-790.

J. C. Harms, Fahnestock, R. K. (1965). Stratification, Bed Forms, and Flow Phenomena (With an Example From the Rio Grande). Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation, Gerard V. Middleton, 12.

Heezen, B.C., Ewing, M. (1952). Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake. Am. J. Sci., 250, 849–873.

Heezen, B.C., Hollister, C.D. and Ruddiman, W.F. (1966). Shaping of the continental rise by deep geostrophic currents. Science, 152, 502–508.

Hollister CD and Heezen BC (1972) Geological effects of ocean bottom currents: Western North Atlantic. In: Gordon AL (ed.) Studies in physical oceanography, Vol. 2, pp. 37-66. New York: Gordon and Breach.

Johnson, D. (1938). The origin of submarine canyons, J. Geomorph. 1, 230-43.

Kay, M. (1951). North American Geosynclines. Geological Society of America Memoir, 48. Newyork.

Komar, P. D. (1969). The channelized flow of turbidity currents with application to Monterey Deep-Sea Fan Channel, J. Geophys. Res., 74(18), 4544–4558,

Komar, P. D. (1970). The Competence of Turbidity Current Flow. GSA Bulletin. 81 (5), 1555–1562.

Kuenen, Ph. H . (1932). Remarks on the Undationtheory of Van Bemm Elen. Proe. Kon, Ac. v. Wet. Amsterdam. 35, 1-9.

Kuenen, Ph. H . (1950). Marine Geology, John Wiley & Sons, 568s.

Kuenen, Ph.H., Migliorini, C.I. (1950) Turbidity currents as a cause of graded bedding. J. Geol., 58, 91–127.

Kuhn, T.S. (1970). The Structure of Scientific Revolutions (second edition)", Chicago University of Chicago press, 210s.

Lowe, D. (1982). Sediment Gravity Flows: II. Depositional Models with Special Reference to the Deposits of High-Density Turbidity Currents, Journal of Sedimentary Petrology, 52, 279-297.

Middleton, G.V. (1966) Experiments on density and turbidity currents. II. Uniform flow of density currents. Can. J. Earth Sci., 3, 627–637.
Middleton, G.V. (1967) Experiments on density and turbidity currents. III. Deposition of sediments. Can. J. Earth Sci., 4, 475–505
Mitchell, A.H. and Reading, H.G. (1969). Continental margins, geosynclines, and ocean floor spreading. J. Geol., 77, 629–646.
Mulder, T., Alexander, J. (2001). The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. Sedimentology, 48 (2), 269-299.
Murray, J.; Renard, A.F. (1891). *Report on Deep-Sea Deposits Based on the Specimens Collected during the Voyage of HMS Challenger in the Years 1872 to 1876*, Report on the Scientific Results of the Voyage of HMS Challenger during the Years 1873-76, Part 3, Deep-Sea Deposits, HMSO, London.
Mutti, E., Ricci Lucchi, F. (1972). Turbidites of the Northern Apennines: Introduction to Facies Analysis, (English translation by T. H. Nilson, 1978). International Geological Review, 125- 166.
Mutti, E., Ricci Lucchi, F. (1975). Turbidite Facies and Facies Associations. In: Mutti, E., and others. Examples of Turbidite Facies and Facies Associations from Selected Formations of Northern Apennines, International Association of Sedimentologists, IX International Congress, Nice, Excursion Guidebook, A-11, 21–36.
Normark, W., R. (1970). Growth Patterns of Deep-Sea Fans, American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 54, 2170-2195.
Pettijohn, F.J. (1957) Sedimentary Rocks. 2nd Edition, Harper, New York.
Pickering, K. T., Stow, D. A. V., Watson, M., Hiscott, R. N. (1986). Deepwater Facies, Processes and Models: A Review and Classification Scheme for Modern and Ancient Sediments, Earth Science Review, 22, 75-175.
Piper, D. J. W. (1978). Turbidite Muds and Silts on Deep Sea Fans and Abyssal Plains, In Stanley, D. J. and Kelling, G. (eds.), Sedimentation in submarine canyons, fans and trenches. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson & Ross, 163-176
Shepard, F.P. (1932). Sediments of the Continental Shelves, Bulletin of the Geological Society of America, 43, 1017-1040.
Shepard, F.P. (1948). Submarine Geology, first edition. Hart Publishing Company, Inc., New York City, Harper's Geosciences Series, 557s.
Stocks, T. (1933). Die Echo Profile Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen" Expedition auf den Meteor, O 1925-1927.
Stow, D. A. V. (1985). Deep-Sea Clastics: Where are We and Where are We Going? *, In Brenchley, P. J. and Williams, B. P. J. (eds.), Sedimentology: Recent developments and applied aspects. Bath, Special Publication of the Geological Society, London*, 67-93.
Stow, D. A. V., Shanmugam, G. (1980). Sequence of Structures in Fine-Grained Turbidites; Comparison of Recent Deep-Sea and Ancient Flysch Sediment, Sedimentary Geology, 25, 23-42.
Stow, D. A. V., Howell, D.G. ve Nelson, C.G. (1984). Sedimentary Tectonic and Sea-Level Controls on Submarine Fan and Slope-Apron Turbidite System, Geo-marine Letters, 3, 57-64.

Thomson, C. W. (1885). The dredging and sounding arrangements on board the Challenger (Fig. 17) [Illustration]. In Narrative of the Cruise of H.M.S. Challenger (Vol. I). Longmans.

Thomson, C. W., Murray, J. (1895). Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. Challenger during the Years 1873-76. Her Majesty's Stationery Office.

Walker, R.G. (1973). Mopping up the Turbidite Mess, In: R. Ginsburg (Editor), Evolving Concepts in Sedimentology. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md., 1--37.

Walker, G.P.L (1975). Intrusive Sheet Swarms and the Identity of Crustal Layer 3 in Iceland., J. Geol. Soc. London, c131, 143–161.

URL-1: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HMS_challenger_William_Frederick_Mitchell.jpg

URL-2: https://divediscover.whoi.edu/history-of-oceanography/the-challenger-expedition/

URL-3: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:HMS_Challenger_(ship,_1858)

Kaya Kartalı Optimizasyonu Tabanlı 2B Gravite Ters Çözümü ile Temel Kaya Topografyası Kestirimi[a]

Rezzan PEKCAN EKİNCİ[1]

Çağlayan BALKAYA[2]

a Bu kitap bölümü, Rezzan PEKCAN EKİNCİ tarafından Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Çağlayan BALKAYA danışmanlığında yürütülen doktora tez çalışmasının bir kısmını içermektedir.

1- Öğrt. Gör.; Muş Alparslan Üniversitesi, Bulanık Meslek Yüksekokulu, Acil Durum ve Afet Yönetimi Programı. r.ekinci@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5367-8857

2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. caglayanbalkaya@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0191-8564

ÖZET

Sedimanter dolgu kalınlığının güvenilir biçimde belirlenmesi, havza evriminin ve tektonik gelişimin anlaşılması açısından temel bir gerekliliktir. Sedimanter dolgu kalınlığı ve geometrisi hidrokarbon, yeraltı suyu ve jeotermal potansiyelin değerlendirilmesinde, havza içi yapısal unsurların yorumlanmasında ve mühendislik jeolojisi uygulamalarında doğrudan bilgi sağlar. Gravite yöntemi, sedimanter dolgu ile daha yoğun temel kaya arasındaki yoğunluk zıtlığına duyarlı olması nedeniyle arayüzey geometrisinin kestiriminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gravite verilerinin ters çözümü, gözlenen/ölçülen anomaliyi açıklayan bir temel kaya topografyası/arayüzey modelini elde etmeyi amaçlayan doğrusal olmayan bir optimizasyon problemidir. Bu yaklaşımda, düz çözüm ile hesaplanan gravite tepkisi ile ölçülen veri arasındaki uyumsuzluk minimize edilerek sedimanter dolgu kalınlığı ve dolayısıyla arayüzey şekli 2B olarak modellenebilmektedir. Son yıllarda global optimizasyon tabanlı sezgisel algoritmalardaki önemli gelişmeler, jeofizik ters çözüm problemlerinde lokal minimumlara takılma riskini azaltarak daha kararlı çözümler üretmeyi mümkün kılmıştır. Klasik lokal arama yaklaşımları çoğu zaman başlangıç modeline duyarlı olup, çoklu minimum içeren doğrusal olmayan amaç fonksiyonlarında farklı başlangıçlarda farklı çözümlere yakınsayabilir. Buna karşılık global optimizasyon yöntemleri, arama uzayını daha geniş ölçekte tarayarak keşif-sömürü dengesini kurar ve böylece hem başlangıç koşullarına bağımlılığı azaltır hem de karmaşık model uzaylarında daha olası global çözümlere ulaşma şansını artırır. Ayrıca, türev bilgisinin gerekmediği ve kısıtların kolayca tanımlanabildiği yapıları sayesinde, gürültü ve model belirsizliğinin belirgin olduğu gravite ters çözüm problemlerinde pratik bir avantaj sunar. Bu çalışmada, kaya kartalı optimizasyonu algoritması sedimanter dolgu ile temel kaya arayüzeyinin 2B gravite ters çözümü problemine uyarlanmıştır. Geliştirilen algoritmanın başarısı, bilinen arayüzey geometrilerine ait sentetik gravite verileri üzerinden gürültüsüz ve gürültü eklenmiş senaryolarla sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kaya kartalı optimizasyonu tabanlı ters çözümün sentetik verilerde sedimanter dolgu ile temel kaya arayüzeyini yüksek doğrulukla belirleyebildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Temel kaya topografyası, Sedimanter havza, Gravite, Ters çözüm, Global optimizasyon, Kaya kartalı optimizasyonu

GİRİŞ

Sedimanter havzalar, uzun süreli çökme süreçlerinin çevredeki bölgesel yükselimlere göre daha düşük kotlarda çöküntü alanları oluşturduğu ve bu alanlarda sedimanter birikimlerin depolanmasına elverişli koşulların geliştiği

başlıca kıtasal ortamlardır (Onajite, 2014; Weismann vd., 2015). Sedimanter havzalar farklı tektonik süreçlerin yönlendirdiği çökme ve çökelme mekanizmalarıyla evrilmektedir. Gerilme rejimlerinde kabuğun gerilerek incelmesi grabenlerin oluşmasına yol açar ve bu çöküntüler hızla kırıntılı malzeme ile dolar. Buna karşılık, gelişen orojenlerin kenarında eğilme yüklemesi geniş ölçekli bölgesel bükülme oluşturarak havza gelişimini tetiklenmektedir (Allen ve Allen, 2005). Termal çökme ise litosferin soğuması ve izostatik dengelenme sonucu ortaya çıkar, bu süreç zamanla yerleşme/çökelme alanını artırır ve jeolojik zaman boyunca sedimanter dolgunun kademeli olarak kalınlaşmasına olanak verir (Allen ve Allen, 2005). Havza dolgularının bileşimi, paleocoğrafya ve paleoekoloji açısından önemli ipuçları taşımaktadır. Akarsu, göl, delta ve sığ denizel çökelme sistemleri, tane boyu ve mineralojisi farklı sedimanları havzaya taşır. Bunun sonucu olarak, paleocoğrafik evrimi ve iklimsel değişimleri arşivleyen karmaşık, çok katmanlı bir stratigrafi gelişmektedir (Catuneanu, 2006). Bu istiflerin daha sonraki deformasyonu (ör. faylanma, kıvrımlanma veya kompaksiyon) ise tektonik atımları ve yapısal olgunlaşmayı korumaktadır (Allen ve Allen, 2005). Global deniz seviyesi dalgalanmaları sedimantasyon örüntülerini belirgin biçimde kontrol eder. Deniz ilerlemeleri kıta sahanlıklarını silisiklastik ve karbonat çökellerle kaplarken, deniz çekilmeleri karasal kökenli malzeme girişini yoğunlaştırır (Catuneanu, 2006). Kıtasal rift havzaları, pasif kıta kenarları ve kıta içi havzalar gibi farklı havza tipleri, kendilerine özgü dolgu yapıları sergilemektedir. Rift havzalarında çoğunlukla hızlı ve asimetrik bir çökelme görülürken, pasif kıta kenarlarında ise geniş alanlara yayılan ve düşük eğimli klastik kamalar gelişmektedir. Bu jeolojik mimari farklılıklar, çökme hızı, sediman beslenimi ve havza geometrisinin etkisini iyi bir şekilde yansıtmaktadır (Catuneanu, 2006). Sedimanter dolgular aynı zamanda önemli yeraltısuyu rezervuarlarını oluşturur (Hunt vd., 2022). Gözenekli ve çatlaklı sedimanter birimler, özellikle yüzey sularının sınırlı olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde içme suyu ve sulama amaçlı kaynak sağlayan başlıca akifer sistemlerini temsil eder. Akifer verimi ve su kalitesi, havza dolgusunun çökelme koşulları ve diyajenez özellikleri tarafından belirlenmektedir (Todd ve Mays, 2004).

Sedimanter istiflerin jeotermal enerji potansiyeli de giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Kalın ve yüksek ısı akısına sahip havzalar, bölgesel ısıtma ve elektrik üretimi için sıcak su veya buhar sağlayabilir. Rezervuar performansı ise dolgunun gözeneklilik, geçirgenlik ve ısıl iletkenlik özelliklerine bağlıdır (Wu vd., 2025). Sismik açıdan hareketli bölgelerde ise havza geometrisi ve dolgu özellikleri, yer hareketinin karakterini güçlü biçimde etkilemektedir. Bir sedimanter havzanın doğal rezonans frekansı sediman kalınlığına ve kayma dalgası hızına bağlıdır ve bu durum sismik dalgaların belirgin ölçüde büyütülmesine ve üstteki yapı stoklarında hasarın artmasına neden olabilir (Borcherdt, 1970). Havza geometrisi ve iç mimarisindeki değişimler, sismik dalga büyütmesini ve iletimini önemli

ölçüde değiştirebilir ve bu da yer sarsıntısı şiddetinde farklılıklara ve özgün yayılım örüntülerine yol açar (Ghose vd., 2023). Ayrıca suya doygun, düşük yoğunluklu sediman birimler güçlü yer hareketleri sırasında sıvılaşma olasılığını arttırmaktadır. Bu durum sismik tasarım ve risk azaltma açısından kritik bir öneme sahiptir (Seed ve Idriss, 1982). Sismik yöntem çalışmalarının mikrogravite ölçümleriyle birlikte değerlendirilmesi, sedimanter dolgu altındaki havza mimarisi ve fay ağlarının daha iyi tanımlanmasına olanak sağlamaktadır (Pamuk vd., 2017; Büyüksaraç vd., 2023; Bektaş vd., 2025). Bu bütünleşik yaklaşım, yer hareketi modellemelerinin doğruluğunu artırır ve dolayısıyla tektonik olarak etkin havzalarda daha etkili afet-risk-azaltma stratejilerine temel oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, sedimanter dolgu-temel kaya arayüzeyinin 2B gravite ters çözümü için kaya kartalı optimizasyon (KKO) algoritması uygulanmıştır. Yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla, bilinen arayüzey geometrisine sahip bir yeraltı modeli üzerinden sentetik gravite verileri üretilmiş ve hem gürültüsüz hem de gürültü eklenmiş senaryolar altında ters çözüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalar, temel kaya derinliğinin global optimizasyon yaklaşımlarıyla güvenilir biçimde kestirilebildiğini göstermektedir (Pallero vd., 2015, 2017; Roy vd., 2021; Ekinci vd., 2021, 2023). Algoritma, gözlenen ve hesaplanan gravite anomalileri arasındaki uyumsuzluğu minimize edecek şekilde arama uzayını global ölçekte tarayarak, arayüzey geometrisi parametrelerinin optimum kombinasyonunu belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar, KKO algoritmasının gürültüsüz verilerde arayüzeyi yüksek doğrulukla belirleyebildiğini, gürültülü verilerde ise çözüm kararlılığını koruyarak arayüzey geometrisinin genel biçimini ve dolgu kalınlığındaki temel değişimleri güvenilir biçimde kestirebildiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yönteminin doğrusal olmayan ve çok modlu amaç fonksiyonlarına sahip gravite ters çözüm problemlerinde etkin bir global optimizasyon alternatifi sunduğunu göstermektedir.

METODOLOJİ

KKO Algoritması

Kuzey Yarımküre'de Altın Kartal veya ülkemizdeki adıyla Kaya Kartalı cinsi en bilinen yırtıcı kuşlardan birisidir. Bu cins, Aquila tür grubunun en yaygın temsilcisidir. Kaya kartalı, güçlü bacakları ve keskin pençeleri ile tavşan, sincap ve benzeri yer memelilerini avlamaktadır (Steenhof vd., 1997). Bu kartal türü 200 km²'ye ulaşabilen geniş alanları sahiplenebilmekte ve dağlık yüksek kesimlerde büyük yuvalarda yaşamaktadır (Abualigah vd., 2021). Bu kartal türünün yetişkin geyikleri dahi avlayabildikleri kayıt altına alınmıştır (Hatch, 1968). Bu türün dört farklı avlanma stratejisi tanımlanmıştır (Abualigah vd., 2021). İlk stratejide dikey eğimli yüksekten süzülme davranışı görülmektedir. Bu davranış, kartalın yer yüzünden oldukça yükseklerde uçan

kuşları hedef almak için kullandığı bir avlanma biçimidir. Av belirlendiğinde kartal, uzun ve düşük açılı bir süzülüşe geçmekte ve kanatlarını kısmen kapatarak hızını kademeli olarak arttırmaktadır. Saldırı anına yaklaşırken kanatlar ve kuyruk yeniden açılmakta, ayaklar öne doğru uzatılmaktadır (Carnie, 1954).

İkinci avlanma yöntemi olan kısa süzülme saldırısı ve kontur uçuşu, kaya kartalı tarafından en çok kullanılan strateji olarak kabul edilir (Meinertzhagen, 1940). Bu teknikte kuş, yer yüzüne oldukça yakın bir irtifada uçarak çevre konturlarını izlemekte ve avını ister koşan ister uçan bir hayvan olsun yakından takip etmektedir. Bu yöntem özellikle yer sincapları, üreme dönemindeki orman tavuğu türleri ve deniz kuşları gibi kara ve su kuşlarını avlamak için oldukça etkilidir (Meinertzhagen, 1940).

Üçüncü avlanma stratejisi, yavaş alçalışlı saldırı ile düşük irtifa uçuşu tekniğidir. Bu yöntemde kartal, yere yakın bir seviyeye alçalarak avına kademeli bir yaklaşım gerçekleştirmektedir. Hedefini seçtikten sonra boyun veya sırt bölgesine konar ve pençeleriyle derinlemesine kavrayarak etkisiz hâle getirmeye çalışır. Bu strateji, yılan, kirpi, tilki ve kaplumbağa gibi nispeten daha yavaş hareket eden ya da belirgin bir kaçış tepkisi göstermeyen avlar üzerinde özellikle etkilidir (Dekker, 1985). Dördüncü avlanma stratejisi ise, yürüyerek av yakalama yöntemidir. Bu teknikte kartal, karada yürüyerek avına yaklaşmakta ve onu doğrudan yakalamaya çalışmaktadır. Yöntem, özellikle geyik veya koyun gibi büyük memelilerin yavrularını saklandıkları yerlerden çıkarmak ve etkisiz hâle getirmek için tercih edilmektedir (Watson, 2010).

KKO algoritmasının temel ilham kaynağı, yukarıda açıklanan avlanma stratejilerinden elde edilmiştir (Abualigah vd., 2021). Özetle, KKO algoritmasında optimizasyon süreci, popülasyon olarak adlandırılan rastgele oluşturulmuş ve önceden tanımlanmış bir aday çözümler kümesinin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Yinelemeler boyunca KKO'nun arama stratejileri, neredeyse optimal çözümün ya da o ana kadar elde edilen en iyi çözümün olası konumlarını araştırır. Her aday çözüm, optimizasyon süreci ilerledikçe en iyi çözümün konumuna göre kendi pozisyonunu günceller. Keşif ve sömürü stratejileri arasındaki dengeyi vurgulamak amacıyla, KKO dört farklı arama yaklaşımı uygulamaktadır (Abualigah vd., 2021). Son aşamada ise, belirlenen sonlandırma kriteri karşılandığında arama süreci tamamlanır. İzleyen alt bölümlerde, bu doğal süreçlerin KKO algoritmasında nasıl modellenip uyarlandığı açıklanmaktadır.

KKO algoritmasının temel işleyişi Eşitlik (1)'de gösterildiği üzere aday çözümlerden oluşan bir popülasyonun (X) tanımlanmasıyla başlamaktadır. Bu başlangıç popülasyonu, verilen problemin alt (LB) ve üst (UB) sınırları arasında oluşturulmaktadır. Her yineleme sonunda, o ana kadar elde edilen en iyi çözüm, yaklaşık bir optimal çözüm olarak değerlendirilmekte ve sonraki adımların yönlendirilmesinde kullanılmaktadır (Abualigah vd., 2021).

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & x_{1,Dim-1} & x_{1,Dim} \\ x_{2,1} & \cdots & x_{2,j} & \cdots & x_{2,Dim} \\ \cdots & \cdots & x_{i,j} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \cdots & x_{N-1,j} & \cdots & x_{N-1,Dim} \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & x_{N,Dim-1} & x_{N,Dim} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada X, Eşitlik (2) kullanılarak oluşturulan mevcut aday çözümler kümesini, X_i, i'inci çözümün karar değişkenlerini, N aday çözümlerin toplam sayısını yani popülasyonu, Dim ise problemin boyut sayısını ifade etmektedir (Abualigah vd., 2021).

$$X_{ij} = rand\left(UB_j - LB_j\right) + LB_j, i = 1,2, \dots N, \qquad j = 1,2, \dots, Dim \quad (2)$$

KKO algoritması, kartalın avlanma sürecindeki davranışlarını simüle ederek avın her aşamasındaki eylemleri yansıtmaktadır. Bu nedenle algoritmanın optimizasyon prosedürleri, yukarıda tanımlanan dört temel avlanma stratejisini model alır (Abualigah vd., 2021). KKO algoritması, bu aşamalara bağlı olarak keşif ve sömürü süreçleri arasında geçiş yapabilir. Eğer yineleme sayısı belirlenen bir koşulunu sağlıyorsa keşif adımları etkinleştirilir, aksi durumda kullanım adımları devreye girer. Kartalın davranışları, belirli kısıtlamalar altında en iyi çözümü belirlemeyi amaçlayan matematiksel bir optimizasyon paradigması olarak modellenmiştir (Abualigah vd., 2021).

İlk adımda, kartal av bölgesini tanır ve dikey dalışla yüksek irtifadan uçarak en uygun avlanma alanını seçer. Bu aşamada KKO algoritması, avın konumlandığı arama alanını belirlemek amacıyla yüksekten uçarak geniş bir bölgeyi keşfeder. Bu davranışın matematiksel ifadesi ise izleyen denklemle verilmektedir (Abualigah vd., 2021).

$$X_1(t+1) = X_{best}(t)\left(1 - \frac{t}{T}\right) + (X_M(t) - X_{best}(t)\, rand) \quad (3)$$

Yukardaki eşitlikte $X_1(t+1)$, ilk arama yöntemi tarafından üretilen ve t'nin bir sonraki yinelemesine karşılık gelen çözümü, $X_{best}(t)$ ise t'inci yinelemeye kadar elde edilen en iyi çözümü ifade eder ve avın yaklaşık konumunu gösterir. $1 - t/T$ ifadesi ise, yineleme sayısına bağlı olarak genişletilmiş arama (keşif) sürecini denetlemek amacıyla kullanılır. $X_M(t)$, t'inci yinelemede elde edilen mevcut çözümlerin konumlarının ortalama değerini temsil eder ve Eşitlik (4) ile hesaplanır (Abualigah vd., 2021). $rand$, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir değeri, t ve T ise sırasıyla mevcut yineleme sayısını ve maksimum yineleme sayısını ifade eder.

$$X_M(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i(t), \forall j = 1,2, \dots, Dim \quad (4)$$

Daraltılmış keşif stratejisinde av bölgesi yüksekten süzülerek belirlendiğinde kartal, hedef avın üzerinde dairesel hareketler yaparak inişe hazırlanır ve ardından saldırıya geçer (Abualigah vd., 2021). Kısa süzülme saldırısı ile kontur uçuşu olarak adlandırılan bu teknikte KKO algoritması, saldırı öncesinde hedef avın bulunduğu seçili alanı dar kapsamlı bir şekilde keşfeder (Şekil 1). Bu davranışın matematiksel ifadesi aşağıda verilmektedir.

$$X_2(t+1) = X_{best}(t)\ Levy(D) + X_R(t) + (y - x)\ rand \qquad (5)$$

Burada $X_2(t+1)$, ikinci arama yöntemi tarafından üretilen ve t'nin bir sonraki yinelemesine karşılık gelen çözümü, D, problemdeki boyut uzayını, $Levy(D)$ ise Eşitlik (6) kullanılarak hesaplanan Levy uçuş dağılım fonksiyonunu ifade eder (Abualigah vd., 2021). $X_R(t)$, $[1,\ N]$ aralığında seçilen ve i'inci yinelemede kullanılan rastgele bir çözümü temsil eder.

$$Levy(D) = s\frac{u\ \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \qquad (6)$$

Burada s, 0,01 olarak sabitlenmiş bir katsayıyı, u ve v, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen sayıları temsil eder (Abualigah vd., 2021). σ ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

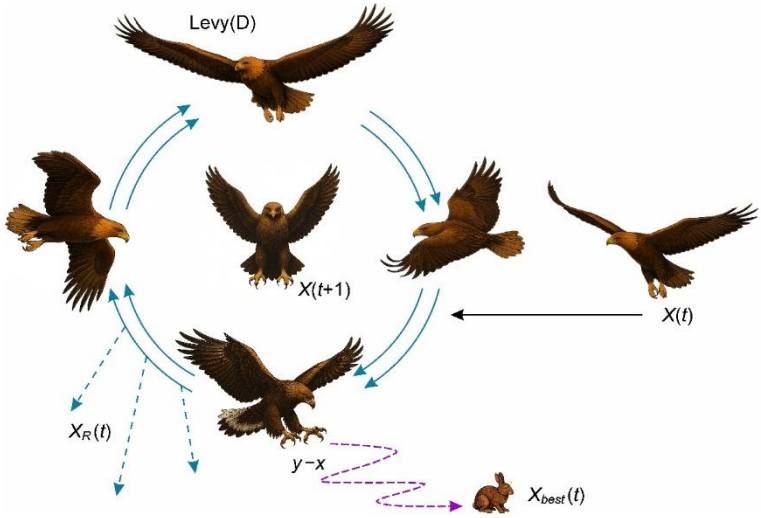
$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta)\ sine\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right)\beta\ 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}}\right) \qquad (7)$$

Burada β, 1.5 olarak sabitlenmiş bir katsayıdır. Eşitlik (5)'te y ve x, arama sürecinde spiral biçimini (Şekil 2) temsil etmek amacıyla kullanılır ve aşağıdaki ifadelerle hesaplanmaktadır (Abualigah vd., 2021).

$$y = r\cos(\theta) \qquad (8)$$

$$x = r\sin(\theta) \qquad (9)$$

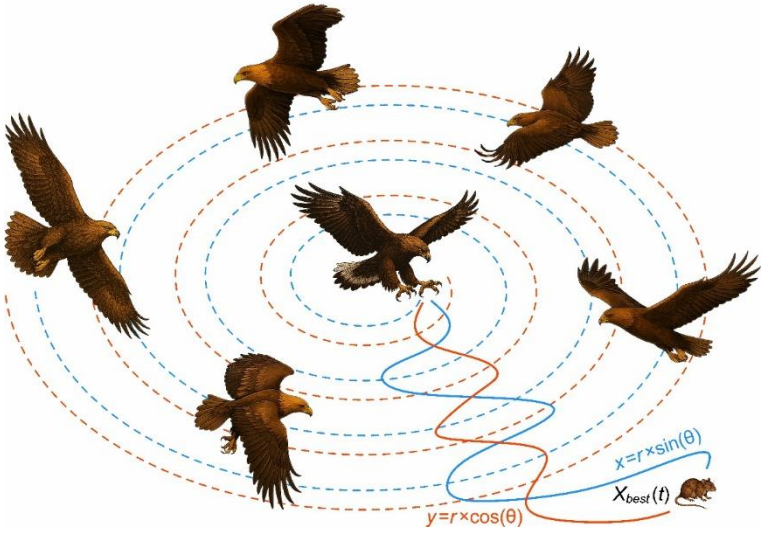
Genişletilmiş sömürü stratejisinde av alanı doğru bir şekilde belirlendiğinde ve kartal iniş ve saldırı için hazır olduğunda, kartalın tepkisini keşfetmek için ön saldırı ile dikey olarak alçalır. Bu yöntem, yavaş alçalma saldırısı ile alçak uçuş olarak adlandırılır (Şekil 3a). Burada kartal, ava yaklaşmak ve saldırmak için hedefin seçilen alanını kullanmaktadır. Bu strateji izleyen şekilde ifade edilmektedir (Abualigah vd., 2021).



Şekil 1. Kısa süzülme saldırısı ile kartalın kontur uçuşunun davranışı (Abualigah vd., 2021'ten düzenlenmiştir)

$$X_3(t+1) = \left(X_{best}(t) - X_M(t)\right)\alpha - rand + \left((UB - LB)\, rand + LB\right)\delta \quad (10)$$

Burada α ve δ ise 0.1 olarak sabitlenmiş sömürü ayarlama parametreleridir.



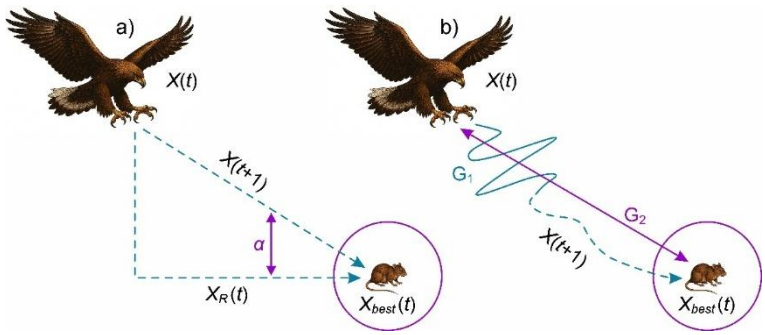
Şekil 2. Kartalın spiral şeklindeki davranışı (Abualigah vd., 2021'ten düzenlenmiştir).

Daraltılmış sömürü stratejisinde ise kartal avına iyice yaklaştığında, avın rastgele hareketlerine bağlı olarak karada saldırıya geçer (Abualigah vd., 2021). Yürü ve avını yakala olarak adlandırılan bu stratejide KKO algoritması, sürecin son aşamasında avın bulunduğu son konuma yönelik saldırıyı gerçekleştirir (Şekil 3b). Bu stratejinin denklemi aşağıda verilmektedir.

$$X_4(t+1) = QF\ X_{best}(t) - (G_1\ X(t\ rand) - G_2\ Levy(D) + rand\ G_1 \tag{11}$$

Burada $X_4(t+1)$, dördüncü arama yöntemi ile üretilen ve t'nin bir sonraki yinelemesine karşılık gelen çözümü, QF arama stratejilerinin dengesini sağlamak amacıyla kullanılan ve Eşitlik (12) ile hesaplanan bir kalite fonksiyonunu ifade eder (Abualigah vd., 2021).

G_1, kaçış sırasında avı izlemek için KKO tarafından gerçekleştirilen çeşitli hareketleri temsil eder ve Eşitlik (13) yardımıyla elde edilir. G_2 ise 2'den 0'a kadar azalan değerlerden oluşur ve bu değerler, ilk konumdan (1) son konuma (t) kadar olan süreçte avı takip etmek için KKO algoritmasının kullandığı uçuş eğimini göstermektedir. Söz konusu değerler Eşitlik (14) kullanılarak hesaplanır (Abualigah vd., 2021).



Şekil 3. a) Kartalın yavaş alçalışlı saldırı ile düşük irtifa uçuşu davranışı, b) yürüyüş ve avını yakalama davranışı (Abualigah vd., 2021'ten düzenlenmiştir).

$$QF(t) = t^{\frac{2\,rand-1}{(1-T)^2}} \tag{12}$$

$$G_1 = 2\,rand - 1 \tag{13}$$

$$G_2 = 2\,(1 - \frac{t}{T}) \tag{14}$$

Eşitlik (12)'de $QF(t)$, t'inci yinelemede elde edilen kalite fonksiyonu değerini ifade etmektedir.

Düz Çözüm

2B uzay sabit yoğunluğa sahip düşey konumlu bitişik bloklarla ayrıklaştırılabilir. X_i noktasında j bloğunun oluşturacağı gravite anomalisi izleyen eşitlikle tanımlanabilir (Telford vd., 1990; Barbosa ve Silva, 1994; Pallero vd., 2015; Ekinci vd., 2021).

$$\Delta g = Gc\Delta\rho\left[A\,log\frac{A^2+D^2}{A^2+C^2} - B\,log\frac{B^2+D^2}{B^2+C^2} - 2C\left(arctan\frac{A}{C} - arctan\frac{B}{C}\right) + 2D\left(arctan\frac{A}{D} - arctan\frac{B}{D}\right)\right] \quad (15)$$

Eşitlikteki terimler ise aşağıda verilmiştir.

$$A = X - x1, B = X - x2, C = Z - z1, D = Z - z2 \quad (16)$$

Burada, $X, Z, Gc, \Delta\rho$ terimleri sırasıyla yatay uzaklık, düşey uzaklık (derinlik), gravitasyon sabiti ve temel kaya ile sedimanter dolgu arasındaki yoğunluk kontrastıdır. Ayrıca, x_1–x_2 bloğun x-ekseni boyunca yatay uzanımını (sol–sağ kenarlarını), z_1–z_2 ise z-ekseni boyunca düşey uzanımını (üst–alt yüzeylerini) tanımlamaktadır.

UYGULAMALAR

Gürültüsüz Veri Uygulaması

Bu bölümde, sedimanter dolgu-temel kaya arayüzeyinin 2B gravite ters çözümü, 50 km uzunluğunda tek bir profil boyunca gerçekleştirilen 51 ölçüm noktası üzerinden değerlendirilmiştir. Profil doğrultusu, x ekseni boyunca 1 km örnekleme aralığı ile tanımlanmıştır. Modelleme alanı, her ölçüm noktasının altında yer alacak şekilde yan yana dizilen 2B düşey bloklar ile ayrıklaştırılmıştır. Bloklarla temsil edilen sedimanter dolgu ile temel kaya arasındaki yoğunluk kontrastı –0.3 gr/cm^3 olarak sabit kabul edilmiştir. Her bir bloğun yatay genişliği 1 km olarak alınmış ve blokların üst sınırı yüzeye (referans düzeye) sabitlenirken, ters çözümde her bloğa ait alt sınır derinliği/kalınlığı arayüzey geometrisini temsil eden temel model parametresi olarak belirlenmiştir.

Global optimizasyon tabanlı ters çözümde, lokal optimizasyon yaklaşımlarından farklı olarak tek bir başlangıç modeline bağlı kalınmaz ve bunun yerine model parametreleri için alt ve üst sınırlarla tanımlanan bir arama uzayı oluşturulur (Ekinci vd., 2016, 2019, 2026; Balkaya vd., 2017; Ai vd., 2024, 2025). Optimizasyon süreci sonunda, çözüm bu sınırlar içerisinde kalan aday çözümler arasından seçilir. Arama uzayının geniş tutulması algoritmanın daha kapsamlı keşif yapmasını sağlayabilse de aşırı geniş sınırlar arama sürecini zorlaştırarak yakınsamayı olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle arama uzayı sınırlarının fiziksel temele dayalı biçimde tanımlanması önemlidir. Bu çalışmada, arama uzayının tasarımında standart Bouguer

levhası (sonsuz levha) yaklaşımından faydalanılmıştır (Bott, 1960). Bu yaklaşım birçok önceki çalışmada kullanılmıştır (örn. Pallero vd., 2015, 2017; Ekinci vd., 2021, 2023). Buna göre, profil boyunca gözlenen gravite anomalisinden türetilen başlangıç blok kalınlığı/taban derinliği kestirimi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$z_2(X) = \frac{\Delta g(x)}{2\pi G_c \Delta\rho} \tag{17}$$

Burada $\Delta g(x)$ profil boyunca gözlenen gravite anomalisini, G_c gravitasyon sabitini ve $\Delta\rho$ sedimanter dolgu ile temel kaya arasındaki yoğunluk kontrastını temsil etmektedir. Elde edilen $z_2(x)$ değerleri kullanılarak her bir bloğun alt sınır derinliği için arama uzayı alt–üst sınırları aşağıdaki aralıkta tanımlanmıştır.

$$z_{2,\text{init}} \in \left[\frac{z_2(X)}{2},\ 2z_2(X)\right] \tag{18}$$

Bu tanımda köşeli parantez içerisindeki ilk ve ikinci terimler sırasıyla blok kalınlıkları (veya arayüzey derinliği) için alt ve üst sınırları göstermektedir. Böylece, optimizasyon algoritmasının fiziksel olarak anlamlı bir aralıkta arama yapması sağlanmış ve hem gereksiz geniş arama alanının doğurabileceği hesap yükü azaltılmış hem de çözümün kararlılığı desteklenmiştir. KKO tabanlı ters çözüm uygulamasında optimizasyon süreci 500 nesil/yineleme ile yürütülmüş ve ters çözümün jeolojik açıdan daha anlamlı bir arayüzey üretmesini sağlamak amacıyla her 100 yinelemede bir düzgünleştirme adımı uygulanmıştır. Gravite ters çözümünün doğası gereği, bazı blok kalınlıkları birbirini telafi edecek şekilde artıp azalabilmekte ve bu durum komşu bloklar arasında yapay dalgalanmalar oluşturarak testere dişi görünümlü ve jeolojik bakımdan gerçekçi olmayan temel kaya modellerine yol açabilmektedir. Bu tür salınımları bastırmak ve aramayı, önbilgiyle uyumlu daha olası model ailesi içinde tutmak için komşu blok kalınlıklarını birbirine göre dengeleyen bir düzgünleştirme koşulu gerekli görülmüştür (Pallero vd., 2015, 2017). Literatürde, temel kaya topografyası problemlerinde çözümü kararlı kılmak ve pürüzsüz modeller elde etmek amacıyla amaç fonksiyonuna düzgünleştirme terimleri eklenmiş ve özellikle türev tabanlı yerel optimizasyonlarda Tikhonov türü düzgünleştirme (Tikhonov ve Arsenin, 1977) yaygın biçimde kullanılmıştır (Barbosa vd., 1997; Silva vd., 2006, 2009). Ancak KKO, türev bilgisine ihtiyaç duymayan global bir yöntem olduğundan, bu tür düzgünleştirmelerin klasik kullanımı doğrudan uygulanamamaktadır. Bu çalışmada, testere dişi kalınlık değişimlerini azaltmak üzere kayan ortalama temelli bir düzgünleştirme operatörü tercih edilmiştir (Ekinci vd., 2021). Buna göre, sınır bloklar sabit bırakılırken ($i = 1,\ N$), iç bloklarda ($i = 2,\ N-1$) üç noktalı (0.25–0.50–0.25) ve daha iç bölgelerde ($i = 3,4,\ldots,N-2$) ise beş noktalı (0.10–0.24–0.32–0.24–0.10)

kayan ortalama alınmıştır. Böylece ters çözüm sırasında komşu bloklar arasındaki ani kalınlık sıçramaları azaltılmış, daha pürüzsüz ve jeolojik olarak daha tutarlı temel kaya derinliği modellerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, sentetik veri ve hesaplanan gravite anomalileri arasındaki uyumsuzluk (RMS), N profil boyunca ölçüm noktası sayısını ifade edecek şekilde, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

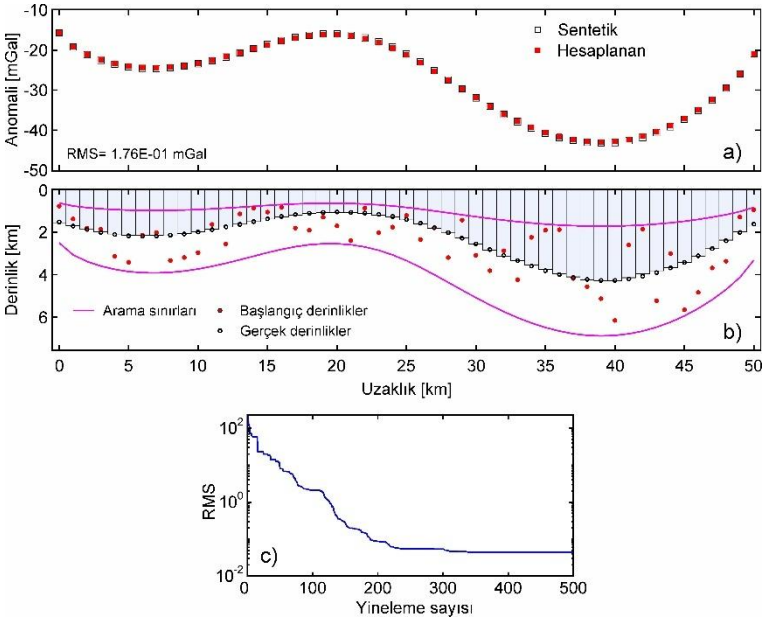
$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(g_{sent,i} - g_{hes,i}\right)^2} \tag{19}$$

Gürültüsüz sentetik veri uygulamasında elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. KKO tabanlı ters çözümün temel kaya topografyasının yüksek doğrulukla belirlendiği görülmektedir. Üst panelde (Şekil 4a) sentetik anomali ile ters çözüm sonrası hesaplanan anomalinin yüksek uyumu gözlenmektedir. Orta panelde (Şekil 4b), başlangıç blok kalınlıklarının gerçek değerlerinden belirgin şekilde saptığı görülmesine karşın, optimizasyon sonunda elde edilen kalınlıkların genel geometrik eğilimi doğru biçimde belirlediği açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle havza merkezindeki göreli sığlaşma ve 35–45 km aralığındaki daha derin kesim gibi arayüzey topografyası özellikleri gerçek modele oldukça yakın olarak kestirilmiştir. Ayrıca arama uzayının Bouguer levhası temelli sınırlarla tanımlanması, çözümün fiziksel olarak anlamlı bir model ailesi içinde kalmasına yardımcı olmuş ve ters çözüm sonucunun jeolojik tutarlılığını artırmıştır. En alt paneldeki (Şekil 4c) RMS eğrisi algoritmanın ilk yinelemelerde hızlı bir iyileşme sağladığını ve yaklaşık birkaç yüz yineleme içinde hatayı birkaç mertebe düşürerek kararlı bir minimuma yakınsadığını göstermektedir. Eğrinin son kısımda plato yapması, çözümün sabit hale geldiğini ve ek yinelemelerin iyileştirme katkısının sınırlı kaldığını işaret etmektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, gürültüsüz koşullarda yöntem hem veri uyumunu hem de temel kaya topografyasını başarılı biçimde belirlediğini göstermektedir.

Gürültülü Veri Uygulaması

Gürültülü veri senaryosunda, sentetik gravite anomalisine %2 oranında (Gauss) gürültü eklenmiş ve bu veri KKO tabanlı ters çözüm ile yeniden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Şeklin üst panelinde (Şekil 5a) gözlenen anomali ile bulunan modelden hesaplanan anomali genel olarak iyi bir uyum sergilemekte ve veri uyumsuzluğu RMS ölçütüyle oldukça küçük bir mertebede kalmaktadır. Orta panelde (Şekil 5b), gürültünün etkisi özellikle tekil noktalarda dalgalanma biçiminde görülse de ters çözümün kestirdiği temel kaya derinliği profili ana geometrik eğilimi korumaktadır. Havza merkezindeki görece sığ kesim ve 30–45 km aralığındaki daha derin bölüm gibi temel kaya topografyası özellikleri doğru biçimde ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bazı konumlarda gürültü

kaynaklı küçük genlikli sapmaların arttığı ve modelin yer yer yerel düzeyde hassasiyet gösterdiği izlenmektedir. Bu durum gravite ters çözümünün gürültü altında doğası gereği belirsizlik ve çok-çözümlülük içermesiyle açıklanabilir.



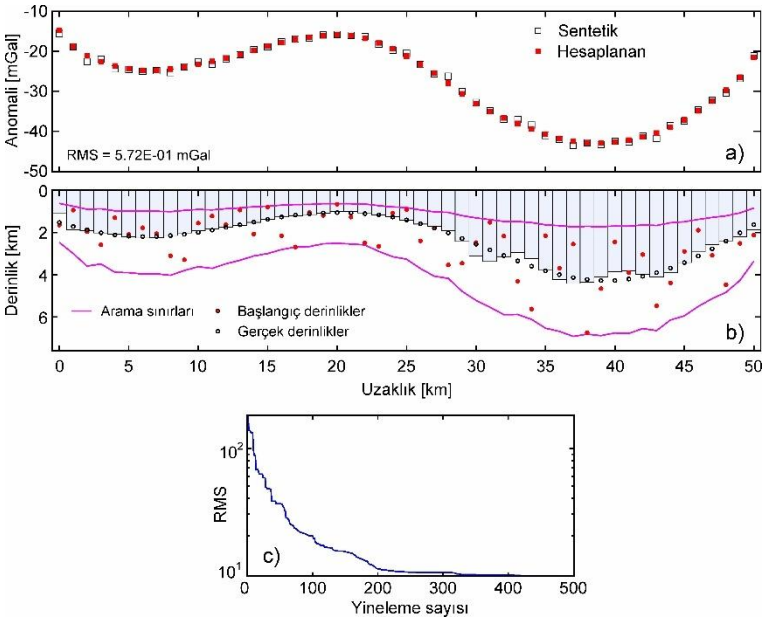
Şekil 4. Gürültüsüz sentetik veri için KKO tabanlı 2B gravite ters çözümü sonuçları: a) sentetik veri ve ters çözümden hesaplanan veri arasındaki çakışma, b) sedimanter dolgu derinliği modeli ile arama uzayı sınırları ve başlangıç/gerçek derinlikler, c) yinelemeler boyunca RMS değişimi.

Alt paneldeki (Şekil 5c) RMS eğrisi, algoritmanın ilk yinelemelerde hızlı bir iyileşme sağlayıp daha sonra kademeli olarak kararlı bir minimuma yakınsadığını göstermektedir. Bu durum yöntemin gürültü etkisinde bile istikrarlı yakınsama davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır. Genel olarak sonuçlar, gürültü koşulları altında KKO algoritmasının veri uyumunu koruyarak temel kaya topografyasının yani sedimanter dolgu kalınlığının baskın yapısal karakterini başarıyla belirleyebildiğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, sedimanter dolgu-temel kaya arayüzeyinin 2B gravite ters çözümü problemi için KKO tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiş ve yöntem sentetik gürültüsüz ve gürültülü veri senaryoları üzerinden değerlendirilmiştir. Modelleme, 50 km uzunluğunda bir profil boyunca 51 ölçüm noktasının altında tanımlanan yan yana düşey bloklardan oluşan ayrık bir temsille yürütülmüştür. Arayüzey geometrisi her blok için kestirilen derinlik/kalınlık parametreleriyle sunulmuştur. Arama uzayı sınırları, Bouguer levhası (sonsuz

levha) yaklaşımına dayalı fiziksel bir ölçekleme ile tanımlanarak optimizasyonun jeolojik açıdan anlamlı bir model ailesi içinde kalması sağlanmıştır. Ayrıca, blok kalınlıkları arasındaki telafi davranışlarının neden olabildiği yapay salınımları (testere dişi) bastırmak amacıyla, 500 yineleme boyunca her 100 yinelemede bir kayan ortalama temelli bir düzgünleştirme işlemi uygulanmış ve çözüm kararlılığı artırılmıştır.



Şekil 5. %2 Gauss gürültüsü eklenmiş sentetik veri için KKO tabanlı 2B gravite ters çözümü sonuçları: a) sentetik veri ve ters çözümden hesaplanan veri arasındaki çakışma, b) sedimanter dolgu derinliği modeli ile arama uzayı sınırları ve başlangıç/gerçek derinlikler, c) yinelemeler boyunca RMS değişimi.

Elde edilen sonuçlar, KKO'nun gürültüsüz koşullarda arayüzey topografyasını yüksek doğrulukla belirleyebildiğini ve gözlenen-hesaplanan gravite anomalileri arasında oldukça düşük RMS uyumsuzluğu ile güçlü bir veri uyumu sağladığını göstermiştir. Gürültülü veri durumunda ise, tekil noktalarda gürültü kaynaklı yerel dalgalanmalar görülmekle birlikte, ters çözüm ana geometrik eğilimi korumuş, havza merkezindeki göreli sığlaşma ve daha derin kesimlere karşılık gelen temel topografya özelliklerini başarılı bir biçimde belirlemiştir. RMS hata eğrilerinin ilk yinelemelerde hızlı bir düşüş göstermesi ve sonrasında plato davranışına geçmesi, yöntemin hem gürültüsüz hem de gürültülü senaryolarda istikrarlı yakınsama sergilediğini ve belirli bir yineleme sayısından sonra iyileşmenin sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Genel bir değerlendirme olarak, KKO tabanlı yaklaşımın türev bilgisi gerektirmeyen yapısı, fiziksel temelli arama uzayı tasarımı ve kayan ortalama destekli düzgünleştirme ile, temel kaya topografyasının kestirimi

için kararlı ve uygulanabilir bir global optimizasyon alternatifi sunduğu sonucuna varılmıştır.

REFERANSLAR

Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-Qaness, M. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm. Computers & Industrial Engineering, 157, 107250.

Ai, H., Essa, K. S., Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., & Géraud, Y. (2024). Hunger Games Search optimization for the inversion of gravity anomalies of active mud diapir from SW Taiwan using inclined anticlinal source approximation. Journal of Applied Geophysics, 227, 105443.

Ai, H., Biswas, A., Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Alvandi, A., Shen, Y., Liu, Z., Roy, A., & Su, K. (2025). Horizontal loop electromagnetic data inversion through novel metaheuristics and its applications to ore deposit explorations. Geophysical Prospecting, 73(5), 1566-1586.

Allen, P. A., & Allen, J. R. (2005). *Basin analysis*: *Principles and applications*. Oxford: Blackwell.

Balkaya, Ç., Ekinci, Y. L., Göktürkler, G., & Turan, S. (2017). 3D non-linear inversion of magnetic anomalies caused by prismatic bodies using differential evolution algorithm. Journal of Applied Geophysics, 136, 372-386.

Barbosa, V. C. F. & Silva, J. B. C. (1994). Generalized compact gravity inversion. Geophysics, 95, 57-68.

Barbosa, V. C. F., Silva, J. B. C., & Medeiros, W. E. (1997). Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths. Geophysics, 62, 1745-1757.

Bektaş, Ö., Büyüksaraç, A., Sarıtepe, H. E., Önal, K. M., Canbaz, O., Eyisüren, O., Pamuk, E., Akın, Ö., Akar, F., & Koşaroğlu, S. (2025). Shear-wave velocity model of the Sivas City (inner eastern, Türkiye) using Rayleigh wave ellipticity inversion controlled by 2D microgravity modeling. Acta Geophysica, 73, 5593-5611.

Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America, 60, 29-61.

Bott, M. H. P. (1960). The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. Royal Astronomical Society of Geophysics, 3, 63-67.

Büyüksaraç, A., Eyisüren, O., Bektaş, Ö., & Karaca, Ö. (2023). Bedrock depth calculation of Çanakkale (Turkey) basin using Rayleigh ellipticity and microgravity survey. Geofísica Internacional, 62, 387–401.

Carnie, S. K. (1954). Food habits of nesting golden eagles in the coast ranges of California. The Condor, 56(1), 3-12.

Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy*. Amsterdam: Elsevier.

Dekker, D. (1985). Hunting behaviour of golden eagles, Aquila-Chrysaetos, migrating in southwestern Alberta. Canadian Field-Naturalist, 99(3): 383-385.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., & Turan, S. (2016). Model parameter estimations from residual gravity anomalies due to simple-shaped sources using Differential Evolution Algorithm. Journal of Applied Geophysics, 129, 133-147.

Ekinci, Y. L, Balkaya, Ç, & Göktürkler, G. (2019). Parameter estimations from gravity and magnetic anomalies due to deep-seated faults:differential evolution versus particle swarm optimization. Turkish Journal of Earth Sciences 28(6): 860-881.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., & Özyalın, Ş. (2021). Gravity data inversion for the basement relief delineation through global optimization: a case study from the Aegean Graben System, western Anatolia, Turkey. Geophysical Journal International, 224(2), 923-944.

Ekinci, Y. L., Balkaya, Ç., Göktürkler, G., & Ai, H. (2023). 3-D gravity inversion for the basement relief reconstruction through modified success-history-based adaptive differential evolution. Geophysical Journal International, 235(1), 377-400.

Ekinci, Y. L., Ai, H., Balkaya, Ç., & Roy, A. (2026). 2.75-D Global joint inversion of gravity and magnetic anomalies with appraisal of model reconstruction uncertainty. Journal of Applied Geophysics, 245, 106036.

Ghose, R., Persaud, P., & Clayton, R. W. (2023). Basin structure for earthquake ground motion estimates in urban Los Angeles mapped with nodal receiver functions. Geosciences, 13, 320.

Hatch, D. R. (1968). Golden eagle hunting tactics. Blue Jay, 26(2), 78-80.

Hunt, J. D., Nascimento, A., Guzman, O. J. R., Furtado, G. C. D .A., ten Caten, C. S., Tomé, F. M. C., Leal Filho, W., Durin, B., Lopes, M., & Wada, Y. (2022). Sedimentary basin water and energy storage: a low environmental impact option for the Bananal Basin. Energies, 15, 4498.

Meinertzhagen, R. (1940). How do larger raptorial birds hunt their prey. Ibis, 4(3), 530-535.

Onajite, E. (2014). *Understanding seismic interpretation methodology, in seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration*. Amsterdam: Elsevier.

Pallero, J. L. G., Fernandez-Martinez, J. L., Bonvalot, S., & Fudym, O. (2015). Gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via particle swarm optimization. Journal Applied Geophysics, 116, 180-191.

Pallero, J. L. G., Fernandez-Martinez, J. L., Bonvalot, S., & Fudym, O. (2017). 3D gravity inversion and uncertainty assessment of basement relief via particle swarm optimization. Journal of Applied Geophysics, 139, 338-350.

Pamuk, E., Akgün, M., Özdağ, Ö. C., & Gönenç, T. (2017). 2D soil and engineering-seismic bedrock modeling of eastern part of Izmir inner bay/Turkey. Journal of Applied Geophysics, 137, 104-117.

Roy, A., Dubey, C. P., & Prasad, M. (2021) Gravity inversion for heterogeneous sedimentary basin with b-spline polynomial approximation using differential evolution algorithm. Geophysics, 86(3), F35-F47.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. California: Earthquake Engineering Research Institute.

Silva, J. B. C., Costa, D. C. L., & Barbosa, V. C. F. (2006). Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. Geophysics, 71(5), J51-J58.

Silva, J. B. C., Teixeira, W. A., & Barbosa, V. C. F. (2009). Gravity data as a tool for landfill study. Environmental Geology, 57, 749-757.

Steenhof, K., Kochert, M. N., & Mcdonald, T. L. 1997. Interactive effects of prey and weather on golden eagle reproduction. Journal of Animal Ecology, 66(3): 350-362.

Telford,W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Y. (1977). *Solutions of ill-posed problems*. New York: John Wiley.

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology*. New York: Wiley.

Weissmann, G. S., Hartley, A. J., Scuderi, L. A., Nichols, G. J., Owen, A., Wright, S., Felicia A. L., Holland, F., ve Anaya, F. M. L. (2015). Fluvial geomorphic elements in modern sedimentary basins and their potential preservation in the rock record: a review. Geomorphology, 250, 187-219.

Wu, M., Liu, Z., Qin, Y., Su, K., & Yu, Z. (2025). Thermal property of reservoir rocks at thermal-mechanical coupled conditions and resultant impact on performance of geothermal systems. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58, 8773-8798.

Yapay Zekâ Teknolojilerine Genel Bakış

Sema YILDIRIM[1]

1- Dr.; Selcuk University, Faculty of Fine Arts, Graphic, semayildirim@selcuk.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0807-8550

ÖZET

Yapay Zekâ (Artificial Intelligence - AI) teknolojileri, bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerle çağdaş bilim ve mühendislik çalışmalarının merkezinde yer almaktadır. Büyük veri kaynaklarının yaygınlaşması, hesaplama kapasitesindeki artış ve gelişmiş algoritmalar, AI'nın hem kuramsal temellerini güçlendirmiş hem de farklı sektörlerde yaygın biçimde uygulanmasını sağlamıştır. Bu bağlamda AI, yalnızca teknik bir yenilik değil, ekonomik yapılar, toplumsal ilişkiler ve karar alma süreçleri üzerinde dönüştürücü etkiler yaratan bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde AI, üretimden hizmet sektörüne, kamu yönetiminden sağlık ve eğitim alanlarına, finansal sistemlerden bireysel kullanıcı deneyimlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Otomasyon, öngörü ve karar destek olanakları, verimlilik artışı ve kaynakların etkin kullanımı açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. AI destekli sistemler, iş süreçlerinin daha hızlı, hatasız ve düşük maliyetle yürütülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bu sistemler karar alma süreçlerini iyileştirerek etkin ve verimli yönetim imkânı sunmaktadır. Bununla birlikte, AI'nın hızlı gelişimi etik ilkeler, hukuki düzenlemeler, veri güvenliği ve toplumsal etkiler gibi çok boyutlu tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Veri gizliliği, algoritmik önyargı, karar alma süreçlerinin şeffaflığı ve iş gücü piyasasındaki dönüşümler, AI'nın yaygınlaşmasıyla ele alınması gereken kritik konular arasında yer almaktadır. Ayrıca AI'nın toplumsal kabulü ve güvenilirliği, yalnızca teknolojik performansa değil, bu teknolojilerin sosyal ve yönetsel çerçevede nasıl düzenlendiğine de bağlıdır. Bu nedenle AI, yalnızca teknik yönleriyle değil, sosyal, hukuki ve yönetsel boyutlarıyla bütüncül şekilde ele alınmalıdır. Böyle bir yaklaşım, teknolojinin sürdürülebilir ve etik kullanımını güvence altına alacak ve AI'nın toplumsal fayda sağlayacak şekilde geliştirilmesini mümkün kılacaktır. AI teknolojileri hem teorik hem de uygulamalı araştırmalar açısından giderek stratejik bir öneme sahip olup, disiplinler arası çalışmaların önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Yapay zekâ, makine öğrenmesi, derin öğrenme, yapay zekada etik ilkeler, *dijital dönüşüm.*

GİRİŞ

Bilgisayar bilimi, istatistik, matematik, bilişsel bilimler ve mühendislik gibi disiplinlerden beslenen Yapay Zekâ (Artificial Intelligence - AI), insan benzeri öğrenme, akıl yürütme, problem çözme ve karar verme süreçlerini bilgisayar sistemleriyle gerçekleştiren ve günümüzde dijital dönüşümün itici güçlerinden biri olan disiplinler arası bir alandır. Bu yönüyle AI, hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır. AI, yalnızca teknik bir yenilik olarak değil, aynı zamanda ekonomik verimliliği artıran, sosyal etkileşimleri dönüştüren ve yönetsel süreçlerde stratejik avantaj sağlayan bir teknoloji olarak da değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, AI sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, farklı alanlardaki uzmanlıkların bir araya gelmesini gerektirmekte ve disiplinler arası iş birliklerinin önemini giderek artırmaktadır. Ayrıca, etik, hukuk ve güvenlik gibi konuların da AI uygulamalarında göz önünde bulundurulması, teknolojinin toplum için sürdürülebilir ve güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Yapay Zekanın Tanımı ve Kapsamı

AI, insan zekâsının öğrenme, muhakeme, algılama ve optimizasyon gibi bilişsel yeteneklerini bilgisayar sistemlerinde modelleyen bir teknolojidir. Bu teknoloji, özellikle bilgisayar bilimi, biyoloji, matematik ve felsefe gibi farklı bilim dallarının bilgi birikimini bir araya getirerek hem teorik hem de pratik boyutta önemli katkılar sunar (Farooq & Iqbal, 2025; Longo et al., 2024). AI'nın temelleri, Alan Turing'in hesaplama teorisi ve "Turing Testi" fikirleriyle şekillenmiştir. Günümüzde AI, yalnızca laboratuvar sınırlarında kalmayıp, finansal sistemlerden sağlığa, uzay teknolojilerinden robotik sistemlere kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır.

AI, doğadaki canlıların ve özellikle insanın bilişsel işleyiş mekanizmalarından esinlenerek, bu davranışları taklit eden veya yeniden üreten sistemleri geliştiren bir teknolojidir. Bu teknoloji, biyolojik sistemlerin karmaşıklığı ve adaptasyon yeteneğinden esinlenerek, kontrol, öğrenme, karar verme ve optimizasyon işlevlerini mekanik veya dijital sistemlerle yeniden üretmeyi hedefler (Shahzad et al., 2017; Somvanshi et al., 2025). Bu yaklaşım yalnızca insan benzeri davranışları değil, aynı zamanda hayvan sürü davranışlarını, bitki büyüme stratejilerini ya da doğadaki evrimsel süreçleri de modelleyebilmektedir. Bu yönüyle AI, biyoloji, psikoloji, bilgisayar bilimi, matematik ve mühendislik disiplinlerinin kesişim noktasında yer alan çok disiplinli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Borghoff et al., 2025; Carvalho & Lampinen, 2025).

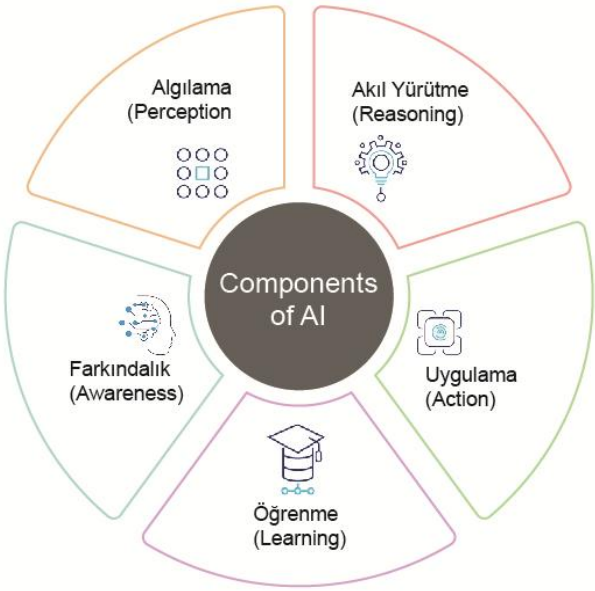
Biyolojik ve insan davranışlarından esinlenen AI sistemleri, temel olarak altı ana işlevde kendini gösterir:

- *Kontrol mekanizmaları*: Biyolojik varlıklarda gözlemlenen adaptif hareket stratejilerinin yapay sistemlerde uygulanmasıdır. Bu alan, robotik kontrol, otonom taşıtlar ve trafik sistemleri gibi uygulamalarda kritik bir rol oynar (Garicano-Mena & Santos, 2025; Husbands et al., 2021; Jakšić et al., 2023).
- *Karar verme süreçleri*: Canlıların çevresel değişkenlere tepki biçimlerinden ilham alır ve uzman sistemler, tıbbi tanı sistemleri ve hukuk gibi alanlarda karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine olanak tanır.
- *Tahmin (çıkarım)*: Biyolojik sistemlerdeki çevresel sinyallere dayalı öngörülerden esinlenerek finansal analizler, trafik tahmini ve görüntü işleme gibi alanlarda kullanılır.
- *Öğrenme*: Canlıların deneyim ve gözlemlerden bilgi edinme süreçlerinin yapay sistemlerde modellenmesidir. Yapay sinir ağları (Artificial Neural Network - ANN) ve derin öğrenme modelleri, bu öğrenme mekanizmalarını simüle ederek adaptif ve kendi kendine gelişen sistemlerin oluşmasını sağlar (Somvanshi et al., 2025).
- *Problem çözme*: Doğadaki evrimsel stratejiler, sürü zekâsı ve genetik algoritmalar kullanılarak NP-tam problemler, rotalama ve optimizasyon sorunlarının çözülmesini kapsar.
- *Optimizasyon*: Doğal sistemlerde gözlemlenen en uygun kaynak kullanımı ve süreçleri taklit ederek, üretim süreçleri, enerji verimliliği ve lojistik optimizasyon gibi uygulamalarda etkin çözümler sunar (Jakšić et al., 2023).

Modern AI sistemleri, bu işlevleri entegre ederek biyolojik prensiplere dayanan güçlü, esnek ve adaptif modeller oluşturmaktadır. Bu modeller yalnızca teknik kapasiteyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda karar verebilirlik, dayanıklılık ve etik sorumluluk gibi kritik yönleri de geliştirir. Bu durum, AI'nın yalnızca bir araç olmanın ötesine geçmesini sağlayarak, karmaşık ve belirsiz ortamlarda güvenilir kararlar alabilen, değişen koşullara hızla uyum sağlayabilen, riskleri etkin bir şekilde yönetebilen ve toplumsal değerleri, etik normları ve insan odaklı hedefleri göz önünde bulunduran bir teknoloji olarak konumlanmasını mümkün kılar. Böylece AI, endüstriyel otomasyondan sağlık hizmetlerine, eğitimden sürdürülebilir enerji çözümlerine kadar pek çok alanda stratejik bir rol üstlenir ve hem bireysel hem de kurumsal düzeyde etkinliği artırır (Somvanshi et al., 2025).

AI'nın temel amaçlarından biri, insanlara karar verme süreçlerinde ve hedeflerine ulaşmada yardımcı olabilecek zeki sistemler geliştirmektir. Bu sistemler, insan bilişsel ve algısal yeteneklerini taklit ederek çevresel verilere tepki verebilir ve karmaşık görevleri yerine getirebilir. AI çalışmalarında temel bileşenler; kavrayış (perception), muhakeme (reasoning), eylem

(action), öğrenme (learning) ve bilinç (awareness) olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1). Bu da AI sistemlerinin yalnızca veri işleyen makineler olmaktan çıkıp, çevresini anlayabilen, mantıklı kararlar alabilen, öğrenerek kendini geliştirebilen ve belirli düzeyde çevresindeki olayların farkında olabilen entegre zeka yapıları haline gelmesini sağlar. Dolayısıyla, AI, hem bireylerin hem de kurumların karmaşık problemleri çözme ve stratejik kararlar alma kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu sayede teknolojinin toplumsal, ekonomik ve kurumsal etkileri güçlenmekte, verimlilik ve etkililik açısından da kayda değer kazanımlar sağlanmaktadır.



Şekil 1: AI'nın temel temel bileşenleri.

- *Kavrayış (Perception):* Görme, işitme, koku, dokunma ve diğer duyuların taklit edilmesini kapsar ve zeki sistemlerin çevresel verileri algılamasını sağlar.

- *Muhakeme (Reasoning):* Bilgiyi analiz etme, planlama ve sorgulama süreçlerini içerir.
- *Uygulama (Action):* Sistemin çevreye uygun yanıtlar vermesine ve fiziksel veya dijital etkileşimlerde bulunmasına olanak tanır (Zheng et al., 2023).
- *Öğrenme (Learning):* AI'nın en kritik unsurlarından biri olup, sistemin deneyimlerden ve gözlemlerden bilgi edinmesini ve yeni durumlara uyum sağlamasını mümkün kılar. Bu özellik, adaptasyon ve keşif

süreçleriyle desteklenir ve zeki sistemlerin özerk olarak gelişmesine imkân tanır.

- *Farkındalık (Awareness):* Sistemin içgüdüsel tepki mekanizmalarını taklit etmesini ve karmaşık çevresel etkileşimlerde daha esnek kararlar almasını sağlar (Albarracin et al., 2024; Arévalo-Royo et al., 2025).

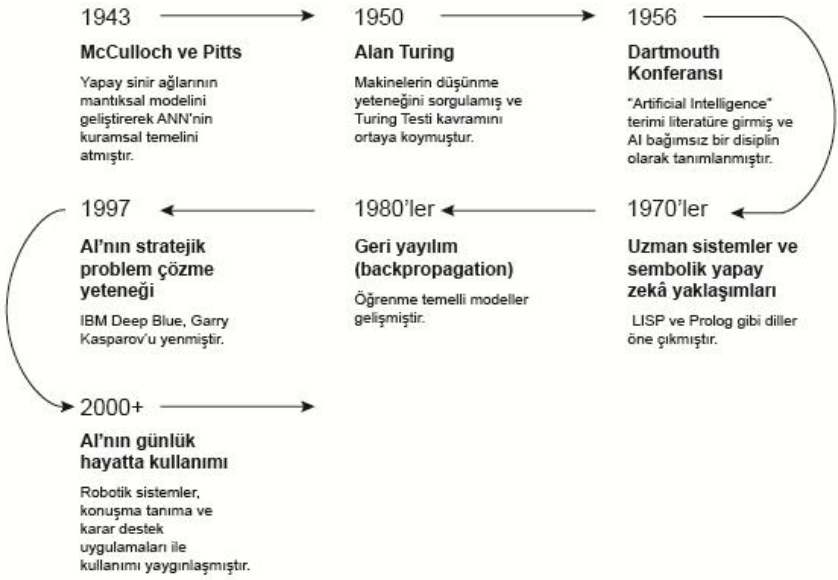
AI'nın bilimsel hedefleri, öncelikle zekânın temel prensiplerini ve biyolojik sistemlerin işlevlerini anlamaya yöneliktir. Bu kapsamda araştırmalar, beynin nasıl çalıştığını, hangi bilişsel işlevlerin mümkün olduğunu ve hangi görevlerin sınırlandırılmış olduğunu incelemektedir. Ayrıca bir işi düzenlemek için optimal çözüm yollarını belirlemek, AI araştırmalarının merkezinde yer alan bir bilimsel amaçtır (Lake et al., 2017). Mühendislik açısından AI, gerçek dünya ortamlarında zeki davranabilen makineler, özerk robotlar ve yazılım sistemleri tasarlamayı hedefler (C. Chen et al., 2022). Bu doğrultuda, AI araştırmaları hem teorik anlayış hem de pratik uygulama açısından sürekli olarak genişlemekte ve evrimleşmektedir.

Yapay Zekânın Tarihçesi

AI'nın temelleri, 1940'lı yıllarda insan benzeri öğrenme ve problem çözme yeteneklerini makinelerde modelleme girişimleriyle atılmıştır. Warren McCulloch ve Walter Pitts'in 1943 yılında yayımladığı "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity" adlı makale ile ANN'nın temelleri atılmıştır (McCulloch & Pitts, 2017). Donald Hebb ise 1949'da sinir hücrelerinin eş zamanlı etkinliğinin bağlantı gücünü artırdığı kuramını geliştirerek öğrenme temelli yaklaşımlara zemin hazırlamıştır. Bilgisayar biliminin öncülerinden Alan Turing, "Computing Machinery and Intelligence" başlıklı çalışmasında makinelerin düşünme yeteneğiyle ilgili düşünceler sunmuş ve günümüzde Turing Testi olarak bilinen ölçütü ortaya koymuştur (Turing, 1950). 1956'da Dartmouth College'da düzenlenen Dartmouth Yaz Araştırma Projesi, John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester ve Claude Shannon gibi öncü bilim insanlarını bir araya getirmiş ve "Artificial Intelligence" terimi ilk defa literatüre girmiştir (Zhang, 2023). Bu konferans, AI'nın akademik bir disiplin olarak resmî doğuşu olarak kabul edilmektedir ve araştırmacılar tarafından AI'nın doğuş dönemi "Big Bang of AI" olarak adlandırılmaktadır (McCarthy et al., 2006)(Schmidhuber, 2022).

1960'lı yılların ardından AI büyük bir gelişme göstermiştir. 1958'de LISP programlama dili geliştirilmiş ve bu dil, AI araştırmalarında sembolik işlemler için yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Aynı dönemde uzman sistemler, veri tabanlı bilgi işleme yetenekleriyle popülerlik kazanmış, 1970'lerde Prolog gibi mantıksal programlama dilleri geliştirilmiş, ancak AI araştırmaları inişli çıkışlı bir dönemden geçmiştir. 1980'lerde ise AI endüstriye daha fazla girmeye başlamış, ANN'na dönük

yeniden ilgi artmıştır. 1990'lardan itibaren AI, uygulamalı ve stratejik alanlarda daha fazla görünür hâle gelmiştir. 1997'de IBM'in *Deep Blue* satranç programı Garry Kasparov'u yenerek strateji ve hesaplama kabiliyetinin önemini göstermesi bakımından oldukça önemlidir. 2000'li yıllarda ise robotik sistemler, konuşma tanıma ve gelişmiş karar destek sistemleri gibi uygulamalar AI'nın yaygınlaşmasını hızlandırmıştır (McCarthy, 1974; Mitchell, 2021; Schmidhuber, 2022; Toosi et al., 2021) (Şekil 2).



Şekil 2: AI'nın tarihsel gelişimine ait zaman çizelgesi.

Son yıllarda, AI araştırmaları hem akademik hem endüstriyel anlamda yeni bir "altın çağ" yaşamaktadır. Yüksek performanslı donanımlar, büyük veri, Makine Öğrenmesi (Machine Learning - ML) ve derin öğrenme teknikleri sayesinde AI hızlı bir şekilde evrimleşmekte ve hayatın birçok alanına doğrudan entegre olmaktadır (Schmidhuber, 2022). Bu gelişmeler, AI'nın sadece bilimsel bir merak olmaktan çıkıp, günlük yaşamda stratejik bir araç hâline gelmesini sağlamıştır.

Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu bölümün temel amacı, AI, ML ve derin öğrenme teknolojilerinin günümüz dijital dünyasında üstlendiği rolü ve bu teknolojilerin farklı alanlardaki kullanım potansiyelini kavramsal bir çerçeve içerisinde ortaya koymaktır. AI, insan zekâsına özgü öğrenme, akıl yürütme ve karar verme süreçlerinin bilgisayar sistemleri aracılığıyla modellenmesini amaçlayan

disiplinler arası bir araştırma alanı olarak, son yıllarda gerek teorik gerekse uygulamalı çalışmalarda önemli bir ivme kazanmıştır. Bu kapsamda ML, veriye dayalı öğrenme mekanizmaları aracılığıyla sistemlerin deneyim yoluyla performanslarını iyileştirmesine olanak tanırken, derin öğrenme yaklaşımları çok katmanlı sinir ağı yapıları sayesinde büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı örüntülerin çıkarılmasını mümkün kılmaktadır.

AI temelli sistemler; karar destek mekanizmaları, otomatik değerlendirme süreçleri, büyük veri analizi, tahminleme ve sınıflandırma uygulamaları gibi pek çok alanda etkin biçimde kullanılmakta ve bu yönüyle bireysel, kurumsal ve toplumsal düzeyde önemli dönüşümlere zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda bölüm, AI teknolojilerinin temel bileşenlerini, çalışma prensiplerini ve uygulama alanlarını bütüncül bir bakış açısıyla ele alarak, konunun kavramsal ve teknolojik arka planını sistematik biçimde sunmayı amaçlamaktadır.

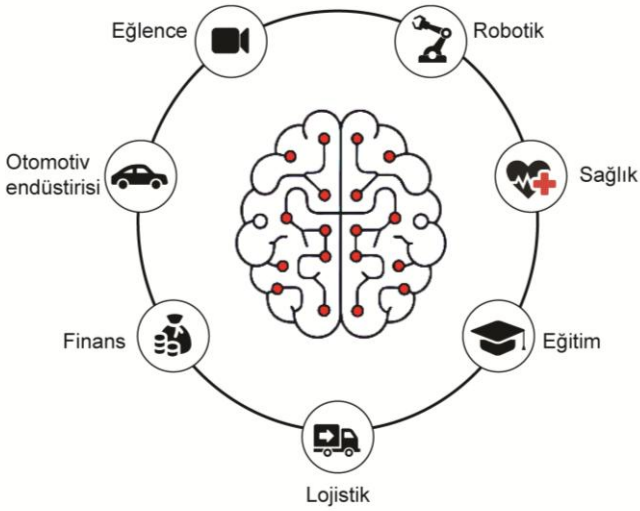
LİTERATÜR TARAMASI

AI teknolojilerine ilişkin akademik literatür, özellikle son on yılda hem kapsam hem de disiplinler arası etkileşim bakımından belirgin bir biçimde artmıştır. Erken dönemdeki çalışmalar ağırlıklı olarak AI'nın algoritmik temellerine ve makine öğrenimi yaklaşımlarına odaklanırken, güncel literatür üretken AI, robotik sistemler, endüstriyel otomasyon ve farklı sektörlerdeki uygulamalara yönelik ampirik ve derleme çalışmaları içermektedir. Bu çalışmalar, AI'nın yalnızca teknik bir araç değil, aynı zamanda sosyo-teknik bir dönüşüm unsuru olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Makine öğrenimi ve derin öğrenme temelli yaklaşımlar, AI literatürünün merkezinde yer almaktadır. Büyük veri kümeleri üzerinden öğrenme yeteneği kazanan bu modeller, özellikle algılama, sınıflandırma ve tahmin görevlerinde yüksek performans göstermektedir. Büyük dil modellerini ele alan kapsamlı çalışmalarda, derin öğrenme mimarilerinin doğal dil işleme ve karar destek sistemlerinde önemli bir dönüşüm yarattığını ortaya konmuştur. Bilimsel araştırma süreçlerine AI'nın entegrasyonunu inceleyen çalışmalarda, AI tabanlı yöntemlerin veri analizi kapasitesini ve araştırma verimliliğini artırdığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu süreçlerde insan denetiminin günümüzde hala kritik bir rol oynadığı ifade edilmektedir (Han et al., 2024). Son yıllarda literatürde öne çıkan diğer eğilim ise, üretken AI ve büyük dil modellerine yönelik çalışmalardır. Bu alandaki araştırmalar, AI'nın yalnızca mevcut verileri analiz eden sistemler olmaktan çıkarak, yeni içerik ve bilgi üretebilen yapılara dönüştüğünü göstermektedir. Üretken AI modellerini karşılaştırmalı olarak ele alan çalışmalarda, bu sistemlerin teknik yeteneklerinin yanı sıra lisanslama koşulları, kullanım politikaları ve kurumsal entegrasyon süreçlerinin de değerlendirilmesi gerektiği ifade

edilmektedir (Han et al., 2024). AI'nın sosyal bilimler ve araştırma yöntemleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada, üretken AI'nın araştırma pratiklerini önemli ölçüde dönüştürdüğü ifade edilmektedir. Öte yandan, metodolojik şeffaflık ve etik sorunların literatürde henüz yeterince ele alınmadığına dikkat çekilmektedir (Han et al., 2024).

AI teknolojileri, günümüzde çeşitli endüstrilerde önemli dönüşümler yaratmaktadır. Eğlence sektöründe içerik öneri sistemleri ve üretken AI modelleri sayesinde kullanıcı deneyimi kişiselleştirilmekte ve yeni içerikler hızla üretilmektedir. Otomotiv endüstrisinde, otonom araçlar ve sürücü destek sistemleri güvenlik ve sürüş konforunu artırırken, üretim hatlarında robotik otomasyon süreçlerin verimliliğini yükseltmektedir. Robotik ve endüstriyel uygulamalarda, AI destekli robotlar karmaşık üretim ve lojistik görevlerini gerçekleştirerek esneklik ve kalite artışı sağlamaktadır. Eğitim alanında, AI tabanlı platformlar öğrencilerin bireysel ihtiyaçlarına uygun içerik sunarken, lojistikte rota optimizasyonu, talep tahmini ve depo yönetimi süreçleri daha verimli hâle gelmektedir. Sağlık alanında klinik karar destek sistemleri, tanı süreçleri ve robotik cerrahi uygulamaları tedavi doğruluğunu artırmaktadır. Emlak ve gayrimenkul sektöründe ise AI, fiyat tahmini, talep analizi ve müşteri ilişkileri yönetimi gibi alanlarda katkı sağlamaktadır. Genel olarak, AI bu sektörlerde yalnızca teknik bir araç değil, iş süreçlerini dönüştüren stratejik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu uygulamaların genel görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: AI teknolojilerinin farklı endüstrilerdeki uygulamaları.

Robotik ve sanayi alanındaki AI uygulamaları, özellikle Endüstri 4.0 ve akıllı üretim kavramları çerçevesinde ele alınmaktadır. AI destekli robotik sistemler, algılama, karar verme ve otonom hareket yetenekleri sayesinde imalat süreçlerinde verimlilik, esneklik ve kalite artışı sağlamaktadır. Üretim hatlarında kullanılan AI tabanlı robotlar, arıza tahmini, kalite kontrol ve insan-robot iş birliği gibi alanlarda önemli avantajlar sağlamaktadır (Han et al., 2024).

AI ve robotik teknolojiler tarımda sürdürülebilir üretimi destekleyerek verimliliği artırıp çevresel etkileri azaltmaktadır; ancak altyapı, maliyet ve veri erişimi gibi sınırlamalar mevcuttur. Sağlık alanında yapılan çalışmalar ise, AI ve robotik sistemlerin klinik karar destek, tanı süreçleri ve robotik cerrahi uygulamalarındaki etkisini incelemektedir. AI destekli sistemlerin tanı doğruluğunu artırdığı ve sağlık hizmetlerinde operasyonel verimlilik sağladığı yönünde bulgular yer almaktadır (Morris et al., 2024). Ancak bu çalışmalar, sağlık alanında AI kullanımının etik, hukuki ve güvenlik boyutlarının dikkatle ele alınması gerektiğini de ortaya koymaktadır.

Finans sektörüne yönelik çalışmalarda ise AI, kredi skorlama, risk analizi ve sahtecilik tespiti gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, AI uygulamalarının teknik başarılarının yanı sıra yönetim ve denetim mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Zhu et al., 2016).

AI'nın tüm sektörlerde etkilerinin görülmesi ve yaygınlaşmasıyla birlikte, güvenilirlik ve etik konuları da ele alınmaya başlanmıştır. Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan güvenilir AI ilkeleri akademik çalışmalarda sıklıkla referans alınmakta ve şeffaflık, adalet ile sorumluluk gibi değerlerin AI sistemlerine entegre edilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır (Determinants, 2019). Bu yaklaşım, AI'nın yalnızca teknik değil, aynı zamanda toplumsal bir teknoloji olduğunu göstermektedir.

TEORİK ÇERÇEVE

Yapay Zekâ Türleri

Günümüz teknolojik gelişmelerine bakıldığında, AI sistemleri yetenek ve kapsam açısından farklı türlere ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, AI'nın yalnızca ne yaptığı değil, aynı zamanda ne kadar geniş bir alanda işlev gösterebildiğini de açıklamaya yardımcı olur. Literatürde en yaygın kabul gören AI sınıflandırması Tablo 1'de sunulmuştur. Dar AI, belirli bir görevi yerine getirmek üzere tasarlanmış sistemleri ifade eder ve günümüzde en yaygın kullanıma sahip AI türüdür. Bu tür sistemler, sesli asistanlar, öneri motorları ve görüntü tanıma yazılımları gibi belirli görevlerde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlar. Ancak bu sistemler, kendi görev alanlarının dışına çıkamaz ve esnek öğrenme yeteneğine sahip değildir. Dolayısıyla dar

AI, insan zekâsının tüm yönlerini taklit etme kapasitesinden yoksun olup, yalnızca önceden tanımlanmış etkinliklerde uzmanlaşır (Damar et al., 2024).

Tablo 1: AI türleri.

AI Türü	Temel Özellikleri	Kapsam / Yetkinlik
Dar AI	Tek bir göreve odaklanır; görev dışına çıkamaz	Günümüzde yaygın olarak kullanılıyor
Genel AI	Farklı alanlarda öğrenme ve akıl yürütme kapasitesine sahip olmayı hedefler	Henüz geliştirilmedi
Süper AI	İnsan zekâsını tüm alanlarda aşma potansiyeli olan teorik sistem	Teorik ve geleceğe yönelik

Diğer bir tür ise Genel AI (Artificial General Intelligence - AGI) olarak adlandırılır ve insan benzeri bilişsel yeteneklere sahip olması hedeflenen sistemleri kapsar. Genel AI, yalnızca tek bir görevi yerine getirmekle kalmayıp, farklı bağlamlarda öğrenebilme, uyum sağlayabilme ve çözüm üretebilme kapasitesine sahiptir. Günümüzde AGI, henüz pratikte gerçekleştirilmemiş olsa da araştırma camiasında geleceğin hedefi olarak kabul edilmektedir. AGI üzerine yapılan çalışmalar, AI'nın yalnızca teknik bir araç değil, aynı zamanda bilişsel kapasitesi yüksek bir sistem olarak nasıl gelişebileceği konusunda önemli tartışmalar yaratmaktadır (Triguero et al., 2024).

Üçüncü tür ise Süper AI (Artificial Super Intelligence ASI)'dir. Bu tür, teorik olarak insan zekâsını her alanda aşabilen sistemleri ifade eder. Problem çözme, yaratıcılık, sosyal etkileşim ve duygusal anlayış gibi alanlarda insan kapasitesini geçebilecek bir zekâ seviyesidir. ASI, hâlâ kuramsal ve spekülatif bir kavram olarak ele alınmakla birlikte, bu alandaki olası gelişmeler hem bilimsel hem de etik açıdan ciddi tartışmalara yol açmaktadır. Böyle bir zekânın varlığı, kontrol, sorumluluk ve güvenlik gibi konularda yeni düzenlemeler gerektirebilir (Ang et al., 2023).

Yapay Zekâ Yaklaşımları ve Yöntemleri

AI sistemlerinin tasarımında kullanılan temel yaklaşımlar, problem çözmeden öğrenmeye kadar geniş bir metodolojik çeşitliliğe sahiptir. Bunların başında ANN, bulanık mantık sistemleri, genetik algoritmalar ve hibrit sistemler gelmektedir (Tablo 2). ANN, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alınarak geliştirilen paralel işlem modelleri olup, çok katmanlı yapıları sayesinde büyük veri setlerinden öğrenerek karmaşık örüntüleri tanıyabilir, tahmin yapabilir ve sınıflandırma görevlerinde yüksek başarı gösterir; özellikle görüntü işleme, ses tanıma ve biyoinformatik alanlarında kritik bir rol oynar. Bulanık Mantık Sistemleri ise belirsizlik ve kesin olmayan

verilerle etkin şekilde çalışabilme kabiliyeti sayesinde insan zihnindeki muğlaklıkları yansıtarak kontrol sistemlerinde, karar destek araçlarında ve otomatikleştirilmiş sistemlerde önemli avantaj sağlar; örneğin robotik sistemlerin yönetimi ve çevresel belirsizlik içeren kontrol problemlerinde etkili olur (Autsou et al., 2025). Genetik Algoritmalar ve Evrimsel Hesaplama, doğal seçilim ve biyolojik evrim prensiplerinden esinlenerek optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiş olup, parametre arayışı ve yapı optimizasyonu gibi görevlerde özellikle faydalıdır; ayrıca evrimsel derin öğrenme yaklaşımları, hiper parametre optimizasyonunu otomatikleştirerek insan uzmanlığını ve hesaplama sürecini iyileştirmeyi hedefler (Brzęk et al., 2025; Li et al., 2024; Zadeh, 1977). Hibrit Sistemler ise ANN, bulanık mantık ve genetik algoritmalar gibi yöntemleri bir araya getirerek her bir yaklaşımın güçlü yönlerini bütünleştirir; örneğin "Genetic Neuro Fuzzy" sistemler, sinir ağlarının öğrenme kapasitesi ile bulanık mantığın belirsizlik yönetimini entegre ederek hem performans hem de yorumlanabilirlik kazanımı sağlar (Al-Nima et al., 2021).

Tablo 2: AI yöntemleri ve özellikleri.

Yöntem	**Açıklama**
Yapay Sinir Ağları (ANN)	Veri setlerinden öğrenerek örüntüleri tanır ve sınıflandırmada başarılıdır.
Bulanık Mantık Sistemleri	Belirsiz verilerle karar ve kontrol süreçlerini destekler.
Genetik Algoritmalar / Evrimsel Hesaplama	Optimizasyon problemlerini çözer ve sinir ağlarında faydalıdır.
Hibrit Sistemler	Yöntemlerin güçlü yönlerini birleştirir.

UYGULAMA ALANLARI

AI, farklı problem tiplerine özgü yöntemler geliştirerek hem kuramsal derinlik hem de pratik uygulama potansiyeli sunar. Problem Çözme ve Arama Teknikleri, deterministik oyunlardan optimizasyon problemlerine kadar geniş bir yelpazede uygulanır ve en uygun çözümü bulmaya odaklanır. Uzman Sistemler ise belirli bir alanın bilgisini modelleyerek kullanıcıya mantıklı öneriler sunar ve tıp, mühendislik ile hukuk gibi kritik karar süreçlerinde güvenilir destek sağlar. Bu da AI'nın sadece veri işleyen bir araç olmanın ötesine geçip, karmaşık ve uzmanlık gerektiren alanlarda insan kararlarını güçlendiren stratejik bir teknoloji hâline gelmesini mümkün kılar (Casal-Guisande et al., 2022). Planlama ve Karar Destek Sistemleri, yapay ajanların hedeflerine ulaşmasını sağlar ve lojistik, üretim ile proje yönetiminde kaynak kullanımını optimize eder. Bu sistemler, büyük veri analizleri ve simülasyonlar kullanarak en verimli stratejileri belirleyebilir, maliyetleri düşürebilir ve süreçlerin sürekliliğini garanti altına alabilir. Ayrıca, belirsizlik ve değişken koşullar altında bile hızlı ve tutarlı kararlar

alınmasına olanak tanır, böylece işletmelerin rekabet gücünü artırır ve operasyonel verimliliği yükseltir (Wertheim & Brafman, 2025). Robotik ve Otonom Sistemler, çevreyi algılar, karar verir ve bağımsız hareket eder; derin pekiştirmeli ve taklit öğrenme yöntemleri sayesinde karmaşık görevleri başarıyla yerine getirir. Bu da AI'nın fiziksel dünyada uygulanabilirliğini artırarak, endüstriyel otomasyondan ulaşım ve lojistiğe, tarımdan sağlık hizmetlerine kadar pek çok alanda verimlilik ve güvenliği yükseltmesini sağlar. Aynı zamanda, insan müdahalesine olan ihtiyacı azaltarak riskli veya tekrarlayan görevlerin daha güvenli ve tutarlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır (Tai et al., 2016) (Peng, 2024). Algılama Sistemleri, görme ve konuşma tanıma gibi yeteneklerle insan-makine etkileşimini geliştirir ve makinelerin çevresini daha iyi anlamasını sağlar. Bu sayede, kullanıcıların doğal yollarla makinelerle iletişim kurması mümkün hâle gelir ve etkileşim deneyimi daha sezgisel ve verimli olur. ML ve Veri Analizi ise veri odaklı öğrenme süreçleri sayesinde büyük veri üzerinden stratejik kararları destekler, kalıpları ve eğilimleri ortaya çıkarır ve geleceğe yönelik tahminlerin doğruluğunu artırır. Bu da AI sistemlerinin hem operasyonel süreçlerde hem de stratejik planlamada etkin bir şekilde kullanılabilmesini sağlar (Goel et al., 2023). Bu temel uygulama alanları ve işlevleri, Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3: AI uygulama alanları ve temel işlevleri.

Uygulama Alanı	**Temel İşlevi**
Problem çözme ve arama teknikleri	Arama algoritmaları durum uzayında gezerek en uygun çözümü bulmaya odaklanır ve klasik AI problemlerinde temel rol oynar.
Uzman sistemler	Belirli bir alanın uzman bilgisini modelleyen bilgi tabanları oluşturur. Çıkarım motorlarıyla çalışarak kullanıcıya mantıklı öneriler ve kararlar sunar.
Planlama ve karar destek sistemleri	Yapay ajanlar hedeflerini tanımlar ve bu hedeflere ulaşmak için en uygun eylem serilerini çıkarır.
Robotik ve otonom sistemler	Derin pekiştirmeli öğrenme ve taklit öğrenme yöntemleri, karmaşık navigasyon ve etkileşim görevlerini gerçekleştirir.
Algılama sistemleri	Bilgisayarla görme ve konuşma tanıma alanlarında kullanılır.
ML ve veri analizi	Sınıflandırma, kümeleme, regresyon ve anomali tespiti gibi görevlerde veri odaklı öğrenme yöntemlerini kullanır.

Dilbilgisi kontrolü ve model tanıma uygulamaları AI'nın günlük yaşamda sağladığı önemli faydaları gösterir. Dilbilgisi kontrol yazılımları kullanıcıların metinlerini otomatik analiz ederek hataları düzeltir ve daha doğru iletişim sağlar (Du, 2021). Model tanıma endüstride kalite kontrol ve görsel veri analizinde yaygın şekilde kullanılır. Üretim süreçlerinde hatalı ürünlerin tespit edilmesi, verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi AI sayesinde daha hızlı ve güvenilir hâle gelir. Tıpta ise AI, hastalık teşhisi

ve tedavi planlamasında kritik rol oynar. Görüntü işleme ve ML teknikleri ile tıbbi görüntüler analiz edilerek hızlı ve doğru tanı konabilir, böylece sağlık hizmetlerinin etkinliği artar, insan hatası minimize edilir ve hasta bakım kalitesi yükselir (Houssein et al., 2025).

YAPAY ZEKANIN TEMEL BİLEŞENLERİ

Veri ve Bilgi Yönetimi

AI sistemlerinin etkin ve güvenilir çalışabilmesi için veri ve bilgi yönetimi titizlikle uygulanmalıdır. AI modelleri neredeyse tamamen veriye dayalı çalıştığından, yüksek kaliteli, temiz, etiketlenmiş ve erişilebilir veri sağlanmadan doğru sonuç üretilemez. Bu nedenle veri yönetişimi, verinin kaynağı, işlenme biçimi, saklanma standartları ve erişim yetkilerinin açık bir şekilde belirlenmesini zorunlu kılar. Veri yönetimi süreci, yalnızca veri toplamakla sınırlı kalmamalı; veri kalite kontrolü, güvenlik, etik uyum ve yasal gerekliliklerle uyumlu bir biçimde yürütülmelidir. Etkili veri yönetişimi, AI uygulamalarında yanlılık, gizlilik ihlalleri ve hatalı karar risklerini minimize ederek sistemlerin güvenilirliğini ve şeffaflığını artırmalıdır. Bu bağlamda, veri yönetişimi yalnızca teknik bir gereklilik değil, AI sistemlerinin güvenilirliği ve şeffaflığı için de vazgeçilmez bir süreç olarak ele alınmalıdır (Pahune et al., 2025). Bu çerçevede, metadata yönetimi de titizlikle uygulanmalıdır. Metadata, verinin kendisi hakkında bilgi sağlayan "veri hakkında veri" olarak tanımlanır ve veriye erişebilirliğini, sınıflandırılmasını, yeniden kullanılabilirliğini ve doğrulanabilirliğini garanti eder. AI destekli metadata sistemleri, otomatik etiketleme, içerik sınıflandırma ve bağlamsal açıklamalar gibi gelişmiş işlevler sunmalı; böylece veri setleri etkin bir şekilde aranabilir, kategorize edilebilir ve yeniden işlenebilir hâle gelmelidir. Büyük ve heterojen veri havuzlarının organizasyonu ve analiz süreçleri, AI ile zenginleştirilmiş metadata yönetimi sayesinde daha hızlı ve hatasız yürütülmeli; bu uygulama, AI modellerinin öğrenme kapasitesini ve performans tutarlılığını artırmalıdır. Metadata kalitesinin yükseltilmesi, veri odaklı AI uygulamalarında güvenilirlik ve doğruluk için zorunlu bir gerekliliktir (Yang et al., 2025).

Yüksek kaliteli veri eksiksiz, doğru ve güncel olmalıdır. Verinin bütünlüğü ve kalitesi sağlanırken teknik gerekliliklerle birlikte etik ve yasal standartlara da uyulmalıdır. Veri yönetimi yalnızca veri kullanımını düzenlemekle kalmamalı, sürecin her aşamasında verinin güvenli, etik ve yasalara uygun şekilde yönetilmesini garanti etmelidir (Pahune et al., 2025). Veri etkililiği, veri güvenliği, kalite kontrolleri, yasal uyumluluk ve etik standartlar gibi alanlarda güçlü bir yönetişim yapısı, AI uygulamalarının toplumsal kabulünü ve başarısını doğrudan etkiler. Bu nedenle, veri ve bilgi yönetimi AI'nın sadece teknik altyapısı değil, aynı zamanda toplumsal ve

etik sorumluluk çerçevesinde sürdürülebilir bir teknoloji stratejisi olarak da ele alınmalıdır (L. Chen et al., 2025; Govlab & Datatank, 2025).

Algoritmalar ve Modeller

AI'nın temel bileşenlerinden algoritmalar ve modeller, bir sistemin nasıl öğrendiğini, genelleme yaptığını ve karar verdiğini belirler. Algoritma, belirli bir görevi adım adım gerçekleştiren komutlar kümesidir ve bir sistemin problemi çözmesi veya girdiden çıktıya ulaşması için izlediği prosedürü tanımlar. AI'da algoritmalar veriye dayalı öğrenme ve model oluşturma süreçlerinin temelini oluşturur. Büyük veri kümeleri üzerinden örüntüler öğrenilir ve farklı örneklere uygulanarak çıktılar üretilir. Algoritmalar tek başına karar veremez ve modelin öğrenme şeklini tanımlar. Doğru seçilmiş bir algoritma modelin başarısını doğrudan etkiler (Krzywanski et al., 2024; Sarker, 2022). Model kavramı, algoritmanın veriler üzerinde çalışması sonucu ortaya çıkan yapıyı temsil eder. Bir AI modeli, algoritmanın verilerden öğrendiği bilgi yapısıdır ve yeni verilere uygulandığında çıktılar üretir. Model, görüntü tanıma, dil anlama veya öneri sistemleri gibi görevlerde belirli davranışları sergileyen matematiksel bir fonksiyondur. Modelin kapasitesi ve yapısı kullanılan algoritmaya bağlıdır; klasik algoritmalarla oluşturulan modeller genellikle basit ve açıklanabilir örüntüler yakalarken derin öğrenme yaklaşımları karmaşık yapılarla çalışabilir. Derin sinir ağları, büyük veri setlerinden yüksek düzey özellikler çıkarma ve çok katmanlı öğrenme yapıları geliştirme yeteneği sayesinde karmaşık görevlerde yüksek performans gösterir. Ancak bu karmaşıklık, modelin şeffaflığını azaltabilir. Açıklanabilir AI yöntemleri, modelin karar süreçlerini anlaşılır hâle getirerek kullanıcı güvenini artırır ve etik ile güvenlik gereksinimlerini destekler (Armenteros-Cosme et al., 2025).

Algoritmalar ve modeller birlikte bir AI sisteminin öğrenme biçimini ve uygulama yeteneğini belirler. Derin öğrenme, destek vektör makineleri ve karar ağaçları gibi yöntemler farklı algoritmik yaklaşımlar ve model türleridir ve her biri belirli problem türlerine uygundur. AI araştırmalarında algoritma seçimi ve model tasarımı performans ve güvenilirlik açısından kritik olup doğru kombinasyon, hatırlama, genelleme ve tahmin yeteneklerini doğrudan etkiler.

YAPAY ZEKÂNIN TOPLUMSAL ETKİLERİ VE ETİK BOYUT

AI, sağladığı büyük faydaların yanında önemli etik ve teknik zorluklar da içermektedir. Veri gizliliği, model önyargısı ve sistem anlaşılabilirlik, AI uygulamalarında sürekli tartışma konusu olmalıdır. Bu riskler sağlık, savunma ve finans gibi kritik karar verme sistemlerinde daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle açıklanabilir AI yaklaşımları geliştirilerek sistemlerin şeffaflığı ve kullanıcı güveni artırılmalıdır. Teknik açıdan da

sınırlamalar göz ardı edilmemelidir. ANN'nın eğitimi yüksek işlem gücü gerektirir ve bu durum maliyet ile erişilebilirlik üzerinde doğrudan etki yapar. Evrimsel algoritmalar yoğun hesaplama gereksinimi nedeniyle büyük veri veya karmaşık optimizasyon problemlerinde sınırlamalarla karşılaşabilir. Bulanık mantık sistemleri ise parametre ayarı ve ölçeklenebilirlik konularında zorluklar içerebilir. Bu nedenle AI sistemlerinin tasarımı ve uygulanması, etik ve teknik riskler göz önünde bulundurularak dikkatle yürütülmelidir (Ojha et al., 2019). Hibrit yaklaşımlar, örneğin Genetik Neuro Fuzzy sistemler, AI teknolojilerinde performans ve yorumlanabilirliğin dengelenmesi açısından önemli bir potansiyel taşır. Bu yöntemler, farklı AI tekniklerinin güçlü yönlerini bir araya getirerek hem doğruluk hem de şeffaflık kazanımlarını mümkün kılar. Hibrit sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması, AI modellerinin karmaşıklığını azaltırken kullanıcı güvenini artırabilir ve etik ile yasal gerekliliklerin karşılanmasını destekler. Bu nedenle araştırmacılar ve uygulayıcılar hibrit yaklaşımların tasarımında performansın yanı sıra yorumlanabilirlik ve etik uyum kriterlerini de dikkate almalıdır (Al-Nima et al., 2021). Evrimsel derin öğrenme yöntemleri, otomatik model optimizasyonu sağlayarak daha genel ve güçlü AI sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır. Bu yaklaşımlar, insan uzmanlığına olan bağımlılığı azaltırken model performansını ve uyarlanabilirliğini artırır. Aynı zamanda algoritma ve model tasarımında tutarlılığı ve verimliliği destekleyerek, karmaşık problemlere uygulanabilir ve güvenilir çözümler sunar. Bu nedenle araştırmacılar ve uygulayıcılar, evrimsel derin öğrenme tekniklerini geliştirirken hem performans hem de etik ve güvenlik kriterlerini göz önünde bulundurmalıdır (Xiao et al., 2020). Etik ilkeler, algoritmik şeffaflık ve sorumlu AI geliştirme çerçeveleri, AI araştırmacıları ve uygulayıcıları için merkezi bir odak olmaya devam etmektedir. Bu ilkeler, AI sistemlerinin güvenilir, adil ve kullanıcıya açıklanabilir şekilde tasarlanmasını garanti eder ve etik, teknik ve yasal gerekliliklerin bütünleşik şekilde uygulanmasını destekler.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

AI sistemleri, yalnızca teknik başarıları ile değil, aynı zamanda toplumsal, etik ve yönetişim boyutlarıyla da değerlendirilmeli ve uygulanmalıdır. Bu sistemlerin performansı, kullanılan veri kalitesine, algoritma seçimine ve model tasarımının doğruluğuna doğrudan bağlıdır. Hatalı veya eksik veri, uygunsuz model seçimi ve algoritmik kısıtlamalar, AI sistemlerinin yanlış ya da yanıltıcı çıktılar üretmesine yol açabilir ve bu durum, sistemlerin güvenilirliğini ciddi şekilde etkiler. Dolayısıyla AI uygulamalarının geliştirilmesi ve işletilmesi sürecinde veri bütünlüğü, doğruluk, güncellik ve çeşitlilik gibi kriterlerin titizlikle sağlanması zorunludur. Bu bağlamda, veri gizliliği, güvenliği ve etik uyum, AI

sistemlerinin sürdürülebilir kullanımını güvence altına alan kritik unsurlar olarak öne çıkar. AI sistemlerinin insan-makine iş birliği çerçevesinde tasarlanması, bu teknolojilerin sağladığı faydayı maksimize eder. İnsan karar vericilerle etkileşimli çalışabilen AI, yalnızca otomasyon ve öngörü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karar süreçlerinin şeffaflığını artırır ve kullanıcı güvenini güçlendirir. Sistemlerin anlaşılabilirliği ve önyargı yönetimi, özellikle kritik alanlarda teknolojinin güvenilirliğini doğrudan etkileyen temel faktörlerdir. Bu nedenle AI uygulamalarının tasarımında, teknik performans ile etik, sosyal ve yasal sorumlulukların dengelenmesi zorunlu bir yaklaşım olarak benimsenmelidir. Bu bütüncül perspektif, teknolojik yeniliklerin toplum tarafından kabulünü kolaylaştırırken, AI'nın sorumlu ve güvenilir bir şekilde kullanılmasını destekler.

Gelecek perspektifinde, AI araştırmaları daha gelişmiş algoritmalar, yüksek güvenilirlikli modeller ve kapsamlı veri yönetim stratejileri üzerine yoğunlaşacaktır. Model şeffaflığının artırılması, algoritmik kararların açıklanabilir hâle getirilmesi ve etik ilkelerle uyumlu sistem tasarımı, AI'nın sürdürülebilir kullanımının temel koşulları olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca hibrit ve evrimsel öğrenme yaklaşımları, algoritmaların ve modellerin hem performansını artırma hem de yorumlanabilirliğini güçlendirme potansiyeline sahiptir. AI sistemlerinin başarılı şekilde uygulanması, yalnızca teknik yeterlilikle sınırlı olmayıp, veri yönetimi, etik standartlar ve yönetişim süreçlerinin eş zamanlı olarak entegre edilmesini gerektirir. Bu bütüncül yaklaşım, AI teknolojilerinin toplumda güvenilir, etkili ve sürdürülebilir biçimde kullanılmasına imkân sağlayacak ve gelecekteki uygulamalar için sağlam bir temel oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

Al-Nima, R. R., Abdullah, F. S., & Hamoodi, A. N. (2021). *Design a Technology Based on the Fusion of Genetic Algorithm, Neural network and Fuzzy logic*.

Albarracin, M., Hipólito, I., Tremblay, S. E., Fox, J. G., René, G., Friston, K., & Ramstead, M. J. D. (2024). Designing Explainable Artificial Intelligence with Active Inference: A Framework for Transparent Introspection and Decision-Making. *Communications in Computer and Information Science*, *1915 CCIS*, 123–144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47958-8_9

Ang, T. L., Choolani, M., See, K. C., & Poh, K. K. (2023). The rise of artificial intelligence: addressing the impact of large language models such as ChatGPT on scientific publications. *Singapore Medical Journal*, *64*(4), 219–221. https://doi.org/10.4103/singaporemedj.SMJ-2023-055

Arévalo-Royo, J., Latorre-Biel, J.-I., & Flor-Montalvo, F.-J. (2025). Cognitive Systems and Artificial Consciousness: What It Is Like to Be a Bat Is Not the Point. *Metrics*, *2*(3), 11. https://doi.org/10.3390/metrics2030011

Armenteros-Cosme, P., Arias-González, M., Alonso-Rollán, S., Márquez-Sánchez, S., & Carrera, A. (2025). Advancements in Artificial Intelligence and Machine Learning for Occupational Risk Prevention: A Systematic Review on

Predictive Risk Modeling and Prevention Strategies. *Sensors*, *25*(17). https://doi.org/10.3390/s25175419

Autsou, S., Dunajeva, O., Pentel, A., Shvets, O., & Roosileht, M. (2025). Application of Fuzzy Logic for Collaborative Robot Control. *Electronics (Switzerland)*, *14*(20). https://doi.org/10.3390/electronics14204029

Borghoff, U. M., Bottoni, P., & Pareschi, R. (2025). Human-artificial interaction in the age of agentic AI: a system-theoretical approach. *Frontiers in Human Dynamics*, *7*. https://doi.org/10.3389/fhumd.2025.1579166

Brzęk, B., Probierz, B., & Kozak, J. (2025). Exploration-Driven Genetic Algorithms for Hyperparameter Optimisation in Deep Reinforcement Learning. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(4), 1–33. https://doi.org/10.3390/app15042067

Carvalho, W., & Lampinen, A. (2025). *Naturalistic Computational Cognitive Science: Towards generalizable models and theories that capture the full range of natural behavior*. 1–55. http://arxiv.org/abs/2502.20349

Casal-Guisande, M., Comesaña-Campos, A., Pereira, A., Bouza-Rodríguez, J. B., & Cerqueiro-Pequeño, J. (2022). A Decision-Making Methodology Based on Expert Systems Applied to Machining Tools Condition Monitoring. *Mathematics*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/math10030520

Chen, C., Wu, D., & Liu, Y. (2022). Recent advances of AI for engineering service and maintenance. *Autonomous Intelligent Systems*, *2*(1), 2–4. https://doi.org/10.1007/s43684-022-00038-y

Chen, L., Gao, C., Leung, A., & Wang, X. (2025). When Assurance Undermines Intelligence: The Efficiency Costs of Data Governance in AI-Enabled Labor Markets. *Papers*, 1–57. https://econpapers.repec.org/RePEc:arx:papers:2511.01923

Damar, M., Özen, A., Çakmak, Ü. E., Özoğuz, E., & Erenay, F. S. (2024). Super AI, Generative AI, Narrow AI and Chatbots: An Assessment of Artificial Intelligence Technologies for The Public Sector and Public Administration. *Journal of AI*, *8*(1), 83–106. https://doi.org/10.61969/jai.1512906

Determinants, S. (2019). Ethics guidelines for trustworthy AI. In *European Commission*. https://doi.org/10.2759/346720

Du, Y. (2021). Intelligent Error Correction of College English Spoken Grammar Based on the GA-MLP-NN Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/7371416

Farooq, A., & Iqbal, K. (2025). Towards Transparent Ethical AI: A Roadmap for Trustworthy Robotic Systems. *Proceedings of 2025 3rd International Conference on Robotics, Control and Vision Engineering, RCVE 2025*, 41–46. https://doi.org/10.1145/3747393.3747400

Garicano-Mena, J., & Santos, M. (2025). Nature–Inspired Metaheuristic Optimization for Control Tuning of Complex Systems. *Biomimetics*, *10*(1), 1–20. https://doi.org/10.3390/biomimetics10010013

Goel, A., Goel, A. K., & Kumar, A. (2023). The role of artificial neural network and machine learning in utilizing spatial information. *Spatial Information Research*, *31*(3), 275–285. https://doi.org/10.1007/s41324-022-00494-x

Govlab, C. T., & Datatank, T. (2025). *Data Stewardship Decoded Mapping Its Diverse Manifestations and Emerging Relevance at a time of AI*. 1–10.

Han, S., Wang, M., Zhang, J., Li, D., & Duan, J. (2024). A Review of Large Language Models: Fundamental Architectures, Key Technological Evolutions, Interdisciplinary Technologies Integration, Optimization and Compression

Techniques, Applications, and Challenges. *Electronics (Switzerland)*, *13*(24). https://doi.org/10.3390/electronics13245040

Houssein, E. H., Gamal, A. M., Younis, E. M. G., & Mohamed, E. (2025). Explainable artificial intelligence for medical imaging systems using deep learning: a comprehensive review. In *Cluster Computing* (Vol. 28, Issue 7). Springer US. https://doi.org/10.1007/s10586-025-05281-5

Husbands, P., Shim, Y., Garvie, M., Dewar, A., Domcsek, N., Graham, P., Knight, J., Nowotny, T., & Philippides, A. (2021). Recent advances in evolutionary and bio-inspired adaptive robotics: Exploiting embodied dynamics. *Applied Intelligence*, *51*(9), 6467–6496. https://doi.org/10.1007/s10489-021-02275-9

Jakšić, Z., Devi, S., Jakšić, O., & Guha, K. (2023). A Comprehensive Review of Bio-Inspired Optimization Algorithms Including Applications in Microelectronics and Nanophotonics. *Biomimetics*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/biomimetics8030278

Krzywanski, J., Sosnowski, M., Grabowska, K., Zylka, A., Lasek, L., & Kijo-Kleczkowska, A. (2024). Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization—A Review. *Materials*, *17*(14). https://doi.org/10.3390/ma17143521

Lake, B. M., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Gershman, S. J. (2017). Building machines that learn and think like people. *Behavioral and Brain Sciences*, *40*, 1–72. https://doi.org/10.1017/S0140525X16001837

Li, N., Ma, L., Yu, G., Xue, B., Zhang, M., & Jin, Y. (2024). Survey on Evolutionary Deep Learning: Principles, Algorithms, Applications, and Open Issues. *ACM Computing Surveys*, *56*(2), 1–34. https://doi.org/10.1145/3603704

Longo, L., Brcic, M., Cabitza, F., Choi, J., Confalonieri, R., Ser, J. Del, Guidotti, R., Hayashi, Y., Herrera, F., Holzinger, A., Jiang, R., Khosravi, H., Lecue, F., Malgieri, G., Páez, A., Samek, W., Schneider, J., Speith, T., & Stumpf, S. (2024). Explainable Artificial Intelligence (XAI) 2.0: A manifesto of open challenges and interdisciplinary research directions. *Information Fusion*, *106*(February), 102301. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102301

McCarthy, J. (1974). Artificial intelligence: a paper symposium. *Artificial Intelligence*, *5*(3), 317–322. https://doi.org/10.1016/0004-3702(74)90016-2

McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence. *AI Magazine*, *27*(4), 12–14.

McCulloch, W. S., & Pitts, W. H. (2017). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Systems Research for Behavioral Science: A Sourcebook*, *5*, 93–96. https://doi.org/10.7551/mitpress/12274.003.0011

Mitchell, M. (2021). *Why AI is harder than we think*. 3–3. https://doi.org/10.1145/3449639.3465421

Morris, M. X., Fiocco, D., Caneva, T., Yiapanis, P., & Orgill, D. P. (2024). Current and future applications of artificial intelligence in surgery: implications for clinical practice and research. *Frontiers in Surgery*, *11*(May). https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1393898

Ojha, V., Abraham, A., & Snášel, V. (2019). Heuristic design of fuzzy inference systems: A review of three decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *85*(December 2018), 845–864. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.010

Pahune, S., Akhtar, Z., Mandapati, V., & Siddique, K. (2025). The Importance of AI Data Governance in Large Language Models. *Big Data and Cognitive Computing*, *9*(6), 1–44. https://doi.org/10.3390/bdcc9060147

Peng, G. (2024). Recent Advances in Trajectory Planning and Object Recognition. *Sensors*, *24*, 4–7. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24144509

Sarker, I. H. (2022). AI-Based Modeling: Techniques, Applications and Research Issues Towards Automation, Intelligent and Smart Systems. *SN Computer Science*, *3*(2), 1–20. https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x

Schmidhuber, J. (2022). *Annotated History of Modern AI and Deep Learning*. *22*, 1–75. http://arxiv.org/abs/2212.11279

Shahzad, K., Zhou, X., & Yan, S. (2017). Covert Communication in Fading Channels under Channel Uncertainty. *IEEE Vehicular Technology Conference*, *2017-June*. https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108525

Somvanshi, S., Islam, M. M., Javed, S. A., Chhetri, G., Islam, K. S., Chowdhury, T. I., Polock, S. B. B., Dutta, A., & Das, S. (2025). A Review on Influx of Bio-Inspired Algorithms: Critique and Improvement Needs. *Journal of the ACM*, *37*(4). http://arxiv.org/abs/2506.04238

Tai, L., Zhang, J., Liu, M., Boedecker, J., & Burgard, W. (2016). *A Survey of Deep Network Solutions for Learning Control in Robotics: From Reinforcement to Imitation*. *14*(8), 1–19. http://arxiv.org/abs/1612.07139

Toosi, A., Bottino, A. G., Saboury, B., Siegel, E., & Rahmim, A. (2021). A Brief History of AI: How to Prevent Another Winter (A Critical Review). *PET Clinics*, *16*(4), 449–469. https://doi.org/10.1016/j.cpet.2021.07.001

Triguero, I., Molina, D., Poyatos, J., Del Ser, J., & Herrera, F. (2024). General Purpose Artificial Intelligence Systems (GPAIS): Properties, definition, taxonomy, societal implications and responsible governance. *Information Fusion*, *103*(July 2023), 102135. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102135

Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Computing Machinery and Intelligence*, *49*, 433–460.

Wertheim, O., & Brafman, R. I. (2025). Model-Based AI planning and Execution Systems for Robotics. *Arxiv*, 1–17.

Xiao, X., Yan, M., Basodi, S., Ji, C., & Pan, Y. (2020). *Efficient Hyperparameter Optimization in Deep Learning Using a Variable Length Genetic Algorithm*. http://arxiv.org/abs/2006.12703

Yang, W., Fu, R., Amin, M. B., & Kang, B. (2025). The Impact of Modern AI in Metadata Management. *Human-Centric Intelligent Systems*, *5*(3), 323–350. https://doi.org/10.1007/s44230-025-00106-5

Zadeh, L. A. (1977). *Theory of Fuzzy Sets*.

Zhang, Y. (2023). *A Historical Interaction Between Artificial Intelligence and Philosophy*. 195–214.

Zheng, W., Liu, M., Liu, C., & Wang, D. (2023). Future AI and Robotics: Visual and Spatial Perception Enhancement and Reasoning. *Electronics (Switzerland)*, *12*(23), 10–13. https://doi.org/10.3390/electronics12234787

Zhu, J., Zhang, B., Song, W., Zhang, X., Wang, L., Yin, B., Zhu, F., Yu, C., & Li, H. (2016). A literature review on the role of MIR-370 in disease. *Gene Reports*, *4*(1), 37–44. https://doi.org/10.1016/j.genrep.2016.02.005

PIC16F877A ile PWM Tabanlı Frekans Üretimi ve LCD, UART ve Osiloskop Üzerinden İzlenmesi

Serdar YILMAZ[1]

1- Öğr.Gör.Dr.; İstanbul Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik Teknolojisi. serdar.yilmaz@iuc.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4316-3737

ÖZET

Bu bölümde, PIC16F877A mikrodenetleyicisi kullanılarak donanımsal PWM tabanlı ayarlanabilir bir frekans üreteci tasarlanmış ve üretilen sinyalin temel parametreleri frekans ve çevrim süresi (duty cycle) hem LCD ekranda hem de UART üzerinden seri portta izlenebilir hâle getirilmiştir. PWM üretimi için PIC16F877A'nın CCP1 modülü etkinleştirilmiş, PWM periyodu Timer2–PR2 kaydı üzerinden ayarlanmış ve duty değeri 10-bit çözünürlükte kontrol edilmiştir. Kullanıcı etkileşimi, RA0–RA3 girişlerine bağlanan butonlar aracılığıyla sağlanmış; buton okuma işlemlerinde sıçrama (debounce) etkisini azaltmaya yönelik yazılımsal gecikme ve bırakma kontrolü uygulanmıştır. Frekans ve duty değerleri, sistem saat frekansı ve Timer2 önbölücü (prescaler) parametreleri dikkate alınarak hesaplanmış; elde edilen değerler 16×2 LCD üzerinde ve 9600 baud seri haberleşme üzerinden terminal çıktısı olarak gösterilmiştir. Çalışma Proteus ortamında simüle edilerek osiloskop/terminal doğrulamaları ile test edilmiş; PR2 ve duty ayarlarına bağlı olarak PWM sinyalinin kararlı biçimde üretildiği ve kullanıcı komutlarına hızlı yanıt verdiği gözlenmiştir. Bu yapı, test sinyali üretimi, motor sürme ve güç elektroniği gibi uygulamalar için düşük maliyetli ve anlaşılır bir temel örnek sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – PIC16F877a, Gömülü Sistemler, PWM, Frekans, Çevrim Süresi

GİRİŞ

Gömülü sistemlerde kare dalga/PWM sinyali üretimi; motor sürme, güç elektroniği, haberleşme ve test sinyali oluşturma gibi pek çok uygulamanın temelini oluşturur. Bu bölümde PIC16F877A mikrodenetleyicisinin CCP1 PWM birimi kullanılarak ayarlanabilir PWM frekansı ve duty-cycle üretilmiş; üretilen parametreler LCD (16×2) ve UART seri port üzerinden anlık olarak izlenmiştir. Uygulama Proteus ortamında simüle edilmiş, CCS C ile yazılım geliştirilmiştir.

PIC16F877A tabanlı bir PWM (Pulse Width Modulation) frekans üreteci tasarlarken iki ana grupta kaynaklar dikkate alınabilir (i) üretici dokümantasyonu (datasheet, referans el kitabı, uygulama notları/teknik bültenler) ve (ii) uygulama/öğretici kaynaklar (derleyici kılavuzları, simülasyon araçları ve ders kitapları). Bu bölümdeki çalışma; PWM'in donanımsal olarak Timer2 + CCP1 birimleri üzerinden üretilmesi, frekansın PR2 ile ayarlanması, duty-cycle'ın 10-bit çözünürlükle kontrol edilmesi ve sonuçların LCD ile UART üzerinden izlenmesi hedefleri doğrultusunda ilgili kaynaklara dayandırılmıştır.

PIC16F877A, eğitim ve prototipleme amaçlı uygulamalarda sık kullanılan bir 8-bit PIC ailesi üyesidir; Proteus gibi devre benzetim ortamları

ile birlikte CCS C derleyicisi kullanıldığında, donanım çevre birimlerini (Timer, CCP/PWM, USART vb.) hızlıca doğrulamak ve sistem davranışını gözlemek mümkün olur (Microchip Technology Inc., 2003:68). Bu tür bir geliştirme akışında CCS'nin donanıma yakın C sözdizimi ve hazır yönergeleri (ör. seri haberleşmeyi tek satırla kuran tanımlar) geliştirme süresini kısaltırken, Proteus'un sanal ölçüm/terminal araçları da çıktının gözlemlenmesini kolaylaştırır (CCS, Inc., 2021:8). PWM üretimi özelinde PIC16F877A'nın CCP1 modülü Timer2 ile birlikte çalışarak ayarlanabilir frekansta PWM üretebilir. PWM periyodu Timer2 önbölücü (prescaler) ve PR2 yazmacı üzerinden belirlenir; ilgili temel bağıntı denklemi *PWM_Period* aşağıdaki Denklem (1)'de olduğu şekilde verilir (Microchip Technology Inc., 2003:68). CCP modülünün Capture/Compare/PWM olmak üzere üç temel çalışma kipine sahip olduğu ve PWM kipinde zaman tabanının Timer2 ile kurulduğu, Microchip'in CCP uygulama notlarında ayrıntılı biçimde açıklanır (Palmer, 1997:1).

$$PWM_Period = (PR2 + 1) \cdot 4 \cdot T_{OSC} \cdot TMR2_Prescale \quad (1)$$

Duty-cycle ayarı da CCPR1L ile DC1B bitlerinin birlikte kullanılmasıyla 10-bit çözünürlükte yapılır; datasheette PWM duty-cycle'ın yazmaçlara yüklenmesi ve eşdeğer hesap bağıntısı örneklenir (Microchip Technology Inc., 2003:69). CCP'nin PWM kipinde "duty güncellemesini PWM çevrimini bozmadan" yapmaya yönelik tamponlama yaklaşımı ve çevrim içi güncelleme mantığı Microchip teknik notlarında ayrıca vurgulanır (Microchip Technology Inc., 2020:1). Bu bilgiler, butonlarla çevrim zamanı (duty) arttırma/azaltma yapılan uygulamalarda hem çözünürlük seçimini hem de sayısal adım büyüklüğünü kontrol edilmesini sağlar (J. Morton, 2005).

Oluşturulan frekans ve duty bilgilerinin seri porttan izlenmesi için PIC16F877A'nın donanımsal USART birimi yaygın kullanılan yöntemdir. Asenkron seri iletişimde baud hızı SPBRG kaydedicisiyle ve hız bitleri ile ayarlanır (Garbutt, 2003:2). CCS C derleyicisi tarafından seri portun temel kurulumu düzenlenir ve *printf()* ile gönderim yapılır. CCS C derleyici bu, "hesaplanan değerleri düzenli aralıklarla terminale basma" yaklaşımını doğrudan destekler ve uygun makine kodunu oluşturabilir (CCS, Inc., 2021:8). LCD üzerinde izleme için endüstride fiili standart hâline gelmiş HD44780U komut seti ve 4-bit/8-bit veri yolu seçenekleri, gömülü sistemlerde karakter LCD kütüphanesi tarafından kolaylıkla sağlanır (Hitachi, 1999:1). Bu nedenle, PWM parametrelerinin (frekans/duty) aynı anda hem LCD'de hem seri portta gösterilmesi; kullanıcı arayüzü, hata ayıklama ve deneysel doğrulama açısından öğretici bir bütünlük sağlar (Mazidi, McKinlay ve Causey, 2008:1).

Malzeme ve Yöntemler

PIC16F877A'da PWM Üretimi (CCP1 + Timer2)

PIC16F877A üzerinde PWM üretimi için CCP (Capture/Compare/PWM) modülü kullanılır. CCP1'in PWM çıkışı RC2/CCP1 pinindedir. PWM periyodu Timer2 üzerinden belirlenir ve Timer 2 sayıcısının kabiliyet ve kapasitesi altında control edilir.

PWM frekansı PIC mikrodenetleyicisinin sürüldüğü osilatör frekansına bağlı olarak aşağıdaki Denklem (2)'de olduğu gibi yazılabilir.

$$F_{PWM} = \frac{F_{OSC}}{4.\text{Prescaler}.(PR2+1)} \quad (2)$$

F_{osc}=20Mhz
Prescaler =16(*Timer2*: *T2_DIV_BY_16*)
PR2 değeri butonlardan gelen değerdir

Dolayısıyla PR2 arttıkça payda büyür ve frekans azalır.

Duty-Cycle (Görev Oranı) ve Çözünürlük

CCS C'de set_pwm1_duty(duty10) fonksiyonu PWM duty değerini 10-bit ölçekle ayarlar. Ancak Timer2 periyodu (PR2) değiştikçe erişilebilir duty üst sınırı da değişir. Uygulamada bu üst sınır aşağıda verilen Denklem (3)'te olduğu gibi hesaplanabilir.

$$Dutymax=4\cdot(PR2+1)-1 \quad (3)$$

Duty yüzdesi hesaplaması aşağıda verilen Denklem (4)'te olduğu gibi hesaplanabilir.

$$Duty(\%) = \frac{duty10}{Duty_{max}}.100 \quad (4)$$

Bu yapıda PR2 değiştiğinde duty10 sabit kalırsa duty yüzdesi de değişebilir. Uygulama bunu "duty10 değerini PR2'ye göre sınırlandırarak" kararlı çalıştırır. İleri geliştirme olarak frekans değişirken duty yüzdesinin sabit tutulması da eklenebilir.

Devre Elemanları ve Devre Şeması

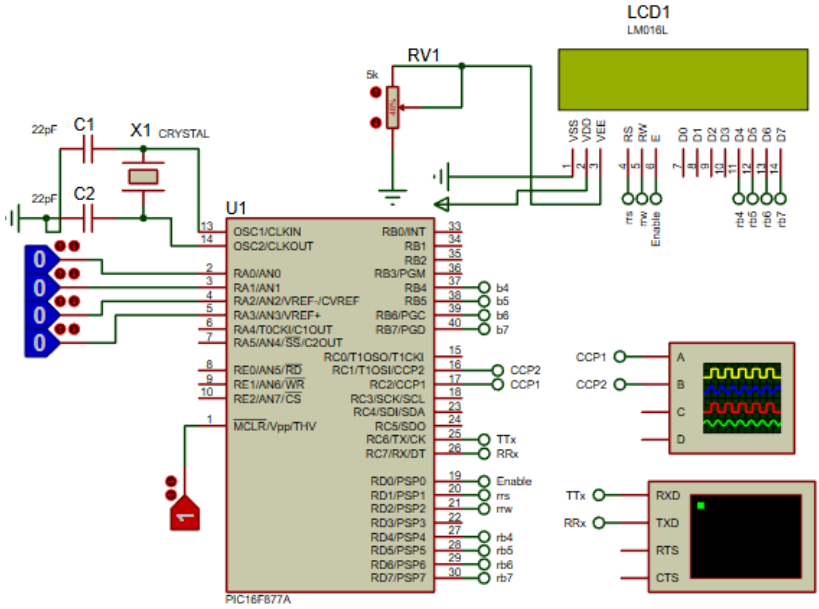
Devrenin kurulumu Proteus programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Devre elemanları gerçek hayatta olan karşılıkları bulunmaktadır. Bunlardan

bazıları görsel açıdan gerçek devre elamanlarından farklılık gösterebilir. Devre elemanları ve kullanım amaçları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Proteus Programı ve Seçilen Devre Elemanları

Malzeme	Açıklama
PIC16F877A	Mikrodenetleyici
20 MHz kristal + 2 adet kapasitör (22–33 pF)	Osilatör Elemanları
16×2 LCD (LM016)	LCD Ekran
4 adet buton (RA0–RA3 girişleri)	Giriş Anahtarları
Pull-up/pull-down dirençler	Gerçek Uygulama için Direnç
Virtual Terminal (UART izleme için)	Proteus Sanal Terminal
Osiloskop / Frequency Counter (PWM çıkışını doğrulamak için)	Proteus Sanal
LOGICSTATE	Dijital Anahtar (0-1)

Devreye ait şema, Şekil1'de verilmektedir. Devre üzerinde bulunan elemanlar doğrudan bağlantı veya etiket yöntem ile PIC16F877A mikrodenetleyici elemanına bağlanmıştır.



Şekil 1: PIC16F877 Proteus Devre Şeması

LOGICSTATE devre anahtarları mikrodenetleyiciye doğrudan bağlanmış ve bağlantılar RA0-RA3 pinlerinde görülmektedir. Etiket bağlantıları ise osiloskop, sanal seri port elemanı ve LCD'nin D portuna yapılan düzenlemelerinde kullanılmıştır.

B portunda RB4-RB7 etiketlenmiş olmakla birlikte herhangi bir eşleştirilme yapılmamıştır.

Proteus ortamında kurulan donanım tasarımında merkez bileşen olarak **PIC16F877A** seçilmiş ve mikrodenetleyicinin kararlı çalışması için saat kaynağı **20 MHz kristal** ile sağlanmıştır. Kristalin her iki ucuna uygun değerli kondansatörler eklenerek osilatör devresi tamamlanmış, MCLR bağlantısı gerçek fiziksel bir devre üzerinde uygulanacak ise pin girişine 10 kΩ civarında bir direnç ile +5 V'a çekilerek reset hattının gürültüye karşı güvenilir olması sağlanmalıdır. Devre genelinde +5 V besleme ve ortak toprak (GND) bağlantıları ortak olarak oluşturulmalıdır. Proteus devresinde LOGICSTATE devre elemanı ile HIGH (1) ve LOW (0) kolaylıkla sağlanabilmektedir. Şekil 1'de de PIC16F877A 1 numaralı ayak bağlantısında görülmektedir. Simülasyonda olası kararsızlıkları azaltmak amacıyla besleme hatlarında bypass/filtreleme yaklaşımı (pratikte 100 nF decoupling gibi) gözetilmiştir. PWM sinyalinin doğrulanabilmesi için PIC'in **CCP1 çıkışı olan RC2** pini osiloskop sanal ölçüm cihazlarına bağlanarak üretilen dalga şekli ve frekans değişimi anlık olarak gözlemlenebilir hâle getirilmiştir.

Kullanıcı etkileşimi için **RA0–RA3** pinlerine dört adet buton bağlanmış; bu butonlar frekansın (PR2 üzerinden) ve duty-cycle'ın (10-bit duty değeri üzerinden) artırılıp azaltılmasını sağlamaktadır. PortA'da dahili pull-up bulunmadığından, girişlerin "floating" kalmaması için buton hatlarına uygun **LOGICSTATE** anahtarlar eklenerek kararlı lojik seviye elde edilmiştir. Üretilen frekans ve duty bilgilerinin izlenmesi amacıyla **16×2 karakter LCD** 4-bit modda PortD'ye bağlanmış ve kontrast ayarı için LCD'nin V_{EE} pinine bir potansiyometre eklenmiştir. Ayrıca seri port üzerinden veri izlemesi için PIC'in **RC6 (TX)** ve **RC7 (RX)** pinleri Proteus **Virtual Terminal** bileşenine bağlanarak 9600 baud hızında UART çıktıları simülasyon sırasında doğrulanmıştır. Bu donanım kurgusu, PWM üretimi ile kullanıcı kontrolünü aynı sistem üzerinde birleştirirken, LCD ve seri port sayesinde ayarların anlık olarak takip edilmesine olanak tanımaktadır.

Yazılım Tasarımı

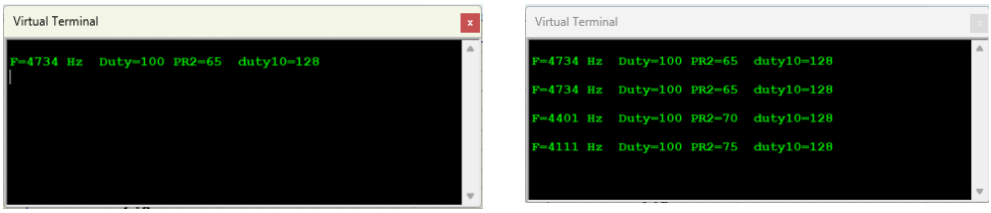
Yazılım tasarımında, PIC16F877A üzerinde PWM üretimi ve izleme işlevlerinin kararlı ve anlaşılır biçimde yürütülmesi için modüler bir yapı benimsenmiştir. Uygulama başlangıcında PortA üzerindeki buton girişlerinin doğru okunabilmesi amacıyla analog işlevler kapatılarak pinler dijital moda alınmış, ilgili yönlendirmeler TRIS ayarlarıyla tanımlanmıştır. PWM üretimi donanımsal olarak CCP1 modülü üzerinden gerçekleştirilmiş; Timer2, seçilen önbölücü (prescaler) değeri ile birlikte PR2 yazmacı (register) kullanılarak PWM periyodunu/frekansını belirleyecek şekilde yapılandırılmıştır. Frekans ayarı, kullanıcı butonlarıyla PR2'nin belirli adımlarla artırılıp azaltılması üzerinden yapılırken, duty-cycle kontrolü 10-bit çözünürlüklü duty değeri (duty10) değiştirilerek sağlanmıştır. PR2 değeri değiştiğinde erişilebilir duty

aralığı da değiştiğinden, duty değerinin geçerli üst sınıra taşmaması için PR2'ye bağlı bir sınırlandırma uygulanmış ve PWM güncellemesi tek bir noktadan yürütülmüştür.

Kullanıcı girişleri RA0–RA3 pinlerinden okunmuş ve buton sıçramalarının (debounce) PWM parametrelerinde hatalı artış/azalışa yol açmaması için kısa gecikme ve "buton bırakılana kadar bekleme" yaklaşımı kod içerisinde kullanılmıştır. Diğer taraftan Proteus simülasyon üzerinde donanım kurulurken kullanılan LOGICSTATE anahtarları olası sıçrama etkilerini ortadan kaldırmaktadır. Parametre değişikliği algılandığında PWM yapılandırması yeniden uygulanmış ve sistem durumu güncellenmiştir. İzleme amacıyla hesaplanan frekans ve duty bilgileri hem 16×2 LCD ekrana hem de UART üzerinden seri porta yazdırılmıştır. CCS C sürümünde printf() format ayrıştırmasının bazı durumlarda tek satırda çok sayıda değişkenle sorun çıkarabildiği göz önünde bulundurularak, seri port çıktısı pratikte daha güvenilir olacak şekilde gerektiğinde birden fazla printf() çağrısına bölünmüştür. Bu yazılım yaklaşımı, frekans ve duty ayarlarının kullanıcı komutlarına hızlı tepki vermesini sağlarken; ekran ve terminal çıktıları sayesinde simülasyon aşamasında sistemin davranışının kolayca doğrulanmasına imkân tanımaktadır.

Seri Port ve LCD Çıktısı

Seri port ve LCD çıktısı bölümünde amaç, PWM ile üretilen sinyalin frekans ve duty-cycle bilgilerinin kullanıcı tarafından anlık olarak izlenebilmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda PIC16F877A'nın donanımsal USART birimi 9600 baud hızında asenkron haberleşmeye uygun şekilde yapılandırılmış; TX hattı RC6, RX hattı RC7 pinleri üzerinden Proteus Virtual Terminal bileşenine bağlanarak sistemin ürettiği durum bilgileri terminal ekranında metin olarak görüntülenmiştir.

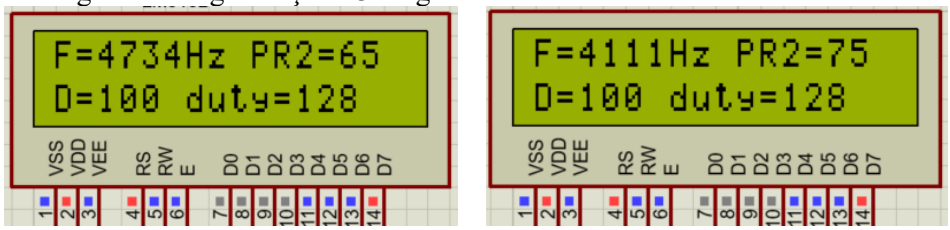


Şekil 2: Sanal (Virtual) Seri Terminal Görselleri

RA0- RA1 Butonları ile oluşturulan frekans değişimleri sanal seri terminal görselleri Şekil 2'de ve LCD görselleri Şekil 3'te verilmiştir.

Aynı zamanda kullanıcı arayüzünü güçlendirmek için 16×2 karakter LCD, 4-bit modda sürülmüş ve frekans ile duty değerleri iki satır halinde ekrana yazdırılmıştır. Böylece kullanıcı, butonlarla yaptığı her ayar

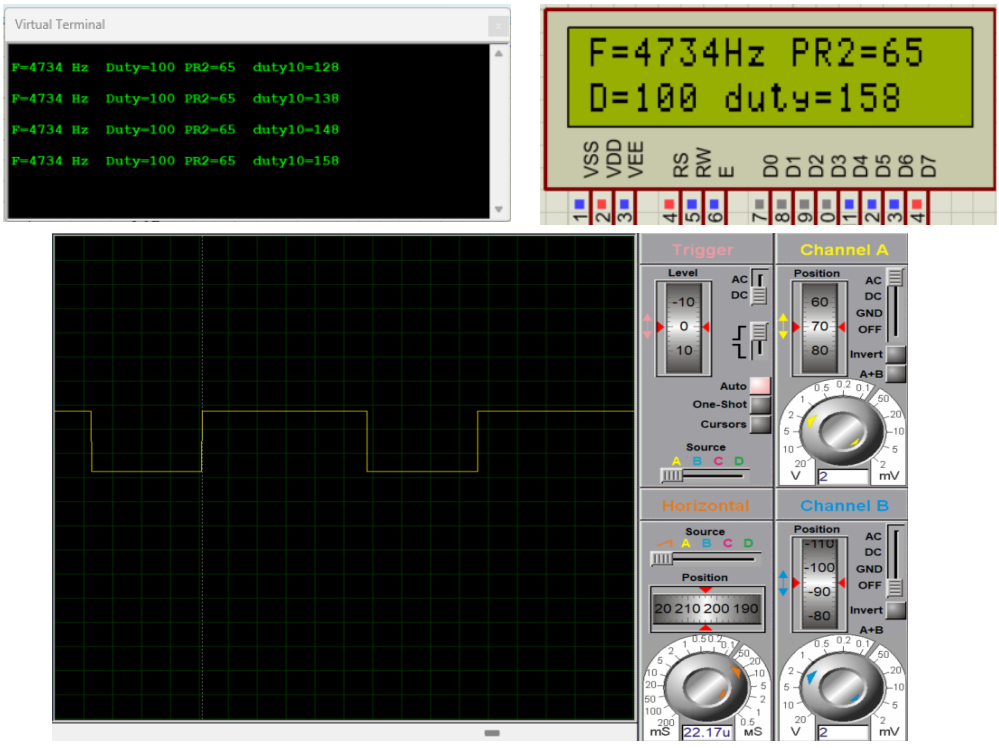
değişikliğinin sonucunu hem LCD üzerinde özet biçimde hem de seri port üzerinden daha ayrıntılı bir kayıt/izleme çıktısı olarak takip edebilmiştir. LCD ekrana gönderilen görsel Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3: LCD Ekran Değerleri

Derleyici programda printf() format ayrıştırmasının zaman zaman tek satırda çok sayıda değişken kullanıldığında hata üretebildiği gözlemlendiğinden, seri port çıktıları uygulamada daha güvenilir sonuç vermesi için gerektiğinde birden fazla printf() çağrısına bölünmüş; LCD tarafında ise ekranın yenilenmesiyle güncel değerlerin her değişimde tutarlı şekilde gösterilmesi sağlanmıştır.

Şekil 4'te Sanal seri terminal ekranı, LCD ve Osiloskop ekranları birlikte verilmiştir. Sinyal frekansının 4734Hz olduğu görülmektedir.



Şekil 4: Sanal Seri Terminal, LCD Ekran ve Osiloskop Frekans Değişim Görselleri

Kod içinde PWM frekansı **PR2 [**int8 pr2_val = 65;] kod üzerinde verilen başlangıç değeri 65 üzerinden (bkz. Ek A: Kod) Denklem (2) kullanılarak "PR2+1=65+1=66" değeri yerine yazılırsa

$$F_{PWM} = \frac{F_{OSC}}{4.Prescaler.(PR2+1)} = \frac{20Mhz}{4224} = 4734Hz$$

olarak hesaplanır.

Ayrıca osiloskop ekranındaki sinyale ait olan değer dikkate alınırsa, yaklaşık olarak 9,5 kareden oluşan sinyalin 22,17µs olduğu hesaplanır. Sinyalin periyodu;

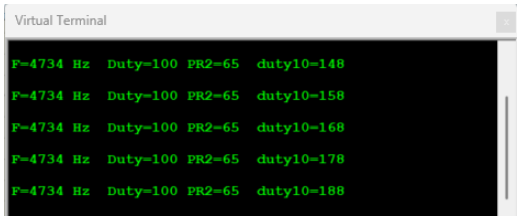
$$T_S = (9{,}5).(22{,}17\mu) = 210{,}615\mu s$$

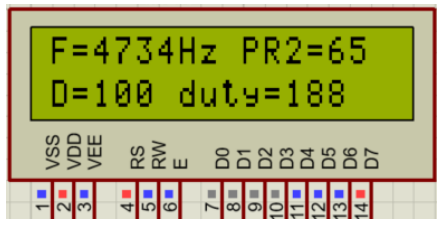
olarak hesaplanır.

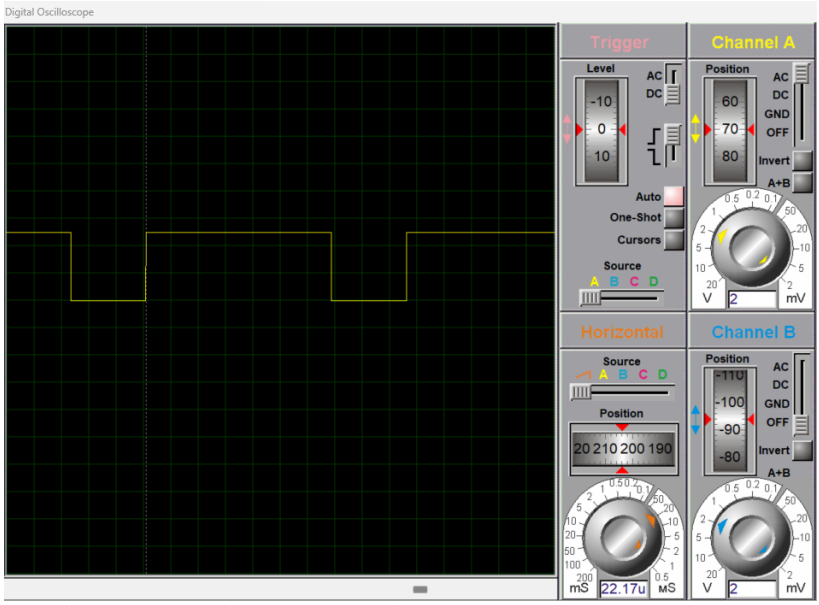
$$F_{PWM} = \frac{1}{T_S} = 4747Hz$$

olarak hesaplanır.
Sonuçlar incelendiğinde frekans değerinin başarılı bir şekilde sanal seri terminal, LCD ekran ve osiloskop üzerinden alındığı görülmektedir.

PWM sinyale ait çevrim süresi dijital karşılığı 128-188 değerleri değişimi nihayetinde ve osiloskop ekranın görselleri Şekil 5'te verilmektedir.







Şekil 5: Sanal Seri Terminal, LCD Ekran ve Osiloskop Duty Cycle Değşim Görselleri

Simülasyon / Doğrulama Sonuçları

Simülasyon ve doğrulama aşamasında geliştirilen sistem Proteus ortamında çalıştırılarak PWM sinyalinin hem dalga biçimi hem de sayısal parametreleri doğrulanmıştır. Öncelikle CCP1 çıkışı olan RC2 pini sanal osiloskop bağlanmış; Timer2 önbölücü (prescaler) ve PR2 değerine bağlı olarak PWM frekansının beklenen şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. RA0 ve RA1 butonları ile PR2 belirli adımlarla artırılıp azaltıldığında, frekansın PR2 ile ters orantılı biçimde değişmesi (PR2 arttıkça frekansın düşmesi, PR2 azaldıkça frekansın artması) hem ölçüm cihazlarında hem de yazılımın hesapladığı değerlerde tutarlı sonuçlar vermiştir. Benzer şekilde RA2 ve RA3 butonları ile 10-bit duty değeri artırılıp azaltıldığında, osiloskop üzerinde darbe genişliğinin değiştiği ve duty-cycle oranının kullanıcı komutlarına kararlı biçimde yanıt verdiği doğrulanmıştır. Elde edilen frekans ve duty bilgileri aynı anda LCD üzerinde iki satır halinde görüntülenmiş; seri port üzerinden Virtual Terminal'e gönderilen çıktılar sayesinde yapılan ayarların zaman içinde takibi ve hata ayıklama kolaylaşmıştır. Ayrıca buton okuma işlemlerinde uygulanan yazılımsal debounce yaklaşımı sayesinde, buton sıçramalarının parametrelerde istenmeyen çoklu artış/azalışlara yol açmadığı; PWM güncellemelerinin ise Timer2 ve CCP1 yapılandırması yeniden uygulanarak sorunsuz biçimde gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu doğrulamalar sonucunda, önerilen donanım ve yazılım bütünlüğünün Proteus simülasyonunda kararlı çalıştığı, PWM üretiminin hedeflenen şekilde kontrol

edilebilir olduğu ve izleme arayüzlerinin (LCD ve UART) güvenilir biçimde güncel değerleri sunduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında PIC16F877A mikrodenetleyicisi kullanılarak Timer2 ve CCP1 birimleri üzerinden donanımsal PWM sinyali üretilmiş, PWM'in frekans ve duty-cycle parametreleri butonlar aracılığıyla ayarlanabilir hâle getirilmiş ve elde edilen değerler hem 16×2 LCD ekranda hem de UART üzerinden seri portta eşzamanlı olarak izlenebilmiştir. Proteus ortamında gerçekleştirilen doğrulamalar, PR2 değerine bağlı frekans değişiminin beklenen yönde gerçekleştiğini, 10-bit duty ayarı ile darbe genişliğinin kararlı biçimde kontrol edilebildiğini ve kullanıcı girişlerine hızlı yanıt veren güvenilir bir yapı elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca yazılımın modüler kurgusu (PWM uygulama ve durum yazdırma işlevlerinin ayrıştırılması) bakım kolaylığı ve genişletilebilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamıştır. Sunulan çalışmada PWM sinyalinin frekans değerinin ve çevrim süresi olan duty cycle değiştirilebilir olması dikkate değer bir kazanım sunmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar için sistemin işlevselliğini artıracak çeşitli geliştirme önerileri bulunmaktadır. Öncelikle PR2 değiştiğinde duty yüzdesinin sabit kalmasını sağlamak amacıyla duty değerinin PR2'ye göre yeniden ölçeklenmesi ve "yüzde bazlı" bir kontrol mantığı eklenebilir. Kullanıcı arayüzü tarafında, yalnızca artır/azalt butonları yerine keypad veya enkoder kullanılarak frekans ve duty değerlerinin doğrudan sayısal girilmesi sağlanabilir; aynı zamanda seçilen değerlerin EEPROM'a kaydedilip cihaz yeniden başlatıldığında otomatik geri yüklenmesi kullanıcı deneyimini iyileştirecektir. Doğrulama yönünde ise CCP capture veya zamanlayıcı tabanlı ölçüm ile gerçek frekansın ölçülerek hesaplanan değerle karşılaştırılması, sistemin ölçüm-belirsizlik analizini güçlendirebilir. Son olarak, uygulama alanına göre PWM çıkışının filtrelenmesi, sürücü katı eklenmesi (MOSFET sürme vb.) ve elektromanyetik girişim/koruma önlemlerinin incelenmesi gibi adımlar, tasarımın endüstriyel koşullara uyarlanmasını destekleyecektir.

Ek A: Kod

```
#include <16F877A.h>
#fuses HS,NOWDT,NOLVP,NOPROTECT,PUT
#use delay(clock=20000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7)
// Sende olan lcd.c buna ihtiyaç duyuyor:
#define use_portd_lcd TRUE
#include <lcd.c>
#define FOSC_HZ     20000000UL
#define T2_PRESCALE 16UL // T2_DIV_BY_16
int8  pr2_val = 65;       // PR2: frekans kontrolü
int16 duty10  = 128;      // 10-bit duty
unsigned int32 pwm_freq_hz(int8 pr2)
{// Fpwm = Fosc / (4 * prescale * (PR2+1))
  return (unsigned int32)(FOSC_HZ / (4UL * T2_PRESCALE * ((unsigned int32)pr2 + 1)));}
int16 duty_max_for_pr2(int8 pr2)
{// max duty = 4*(PR2+1)-1
  return (int16)(4U * ((int16)pr2 + 1) - 1);}
void apply_pwm(void)
{  int16 dmax = duty_max_for_pr2(pr2_val);
  if(duty10 > dmax) duty10 = dmax;
  setup_ccp1(CCP_PWM);
  setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, pr2_val, 1);
  set_pwm1_duty(duty10);}
void print_status(void)
{  unsigned int32 f = pwm_freq_hz(pr2_val);
  int16 dmax = duty_max_for_pr2(pr2_val);
  int16 duty_pct = (int16)(((unsigned int32)duty10 * 100UL) / (unsigned int32)dmax);
 // LCD (16x2 kısa yaz)
  printf(lcd_putc, "\fF=%luHz PR2=%u", f, pr2_val);
  printf(lcd_putc, "\nD=%lu duty=%lu", duty_pct, (unsigned int32)duty10);
  // UART
  printf("\r\nF=%lu Hz Duty=%lu", f, duty_pct);
  printf(" PR2=%u  duty10=%lu \r\n", pr2_val, (unsigned int32)duty10);}
void main()
{ // RA0-RA3 buton -> dijital yap
  setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
  setup_adc(ADC_OFF);
  set_tris_a(0x0F);  // RA0..RA3 giriş
  set_tris_c(0x80);  // RC7 RX giriş
  set_tris_d(0x00);  // LCD PortD çıkış
  lcd_init();
  apply_pwm();
  print_status();
  while(TRUE)
  {  int1 changed = 0;
    if(input(PIN_A0))  {  delay_ms(20); if(input(PIN_A0)) { while(input(PIN_A0));
      if(pr2_val < 250) pr2_val += 5; if(pr2_val > 250) pr2_val = 250; changed=1; } }
    if(input(PIN_A1))  {  delay_ms(20); if(input(PIN_A1)) { while(input(PIN_A1));
      if(pr2_val > 65) pr2_val -= 5; if(pr2_val < 65) pr2_val = 65; changed=1; } }
    if(input(PIN_A2))  {  delay_ms(20); if(input(PIN_A2)) { while(input(PIN_A2));
      duty10 += 10; changed=1; } }
    if(input(PIN_A3))  {  delay_ms(20); if(input(PIN_A3)) { while(input(PIN_A3));
      if(duty10 >= 10) duty10 -= 10; changed=1; } }
    if(changed)
    {  apply_pwm();
  print_status();  }  delay_ms(30);  }}
```

REFERANSLAR

CCS, Inc. (2021). CCS C Compiler: User Manual (Kasım 2021). CCS, Inc.

Garbutt, M. (2003). Asynchronous communications with the PICmicro USART (Application Note AN774, DS00774A). Microchip Technology Inc.

Hitachi. (1999). HD44780U (LCD-II): Dot matrix liquid crystal display controller/driver (ADE-207-272(Z), Rev. 0.0).

Labcenter Electronics. (t.y.). Serial communication between Proteus VSM and physical serial port
Mazidi, M. A., McKinlay, R. D. ve Causey, D. (2008). PIC microcontroller and embedded systems: Using assembly and C for PIC18. Pearson Prentice Hall.
Microchip Technology Inc. (1997). PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023A). Microchip Technology Inc.
Microchip Technology Inc. (2003). PIC16F87XA data sheet (DS39582B). Microchip Technology Inc.
Microchip Technology Inc. (2020). Using the CCP Module (Technical Brief TB3275, DS90003275A). Microchip Technology Inc.
Morton, J. (2005). The PIC microcontroller: Your personal introductory course (3. bs.). Newnes/Elsevier.
Palmer, M. (1997). Using the CCP Module(s) (Application Note AN594, DS00594B). Microchip Technology Inc.
Predko, M. (2007). Programming and customizing the PIC microcontroller (3. bs.). McGraw-Hill Education/TAB.
J. Morton, The PIC Microcontroller: Your Personal Introductory Course, 3rd ed., Newnes/Elsevier.

RF Anahtarli İSG Takip ve Denetim Tasarımı Önerisi

Serdar YILMAZ[1]

1- Öğr.Gör.Dr.; İstanbul Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik Teknolojisi. serdar.yilmaz@iuc.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4316-3737

ÖZET

Bu kitap bölümünde, risk barındıran cihazların kullanımı sırasında operatör güvenliği ile bakım personeli güvenliğini artırmak ve yetkisiz erişimleri önlemek amaçlanmaktadır. Bu amaçla Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) tabanlı kimlik doğrulama, rol tabanlı yetkilendirme; operatör, bakım, yetkisiz ve kilitleme mantığı; çalıştırma izni, güvenli duruş ve bakım kilidi bir arada ele alınmaktadır. RF etiketli kimlik kartları üzerinden cihazın kim tarafından, ne zaman ve hangi modda kullanıldığı kayıt altına alınarak loglama ve izlenebilirlik sağlanmakta; yetkisiz personelin tehlikeli bölgelere veya fonksiyonlara erişimi engellenmektedir. Böylece yalnızca doğru role sahip personelin cihazı çalıştırabilmesi, bakım süreçlerinde güvenli izolasyonun desteklenmesi ve denetim süreçlerinin sayısallaştırılması hedeflenmektedir. Sonuç olarak, olay gerçekleştikten sonra raporlama odaklı reaktif yaklaşım yerine proaktif güvenlik ve denetim anlayışı güçlendirilerek iş kazalarının önlenmesine katkı sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler – RF Anahtar, RFID-Elektronik Etiket, Güvenlik ve Denetim, Proaktif İSG, Yetkilendirme, İzlenebilirlik

GİRİŞ

Tehlikeli ve çok tehlikeli sınıfta yer alan çalışma ortamlarında iş kazalarının önemli bir bölümü; cihazların yetkisiz kişilerce çalıştırılması, bakım sırasında enerji izolasyonunun yetersizliği, vardiya/rol değişimlerinde yetki karmaşası ve yapılan işlemlerin yeterince izlenememesi gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu riskler yalnızca iş kazası olasılığını artırmakla kalmamakta; olay sonrasında kök neden analizi, sorumluluk takibi ve iyileştirme faaliyetlerini de zorlaştırmaktadır. Bu nedenle İSG uygulamalarında, kişiye bağlı kontrol mekanizmalarını güçlendiren, kayıt altına alan ve denetlenebilir hale getiren teknolojik çözümler önem kazanmaktadır.

Dijitalleşmenin hızlanmasıyla birlikte Endüstri 4.0 çerçevesinde nesnelerin interneti, siber-fiziksel sistemler ve akıllı izleme yaklaşımları üretim ortamlarında yaygınlaşmış; güvenlik süreçlerinin de ölçülebilir ve izlenebilir biçimde yönetilmesine yönelik uygulamalar artmıştır. Bu kitap bölümünde, söz konusu dönüşümün İSG'ye yansıması olarak, RFID tabanlı

kimlik doğrulama ve erişim kontrolü ile RF anahtarlı güvenlik ve denetim yaklaşımı ele alınmaktadır.

Bölüm kapsamında önerilen yaklaşım; (i) operatör, bakım personeli ve yetkisiz personelin rollerine göre yetkilendirilmesi, (ii) cihazın çalışma–duruş–bakım kilidi gibi modlarda güvenli biçimde yönetilmesi ve (iii) tüm işlemlerin loglanarak izlenebilirliğin sağlanması temelleri üzerine kuruludur. Böylece denetim yalnızca kontrol listeleriyle değil, gerçek zamanlı veri ve kayıtlarla desteklenerek proaktif kaza önleme hedefi güçlendirilmektedir.

Endüstri 4.0, (Gobbo, J. A. 2018) üretim güvenliği ve çevre koruma araştırmacıları ve yöneticileri için yeni zorluklar ve fırsatlar sunmaktadır. Endüstri 4.0 kavramının ortaya çıkması ile çalışanların ve çevre güvenliğinin sağlanması konusunda otomasyon ve akıllı sistemler ile ilgili çalışmalar son on yıl içerisinde artmıştır. Bu kavram çerçevesinde değerlendirilmiş olan RF anahtarlı İSG takip ve denetim tasarımları sunulmuştur.

Ibukun Awolusi ve ekibi (Awolusia, I., 2018), inşaat alanında çalışanların denetim ve gözetimini sağlamak, çalışanların gerçek zamanlı bilgilerini değerlendirip analiz etmek amacıyla giyilebilir sistemler üzerine araştırmasını 2017 yılında yayınlamıştır. Çalışmada giyilebilir cihazlar ile emniyet performansı, yönetim sistemlerine uygulamaları tartışılıp analiz edilmiştir. İnşaat süreci, işle ilgili yaralanmaların ve ölümlerin sıklığı nedeniyle çok riskli bir alan olarak kabul edilmektedir. Güvenlik verilerinin toplanması ve analizi, ölçme ve iyileştirme stratejisinin geliştirilmesinde çok önem arz etmektedir. Giyilebilir teknolojinin benimsenmesi, inşaat personeline gerçek zamanlı bilgi sağlamak için sonuç odaklı veri toplama ve analiz yaklaşımı kaza önleme ve denetim mekanizması olarak dikkat çekidir. Giyilebilir teknolojinin özelliklerinin ve güvenlik performansını ve yönetim uygulamalarını tahmin edebileceği düşünülen güvenlik ölçümlerinin kapsamlı bir değerlendirmesi çalışmada yer almaktadır. İnceleme, güvenlik ve üretkenliği arttırmak için diğer endüstrilerde çok çeşitli giyilebilir teknolojilerin kullanıldığını ve inşaat sektöründe çok az sayıda uygulamanın gözlendiğini göstermiştir. Gerçekte olması gereken inşaat gibi tehlikeli çalışma alanlarına bu teknolojinin uyarlanmasıdır. Ayrıca, çalışmada tek gövdeli bir konumdan veri toplamak için çok modlu bir sensörün kullanılabildiği çoklu sensör tiplerine sahip giyilebilir cihazlar (yani, çok modlu tek konumlu) yapım aşamasında kullanılmak üzere önerilmiştir. Teknoloji geliştiricileri, vücudun nasıl hareket ettiği ya da birden fazla cihaz

ve sensör arasında nasıl hareket ettiği hakkında bütünsel bir bakış açısı sağlamak için giyilebilir bir cihaza entegre çoklu sensörlerden anlam çıkarma yollarına çalışmada yer verilmiştir.

2013 yılında yayınlanan bir çalışmada (Kelm, A. 2013) kişisel koruyucu donanımların (KKD) giyilmesi ve uygun kullanımı konusunda RF anahtarlama yöntemi ile takip edilmesi gerçekleştirilmiştir. KKD için tasarlanan pasif RF etiketler uygun maliyet imkânı sunmaktadır. Etiketlenen KKD'lar çalışma sahası içerisinde takip edilebilmekte ve çalışanların düzenli kullanımı kolaylıkla denetim altına alınabilmektedir. İnşaat sahalarında çalışanların Sağlık ve Güvenliğinin takibi ve gözetiminin sağlanması adına ciddi kazanımlar sağlamaktadır. İnşaat sahasında çalışanların KKD kullanması zorunludur. Çalışanların KKD kullanması takibi için kontrol kapıları oluşturulmuştur. Giriş ve çıkışlarda KKD'lerin çalışanlarında üzerinde olması durumu takip edilmiştir. Bu anlamda eksik yönleri olsa dahi sahada çalışanların KKD kullanması konusunda otomasyon sistemi olarak ilk adımları atan bir çalışma olmuştur. Çalışma şantiyelerdeki otomatik ve hızlı KKD kontrolünü mümkün kılan teknolojiye ilişkin detayları vermekte ve takiben Pasif Radyo Frekans (RF) anahtar kullanılmasının yararları ve sınırlamaları; personel tanımlaması, nesne RFID (Radyo Frekanslı Identification) etiketlemesi ve kontrol yöntemleri; uyumluluk kontrolü, eğitim ve öğrenme için kullanıcı ara yüzü ve teknikleri; güvenlik verilerini ölçmek için veri kayıt ve işleme yetenekleri; ve son olarak, mevcut emniyet yönetimi ve iş süreçlerine entegrasyon konularını içermektedir.

RF anahtar sistemleri ticari olarak pazar hacmine sahiptir. Hatta bu alanda Honeywell markalı ESP RF anahtar sistemi, saha denetim ve gözetimi konusunda bilgi yönetimi için gerçek zamanlı veri sunmaktadır. Bu sistem gerçek zamanlı izleme kontrolü ve güvenlik gözetimi ve yönetimi için web tabanlı bir bilgi yönetimi yazılımı hizmetini sunmaktadır. Bu uygulama için radyo frekansı tanımlama (RFID) özellikle düşme ekipmanları desteği vermektedir. İzleme ve yönetme maliyetlerini ve karmaşıklıklarını büyük oranda azaltan sistem %99 güvenilirliğe sahip yazılımı ile eğitim ve uyumluluk verilerini azaltmasına da olanak vermektedir. Sistem üzerinde mevcut çalışan kimlik kartlarının uyumlu olduğu ve Web tabanlı iletişime olanak sağlayan donanımlarda bulunmaktadır. Kartların karşılığında bir veri sisteminin olması personele ait eğitim, sağlık ve çalışma denetim

durumlarının takip edilmesine, farklı çalışma bölgeleri için denetim ve güvenlik operasyonlarının yapılmasına olanak sunmaktadır.

Ruoyu Jin tarafından yapılan ve 2019 yılında yayınlanan makalede (Jin, R. 2019), inşaat güvenliğinde araştırma geliştirme hakkında daha derin bir anlayış kazandırılması düşünülmüştür. Örneğin, benzetim ve yüksek düşme ile ilgili konulardan çalışılan makaleler değerlendirilmiştir. İnşaat güvenliği alanında hem akademik topluma hem de pratik alanlara birden fazla temada hizmet edebilecek bir çerçeve ve gelecekteki araştırma yönergeleri önerilmiştir. Bu öneriler kapsamında: 1- Uyarlanabilir bir emniyet iklimi ve güvenlik kültürü modeli 2- prototipler, sürekli gelişim ve bilgi teknolojilerinin emniyet yönetiminde uygulanmasına hazır olma 3- bilişsel işçi güvenliği algı ve davranış modellerine bağlı alt gruplar 4- güvenlik programı yönetimine yapay zeka ve akıllı teknolojiler anlatılmış ve değerlendirilmiştir.

İş Sahasında çalışanların güvenliği alanında yayınlana (Niu, Y. 2019) bir araştırma, inşaat iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetimindeki akıllı yeteneklerine odaklanan akıllı inşaat nesnelerinin derinlemesine değerlendirmesini sunmaktadır. Güvenlik teknolojileri kullanan veya bir güvenlik kültürü geliştiren İSG yönetimi konusundaki geleneksel araştırmalardan farklı olarak inşaatta durağan İSG yönetimini iyileştirmede yapay zeka kullanım ve uygulamasını savunmaktadır. Mevcut inşaat kaynaklarını bilinçlendirme, özerklik ve iletişimini içeren temel akıllı özelliklerle arttırarak, tehlikeli durumların yönetiminde izleme, görselleştirme, uyarma ve önlem alma gibi entegre bir yapı sunmaktadır. Bir kule vincinin çalışmasını hedefleyen otomasyon sistemi etkin olduğu İSG yönetim çerçevesi ve sistemi laboratuvar araştırmaları ile küçük boyutta denenmiştir. Nihayetinde önerilen sistemin saha içi pratiğe uygulanmasının uygulanabilirliğini gösteren sonuçlar elde edilmiştir.

İSG çalışma alanından farklı olarak (Haddara, M., 2018) 2018 yılında yayınlanan bir çalışmada hastaların sağlık ve güvenlik denetimleri için Radyo Frekansı etiketli (RFID), izleme ve veri toplama için yeni nesil bir teknoloji sağlık hizmetlerinde bir sonraki dikkat çekici yenilik olarak görülmektedir. Hasta kayıtları, personelin ve gerekli donanımların etiketlenerek operasyonel verimlilik ve maliyet tasarrufu için çeşitli fırsatlar sunduğu görülmüştür. Literatür taraması yoluyla, bu makale sağlık güvenliğinde RFID'nin benimsenmesinin zorluklarını araştırmaya ve hasta güvenliğine odaklanmaya çalışmıştır. Çalışma bulguları uyum sağlamanın yüksek maliyetlerinin,

güvenlik ve mahremiyetle ilgili endişelerin ve insan güvenliği risklerinin önündeki başlıca engeller olduğunu göstermektedir. Her ne kadar RFID sağlık sektörü için çeşitli faydalar vaat etse de sağlık sektöründe RFID teknolojisinin benimsenmesi beklendiği kadar çarpıcı olmamıştır ve diğer sektörlere kıyasla hala geride kalmaktadır.

İnşaat işçilerinin güvensiz davranış ve hareketleri üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada (Yantao, Y. 2017) inşaat işçilerinin güvensiz davranışlarını gerçek zamanlı olarak tanımlamak için görüntü iskeletine dayalı parametre eştirilmiş bir yöntem önerilmiştir. Ön testle teorik bir çerçeve geliştirilmiştir, ancak geçerliliğini doğrulamak için, özellikle de güvenli olmayan davranış türlerinin tanınmasında hala kapsamlı saha araştırmaları için daha çok teorik bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmanın tamamlanması ve saha uygulamaları sonrasında başarı kazanacağı konusunda şüphe olmadığına yer verilmiştir. Bu araştırma fizibilite ve doğruluğunu incelemek için üç tür güvensiz davranış içeren bir dizi deney tasarlamış ve gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları, güvensiz davranışları gerçek zamanlı olarak tanımlayabilmekte ve ayırt etmektedir. Sınırlamaları olduğu gibi, saha uygulanabilirliğini, verimliliğini yayında anlatılmış ve başarılı bulunmuştur. Bu araştırma, metodun inşaat güvenliği yönetiminde kapsamlı bir şekilde uygulanmasına fayda sağlamakla kalmayıp, gelecekteki ilgili araştırma odakları belirleyerek güvenlik yönetimin etkinliğini ve verimliliğini de arttıracak olmasıdır. Bu nedenle, bu makale pratiğin yanı sıra inşaat güvenliği yönetimi bilgi birikimine de katkı sağladığına yer verilmiştir.

Sivil inşaat sahaları potansiyel birçok tehlikenin ortaya çıkabileceği en riskli ortamlardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu durumu göz önünde bulunduran bir çalışmada (Kanan, R., 2018) inşaat işçilerini korumak ve bu tür bölgelerdeki kazaları önlemek için, tehlikeli bölgelerde bulunan saha çalışanlarını izleyen, yerelleştiren ve uyaran özerk bir sistem için yeni bir tasarım önerisinde bulunmuştur. Önerilen sistem kullanıcı dostudur ve mimarisi nesnelerin interneti teknolojisine dayanmaktadır. Bu mimarinin heterojen bileşenleri, bir ara katman arka uç çevrimiçi sunucusuna sorunsuz bir şekilde entegre edilmiştir. İnşaat işçilerini doğru bir şekilde tespit etmek ve tanımlamak için önerilen sistem üç kombine teknik kullanmaktadır. Bunlar 1- 868 MHz radyo frekansı, 2- yönlü antenler ve 3- 40 kHz ultrason dalgalarıdır. Kullanılacak olan tasarım cihaz; arka kısmı, çalışanlar için giyilebilir bir cihazla birlikte iyi koruma sağlayan bir algılama ünitesi ile

sabitlenmiştir. Giyilebilir cihazın tasarımı, bir radyo alıcı-verici (verici / alıcı), bir uyandırma sensörü, bir alarm çalıştırıcısı ve bir GPRS modülü olan bir dizi bileşen içerir. Giyilebilir cihaz, 3V gerilim ve 0,5μA akım üreten düşük güç tasarrufu düzenine sahiptir; RF yakınlık sensörü ile aktif olan cihaz, bir radyo frekansı (RF) alanının varlığına kadar derin uyku modunda kaldığı hibrit (aktif / pasif) bir yapıya sahip olarak tasarlanmıştır. Sonuç olarak, şarj edilebilir pilin ömrü şarj edilmeden önce 2 güne kadar kullanılabilir. Önerilen sistem, inşaat sahalarına sorunsuz bir şekilde uyum sağlamak, gerçek zamanlı olarak çalışmak ve normal inşaat sahalarının faaliyetlerini engellemeden güvenlik iş akışlarının izlenmesini kolaylaştırmak için tasarlanmıştır. Yayının sonucunda tasarımın düşük sermaye ile işletme maliyetleri ve şantiye kazaları riskini azalttığını göstermiştir.

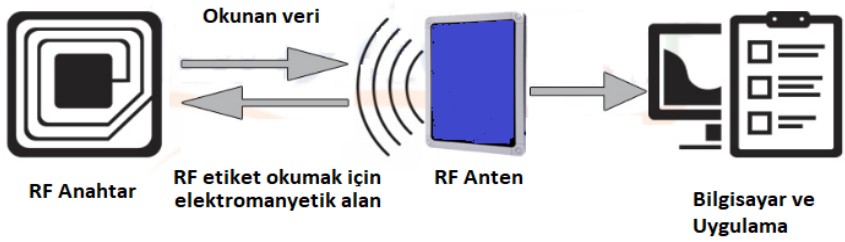
İnşaat alanındaki risklerin fazla olması nedeniyle RF anahtarlı, otomasyon ve yerel ağ teknolojilerini barındıran proaktif güvenlik sistemleri özellikle bu alanlarda uygulama ve çalışma imkanı bulmuştur. İnşaat sektöründen yıllık on binleri bulan zaman, yaralanma ve ölüm kayıpları bildirilmektedir. Bunların büyük bir kısmı çalışanların şantiyelerde hareketli araçlar tarafından gerçekleşen kazalardan kaynaklanmaktadır (Zhu, Z.). Bu sitenin güvenlik sorununu ele almak için proaktif uyarı sistemlerinin sağlanması gerekmektedir. Bu tür sistemlerdeki kritik kısımlardan biri, sahadaki çalışanların ve hareketli mobil ekipmanların mevcut pozisyonlarını bulmak ve aynı zamanda ani çarpışmaları önlemek için gelecekteki pozisyonlarını tahmin etmektir. Yayınlanan bu çalışmada işçilerin ve mobil ekipmanların inşaat sahalarındaki hareketlerini tahmin etmek için yeni Kalman filtreleri önermektedir. Filtreler, ekipmanın ve çalışanların birçok video kameradan girdi olarak tahmin edilen pozisyonlarını alır ve gelecekteki pozisyonlarına karşılık gelen tahminleri verir. Ayrıca, filtreler işçi veya ekipmanın önceki hareketlerine dayanarak tahminlerini ayarlayabilir. Filtrelerin etkinliği gerçek site videoları ile test edilmiştir ve sonuçlar filtrelerin yüksek tahmin doğruluğunu gösterecek şekilde makalede verilmiştir.

Bu alanda yapılan araştırmalarda da görüldüğü gibi İSG alanında tehlikeli risk sınıfında ve daha üstünde bulunana alanlarda RF anahtarlı güvenlik ve denetim sistemleri oluşturulabilir. Bu alanda yapılacak olan her türlü çalışmanın önem arz ettiğini ve gelecekte geliştirilip gerçek zamanlı olarak kullanılacak olan İSG güvenlik otomasyon sistemlerinin alt yapısını oluşturacağı açıktır. Bu amaca yönelik olarak çalışmamda RF anahtar ve etiket

sistemlerini ve gerçekleştirilebilecek olan güvenlik ve denetim sistemi tasarımından bahsedeceğim.

RF Anahtar Güvenlik ve Denetim Sistemi

RF anahtarın temel yapısı ilk olarak 1973 yılında Mario Cardullo tarafından patent altına alınmıştır. RF anahtarı (etiketi) ve okuyucusu olmak üzere tüm donanım temel olarak iki parçadan oluşmaktadır. Hali hazırda kullandığımız Hızlı Geçiş Sistemleri (HGS) RF etiket ve bu etiketi okuyan bir yapıdan ibarettir. RF anahtar ve okuyucu kısma ait model Şekil 1'de verilmektedir. Bu bölümde her iki kısma ait detaylı bilgi anlatılacaktır.



Şekil 1: RF Anahtar ve Okuyucu Sistem

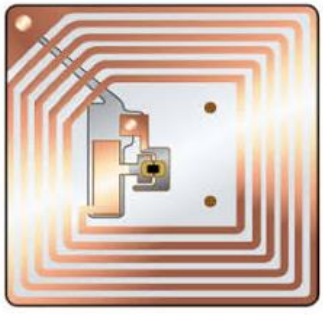
RF Anahtar

Radyo frekansı (RF) anahtar, nesnelere iliştirilmiş etiketleri otomatik olarak tanımlamak ve izlemek için elektromanyetik alanlar kullanan fiziksel pasif bir elektronik etikettir. Etiketler elektronik olarak depolanan bilgileri içerir. Pasif etiketler, yakındaki bir RF okuyucunun sorgulayıcı radyo dalgalarından enerji alarak aktif hale gelir. Ayrıca kendinden enerjili aktif etiket yapıları da bulunmaktadır. Yapısal olarak yerel bir güç kaynağına aktif etiketler RF okuyucusundan yüzlerce metre uzakta dahi çalışabilirler. Barkod okuyuculu etiket sistemlerinden farklı olarak etiketin okuyucunun görüş alanı içinde olmasına gerek yoktur. Bu nedenle yapısal olarak bir nesne içerisine monte edilebilir veya gömülebilir. Bu nedenledir ki; RF anahtarlı sistemler birçok kullanım alanına sahiptirler. Üretim hatlarında hat üzerindeki montaj için gelen parçaların takibi yapılabilir. Örneğin bir otomobil şasesine bağlanan bir RF etiketi, montaj hattındaki ilerleyişini izlemek için kullanılabilir. RF anahtarlar merkezi bilgi işlem sistemlerinden takip edilebilir. Ayrıca hayvanlara ve evcil hayvanlara RF mikroçipleri yerleştirerek, hayvanlara ait kimlik olarak kullanılması mümkündür. Bu konuda uygulamalarda

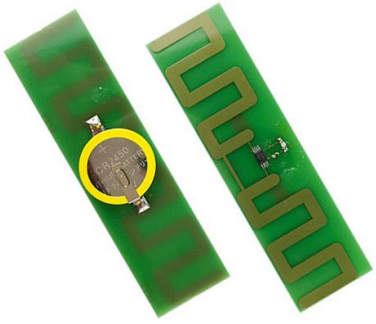
yapılmaktadır. Diğer taraftan birçok ticari ürünün taşınmasında ve market satışlarında RF etiketlerin kullanılması yaygın hale gelmiştir.

RF etiketleri (Angell, I. 2013) nakit paraya, kıyafetlere ve eşyalara eklenebildiğinden veya hayvanlara ve insanlara yerleştirilebildiğinden, kişisel olarak bağlanmış bilgilerin izinsiz olarak okunma olasılığı ciddi gizlilik endişeleri doğurmaktadır. Bu endişeler gizlilik ve güvenlik konularını ele alan standartlar geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır. Geliştirilen standartlar çerçevesinde RF anahtarların bilgiyi şifreli olarak okuyucuya göndermesi mümkün olabilmektedir.

RF anahtarlar aktif ve pasif yapılı olmak üzere temelde iki farklı tasarıma sahiptir (Şekil 2). RF anahtar pasif, aktif veya pil destekli pasif olabilir. Genellikle pasif yapılı RF anahtar, tanımlanacak nesnelere iliştirilmiş etiket olarak kullanır. İki yollu radyo alıcısı ve vericisi tarafından okunurlar. Radyo vericisi gönderdiği sinyal ile RF etiketi aktif hale getirir ve radyo alıcısı RF etiketin gönderilen sinyale olan tepkisini okuyarak etiketi tanımlar. RF etiket veya anahtarlar kendinden enerjili ve aktif yapılı olabilirler. Bu durumda gönderilen sinyale karşılık tepki sinyalini daha uzun mesafelerden cevap olarak gönderebilirler.



Pasif Yapılı RF Anahtar İç Yapısı



Aktif Yapılı RF Anahtar İç Yapısı

Şekil 2: Pasif ve Aktif Yapılı RF Anahtar

Aktif bir etiket yerleşik bataryaya sahiptir ve düzenli aralıklarla ID sinyalini iletir. Bir batarya destekli pasif anahtarda küçük bir batarya bulunur ve bir RF okuyucusu bulunduğunda etkinleşir. Pasif bir etiket daha ucuz ve daha küçüktür çünkü pili yoktur; bunun yerine, etiket okuyucu tarafından iletilen radyo enerjisini kullanır. Bununla birlikte, pasif bir etiketi çalıştırmak

için, sinyal aktarımından yaklaşık bin kat daha güçlü bir güç seviyesi ile uyarılmalıdır.

Anahtarlar veri tabanında fabrika tarafından atanmış bir seri numarasına sahip, salt okunur olabilir veya nesneye özgü verilerin, sistem kullanıcısı tarafından anahtara yazıcı istasyon tarafından okunabilir veya yazılabilir. Alan programlanabilir etiketler bir defa yazılabilir, birden fazla okunabilir; "boş" etiketler kullanıcı tarafından bir elektronik ürün koduyla yazılarak aktif hale getirilerek veri tabanında tanımlanabilir.

RF anahtarlar üç bölüm içermektedir. Entegre bölümü; bilgiyi depolayan ve işleyen ve radyo frekansı (RF) sinyallerini modüle eden ve demodüle eden bölümdür. Okuyucudan gelen sinyali doğru akım (DC) gücü toplamayan güç katı bölümü ve son olarak ta sinyali almak ve iletmek için bir anten bölümünden oluşmaktadır. RF anahtarın etiket bilgisi geçici bir hafızaya kaydedilir. RF etiketi, sırasıyla iletim ve sensör verilerinin işlenmesi için sabit veya programlanabilir elektronik mantık yapısı içerir.

Bir RF okuyucu, etiketi sorgulamak için şifreli bir radyo sinyali iletir. RF etiketi mesajı alır ve ardından kimliğini ve diğer bilgilerini okuyucuya gönderir. Bu yalnızca benzersiz bir etiket seri numarası olabilir veya farklı bilgiler içerebilir. Etiketler bireysel seri numaralarına sahip olduğundan, RF okuyucu sistem tasarımı, RF okuyucusu aralığında olabilecek çeşitli etiketler arasında ayrım yapabilir ve bunları aynı anda okuyabilir.

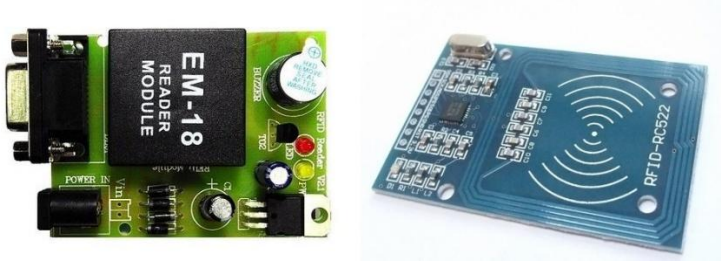
RF Anahtar Okuyucu Sistem

RF okuyucu sistemleri, etiket ve okuyucu türüne göre sınıflandırılabilir. Pasif okuyucu aktif etiket sistemi, sadece aktif etiketlerden radyo sinyallerini alan pasif bir okuyucuya sahiptir. Pasif okuyucu aktif etiket sistemi sistem okuyucusunun alım aralığı, koruma ve denetimi gibi uygulamalarda esneklik sağlayarak 0 - 600 m arasında düzenlenebilir. Aktif Okuyucu Pasif Etiket sistemi, sorgulayıcı sinyalleri ileten ve ayrıca pasif etiketlerden kimlik doğrulama yanıtları alan aktif bir okuyucuya sahiptir. Aktif Okuyucu Aktif Etiket sistemi, aktif okuyucudan gelen sorgulayıcı sinyali ile uyandırılmış aktif etiketleri kullanır. Bu sistemin bir varyasyonu, pasif bir etiket gibi davranan ancak etiketin geri bildirim sinyalini beslemek için küçük bir bataryaya sahip olan bir Pil Destekli Pasif (PDP) etiketi de kullanabilir.

Sabit okuyucular, sıkı bir şekilde kontrol edilebilecek belirli bir sorgulama bölgesi oluşturmak için kurulmuştur. Bu, etiketlerin sorgulama

alanına girip çıktığı zaman için oldukça tanımlanmış bir okuma alanına izin verir. Mobil okuyucular el arabalarında veya el arabalarında veya araçlarda monte edilebilir.

Okuyucu ve etiket arasındaki sinyal, etiket tarafından kullanılan frekans bandına bağlı olarak, birkaç farklı yolla yapılır. Düşük frekans (LF) ve yüksek frekans (HF) bantları üzerinde çalışan etiketler, radyo dalga boyu açısından, okuyucu antene çok yakındır, çünkü sadece küçük bir dalga boyunun küçük bir yüzdesidir. Bu yakın alan bölgesinde, etiket okuyucudaki vericiyle elektriksel olarak yakından bağlantılıdır. Etiket, etiketin temsil ettiği elektrik yükünü değiştirerek okuyucu tarafından üretilen alanı değiştirebilir. Daha düşük ve daha yüksek bağıl yükler arasında geçiş yaparak, etiket okuyucunun tespit edebileceği bir değişiklik üretir. Çok yüksek frekanslı (UHF) ve daha yüksek frekanslarda, etiket okuyucudan uzakta birden fazla radyo dalga boyu olup, farklı bir yaklaşım gerektirir. Etiket bir sinyali geri saçabilir. Aktif etiketler, fonksiyonel olarak ayrılmış vericileri ve alıcıları içerebilir ve etiketin okuyucunun sorgulama sinyaliyle ilgili bir frekansta yanıt vermesi gerekmez. Şekil 3'te örnek olarak RF etiket okuyucu kartlar gösterilmektedir.



Şekil 3: RF Anahtar Okuyucu

RF Anahtar ile Güvenlik ve Denetim Sistemi

RF anahtar sistemi ile herhangi bir nesne, nesneye ait envanter, insanlar ve benzeri şekilde farklı canlıları takip etmek için kullanılabilir. Kullanım kolaylığı ve gelişen teknolojinin farklı olanaklar sunması nedeniyle birçok kullanım alanı ortaya çıkmıştır. RF etiketlerinin üretim ve dağıtımı birim maliyet fiyatlarını da aşağı çekmiş ve daha yaygın kullanım alanlarının oluşmasını sağlamıştır.

Bu kitap bölümü için RF anahtar kullanarak çalışanların, operatörlerin ve servis elemanlarının güvenli koşullarda çalışması imkânı hedeflenmiştir. Temelde sistem her çalışanın RF anahtar özelliği olan bir kimlik taşımasını

önermektedir. Çalışanların sahip oldukları anahtar, çalışanların izin bölgelerinde çalışmalarına takip imkânı sağlayacağı gibi kaza, iş yeri güvenlik denetim ve gözetim imkânı da sunmaktadır. Özet ve Giriş bölümlerinde anlatılan, çalışmada tasarım ve sonrasında kullanılacak olan sistem farklı uygulamalara da imkân tanımaktadır.

Önerilen kitap bölümü içerisinde RF anahtarlı güvenlik ve denetim sistemi aşağıdaki kazanımlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

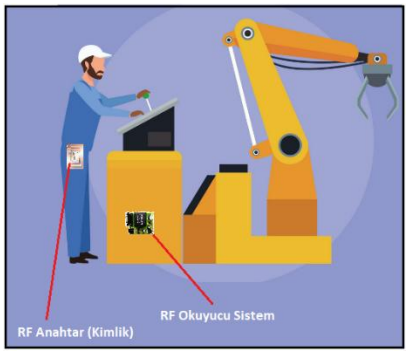
1- Yetkili personel araç izin otomasyon sistemi: RF anahtarlı elektronik kartlar ile tehlikeli araçlar; vinçler, kamyonlar, üretim bandı üzerindeki presler, hareketli yapıya sahip sabit büyük üretim makinaları, sadece yetkili personel tarafından kullanılıp çalıştırılabilecektir.
2- Bakım ve servis personeli güvenlik-etiketleme sistemi: Bakım personelinin cihaz üzerinde gerekli bakım ve tamir işlemlerini yerine getirebilmesi için, araç ve donanım üzerinde otomasyon izni ile gerekli işlemleri sürdürmesi sağlanacaktır.
3- Çalışanların yetki bölgesi takibi: Çalışanların yetki ve izne sahip olmadıkları tehlikeli bölgelere giriş-çıkışlarının takibinin yapılması sağlanacaktır.

Yukarıda verilen maddelerin detayları bu bölüm içerisinde ilgili alt başlıklarda örneklendirerek anlatılmaktadır.

RF Anahtar ile Araç Kullanım İzni

RF anahtarlar kullanılacak olan endüstriyel alana göre uygun şekilde aktif veya pasif olarak seçilebilir. Ayrıca bir çalışma grubu için aktif anahtar kullanımı mümkün iken diğer bir grup için pasif yapılı RF anahtarlar kullanılabilir.

Şekil 4 üzerinde görüldüğü gibi yetkili anahtara sahip olan çalışan veya personel kendi izni dahilinde olan araçları kullanabilecektir. Yetki anahtarı olmayan personelin aracı çalıştırması mümkün olmayacaktır. Böylelikle araçların izin sistemi dışında herhangi bir personel tarafından kullanılması engellenmiş olacaktır.



Şekil 4: RF Anahtar Okuyuculu Yetkili Operatör Araç Kullanımı

Endüstriyel alanda bulunan birçok makine ve cihaz kullanıcılar için tehlikeler oluşturmakta, kazalara ve hatta ölümlü kazalara yol açmaktadır. Bu nedenle yüksek tehlike oluşturan mekanik ve hareketli parçalara sahip cihazların çalışanlar ve operatörler tarafından kullanılması RF anahtarlı sistemler ile daha güvenli hale getirilebilir. Çalışma alanında operatörün ve diğer çalışanların konumları takip edilerek proaktif bir kaza önleme sistemi ortaya konmuş olur.

Şekil 4'te verilen sistem operatörün bulunduğu yer konumunu tahmin ederek aracın kullanıcı personel için kazaya sebep olmayacak şekilde kendisini otomatik olarak kapatması mümkün olacaktır. Benzer güvenlik sistemleri cihazları kullanan operatörler için tasarlanan cihazların elektrik anahtarları ile devre kesme mekanizmaları cihaz üzerine kullanım şekline göre düzenlenmektedir. Fakat operatörün hareketini duyarlı proaktif bir yapıda RF anahtar güvenlik sistemi çalışanların kazalara sebep olmasını engelleyecektir.

Şekil 5'te verilen hareketli ve mekanik donanıma sahip cihazlar, kapalı sistemler ile kullanıcı arasında güvenlik sağlamaktadır. Fakat kullanıcı operatörlerin bu gibi sistemleri by-pass edip devre dışı bırakması mümkün olabilmektedir.


Şekil 5: RF Anahtar Okuyuculu Yetkili Operatör Araç Kullanımı

Şekil 6 üzerinde gösterilen yüksek tonajlı makinaları için çift el ile presin kapanması sağlanmakta ve operatörün kaza emniyeti amaçlanmaktadır. Fakat bir çok operatör anlamsız gerekçeler ile çift el anahtarlı sistemleri devre dışı bırakarak yüksek tonajlı presleri çalıştırmaktadır. Aynı şekilde bu ve benzeri yüksek tonajlı preslere entegre edilecek olan RF anahtarlı güvenlik ve denetim sistemi ile cihazların üzerinde kaza önleme ve uygun koşullarda çalıştırma imkanı oluşturulabilir. Örneğin; operatörlerin eldivenlerinde bulunacak olan RF etiket ile pres aktif veya deaktif olarak programlanabilir.

Şekil 6'da verilen pres örneğinde olduğu gibi RF etiketler ile yetkili personelin cihazları çalıştırması, mekanik-elektronik güvenlik anahtarlarını devre dışı bırakması mümkün olmayacaktır. Çünkü RF anahtarlı elektronik sistemler sadece yetkili elektronik RF anahtara sahip kişiler için çalışacaktır. Ayrıca güvenlik sistemi mekanik olarak devre dışı bırakılması mümkün olmayacaktır.



Şekil 6: Yüksek Tonajlı Ve Operatör İçin Tehlike Oluşturan Makinalar

Bakım ve Servis Personeli Güvenlik-Etiketleme Sistemi

Şekil 7, elektrik panosu üzerinde kilitleme örneklerini göstermektedir. Bu örneklerde görüldüğü üzere, cihaz bakım ve onarımını yapacak olan personel elektrik panoları üzerinde kilitleme yapmaktadırlar. Çünkü yetkisiz personelin sigortaları açması sonrasında, bakım ve onarım işleri gerçekleştiren personelin yaralanma, ölümlü kaza geçirme durumları olasıdır. Bu çalışmada önerilmiş olan RF anahtarlı sistem ile elektrik panolarında kilitleme ve açma işlemi sadece yetkili personel tarafından yürütülebilir.



Şekil 7: Örnek Mekanik Anahtarlar Ve Servis Çalışması

Çalışmalar otomasyon sistemi tarafından izlenebilir. Bakım ve onarım işlerinde otomasyon sayesinde iş tamamlanma süresi azalabilir. Üretim yapan ve çalışan makinaların devreye alınması daha hızlı olarak sağlanabilir. Ayrıca bakım ve onarım yapan personelin üzerindeki RF anahtarlar ile elektrik panosundan elektrik verilse dahi hareketli makine ve cihazların her koşulda elektronik olarak devre dışı kalması sağlanabilir.

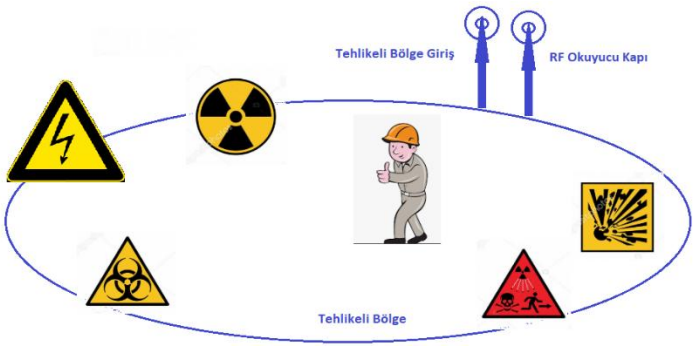
Çalışanların Yetki Bölgesi Takibi

Çalışan yetki bölgesi takibi tehlikeli çalışma alanları içerisinde önem arz etmektedir. Özellikle yetki izni olmayan personelin hata ile tehlikeli bölgelerde çalışması kazaya sebebiyet verebilmektedir. Yetkili olmayan personelin tehlike bölgesinde uygun olmayan KKD ile veya yetkisi olmayan cihaz kullanımları veya yetkisi olmadığı sistemlere yaklaşması yaralanmalara ve ölümlere sebep olmaktadır. Bu ve benzeri durumların önüne geçebilmek için RF anahtarlı sistemler kullanılabilir. Yetkili ve yetkisiz personelin çalışma alanları otomasyon sistemi üzerinden takip edilebilir.

Endüstriyel alanda denetim ve gözetimin zor olması, örneğin inşaat sahalarının tehlikeli bölgelerinin olması, bu nedenle sadece yetkili çalışanların tehlikeli alanlardan izinli çalışması denetimi sağlanabilir.

Çalışma bölgelerindeki izin takip sistemleri yazılı olabileceği gibi RF anahtarlı sistemler sayesinde elektronik olarak yerel ağ üzerinden takip edilebilir.

Şekil 8'de anlatılmaya çalışıldığı gibi yetkisiz personelin RF anahtarlı kimliği ile çalışma bölgesinin takibi mümkün olacaktır.



Şekil 8: Çalışan Yetki Bölgesi Takibi

SONUÇ

Bu kitap bölümü önerisinde, çalışan personelin emniyet ve güvenliğinin sağlanması ve denetlemesi amacıyla proaktif bir sistem önerilmiştir. Sistemin kurulması ve alt yapısının oluşturulması mevcut teknolojik imkanlar açısından zorluk göstermemektedir. Bununla birlikte var olan teknolojik alt yapının kullanılarak gerekli düzenlemelerin, çalışan, çalışma alanları-saha ve cihazlar açısından otomasyon ile sağlanması gerekmektedir. Gelecekte nesnelerin interneti, sensör yapılı ağlar vb. gelişmeler yeni kaza önleme sistemlerinin kullanılmasında kolaylıklar sağlayacaktır.

Bu doğrultuda kazanımlar sağlaması için Radyo Frekansı (RF) anahtarlar ile yetkili yetkisiz operatör denetimi, tehlikeli mekanik cihazlar için operatör güvenliği, bakım-onarım personel güvenliği, tehlikeli bölge çalışma izinleri ve takibi konularında öneriler ve çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada önerilen proje kapsamında tüm çalışan personelin saha üzerinde özellikle inşaat şantiyesi ve benzeri çalışma alanları üzerinde izlenmesi ve takip edilmesi de mümkün olabilmektedir. Personelin üzerinde bulunması gereken kimlik kartlarının RF etiketli olarak düzenlenmesi yeterlidir. Çalışanların RF anahtarlar ile şantiye sahasında RF okuyucu kapılardan geçmeleri sonucunda çalışma alanındaki yerleri kolaylıkla takip edilebilecektir. Böylece çalışan tüm personellerin takibi ve izlenmesi sağlanarak proaktif bir yaklaşım ile emniyet ve kaza önleme gerçekleştirilmiş olacaktır.

RF anahtar ve etiketleme sistemi, uygun fiyat, tasarımlarındaki esneklik ve güvenlik, kullanım kolaylığı nedeniyle birçok alanda uygulama imkanı sunmaktadır. Çalışmamızda kısmen yer verdiğimiz çalışma alanlarından bahsedilmektedir. RF anahtarlı ve etiket sistemleri; güvenlik girişlerinde yetkili personel girişleri için, taşımacılık ve lojistik sektöründe ürün takibi için, pasaport ve kimliklerde elektronik güvenlik için, toplu taşımada elektronik bilet uygulaması olarak, hastane ve sağlık hizmetlerinde hasta

kimliklendirme ve takibi için, kütüphanelerde, müzelerde ve daha birçok alanda uygulama imkanına sahiptir. Gelişen teknoloji ile uygulama alanlarındaki kabiliyetleri artacağı gibi farklı alanlarda da kendisine yer edinecektir. Bu nedenledir ki; RF anahtarlı sistemlerin inşaat sahaları gibi tehlikeli çalışma alanlarında güvenlik ve denetim amacıyla kullanılması mümkündür. Zaman içerisinde de yaygınlaşarak gelişeceği de açıktır.

Bu alanda yayınlanan çalışmalar incelendiğinde RF anahtar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir. Doğal olarak çok farklı alanlarda uygulaması yapılmış olan RF anahtarlı güvenlik ve denetim sistemlerinin, İSG alanında da yaygın olarak kullanılacağı görülmektedir. Bu nedenledir ki akademik olarak yapılacak öneri ve çalışmalar zaman içinde ciddi değer kazanacaktır.

Literatür incelemesinde de görüldüğü gibi tehlikeli çalışma alanlarında özellikle inşaat ve benzeri şantiye alanlarında çalışan denetimleri zorluk içermektedir. Özellikle büyük çalışma alanları, tehlikelerin çokluğu, izin denetim sistemlerinin büyük alanlar nedeniyle zorlaşması; tehlike ve güvenlik risklerini ortaya çıkarmaktadır. Bunun sonucu olarak, insan denetimini otomasyon sistemlerine aktarmak, kaza ve yaralanma istatistiklerinde düşüşe neden olabilir. Literatür çalışmalarında görüldüğü üzere RF anahtarlı sistemler ile çalışan denetimi yayınları bulunmaktadır. Aynı şekilde mevcut teknolojik alt yapılar kullanılarak çalışanların emniyet ve güvenliğinin sağlanması için RF anahtarlı denetim sağlanabilir. Bu denetim geliştirilecek olan yerel ağ yapısı ile merkezi bir otomasyon programı üzerinden takip edilebilir. Geleceğe yönelik olarak literatür çalışmalarında da yer alan yenilikler bu otomasyon sistemine kolaylıkla uyarlanabilir. Örneğin, çalışanların sağlık durumlarının takip edilmesi, çalışanların sahada bulundukları bölgelerin sebep olacağı, fiziksel, kimyasal etkiler ile meslek hastalıkları çıkarımlarında bulunulabilir.

Çok farklı uygulamalara imkan sağlayacak olan esneklikteki RF anahtarlı sistemler uluslararası markette yerini almaya başlamıştır. Her ne kadar RF anahtarlı Güvenlik ve Denetim sistemleri yeni olsa dahi bu alanda çok hızla kendisine yer bulacaktır. Özellikle elektronik cihaz ve ağ teknolojilerine bağlı sistem üreten firmaların, bu pazarda ürünleri olduğunu görmekteyiz. Çalışanların, İş Sağlığı ve Güvenliği kapsamında otomasyon sistemi pazarlayan kurumsal firmaların sayısının da hızla artacağını düşünmemiz gerekir.

Gelecekte daha fazla proaktif ve otomasyon temelli çalışma alanları ve şantiyelerin oluşturulacağı kesindir. Bu nedenle henüz yeni bir alan olan çalışma sahalarındaki kaza önleme ve denetim sistemlerinin otomasyon sistem ve ağlarına dahil edilmesi konusunda çalışmalar artacaktır.

SİMGE ve KISALTMALAR

RF	Radyo Frekansı
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
KKD	Kişisel Koruyucu Donanımlar
RFID	Radyo Frekans Etiket (Identification)
HGS	Hızlı Geçiş Sistemi
ID	(Identification) Kimlik
DC	Doğru Akım
PDP	Pil Destekli Pasif
LF	Düşük frekans
HF	Yüksek frekans
UHF	Çok yüksek frekanslı

REFERANSLAR

Angell, I., Kietzmann, J., RFID and the end of cash. Communications of the ACM. 49 (12): 90–96. doi:10.1145/1183236.1183237. Archived from the original (PDF) on 2014-02-24. Retrieved 9 November 2013.

Awolusia, I., Marks, E., Hallowell, M., Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. Automation in Construction Volume 85, January 2018, Pages 96-106.

Gobbo, J. A., Making the links among environmental protection, process safety, and industry 4.0. Process Safety and Environmental Protection, Volume 117, July 2018, Pages 372-382.

Haddara M., Staaby A.. RFID Applications and Adoptions in Healthcare: A Review on Patient Safety. Procedia Computer Science, Volume 138, 2018, Pages 80-88.

https://www.ohscanada.com/products/the-new-honeywell-esp-rfid-system-and-miller-fall-protection-deliver-real-time-data-for-inspection-inventory-control-and-information-management/.

Jin, R., Zou, P. X. W., Piroozfar, P., Wood, H., Yang, Y., Yan, L., Han, Y., A science mapping approach based review of construction safety research. Safety Science, Volume 113, March 2019, Pages 285-297

Kanan, R., Elhassan, O., Bensalem, R. An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. Automation in Construction Volume 88, April 2018, Pages 73-86.

Kelm, A., Laubat, L., Meins-Becker, A., Platz, D., Khazaee, M.J., Costin, A. M., Helmus, M., Teizer, J., Mobile passive Radio Frequency Identification (RFID)

portal for automated and rapid control of Personal Protective Equipment (PPE) on construction sites. Automation in Construction 36 (2013) 38–52.
Niu, Y., Lu, W., Xue, F., Liu, D., Chen, K., Fang, D., Anumba, C., Towards the “third wave”: An SCO-enabled occupational health and safety management system for construction. Safety Science, Volume 111, January 2019, Pages 213-223
Yu, Y., Guo, H., Ding, Q., Li, H., Skitmore, M., An experimental study of real-time identification of construction workers' unsafe behaviors Volume 82, October 2017, Pages 193-206.
Zhu, Z., Park, M.W., Koch, C., Soltani, M., Hammad, Davari, K., Predicting movements of onsite workers and mobile equipment for enhancing construction site safety. Automation in Construction 68 (2016) 95–101.

Nano Katkılarla Ahşap Malzemelerin Aleve Karşı Korunması ve Yapı Malzemelerine Yönelik Yeni Nesil Yangın Geciktirici Nanokompozitler

Ceyda BİLGİÇ[1]

Şafak BİLGİÇ[2]

[1] Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ceydabilgic@gmail.com
Orcid No: 0000-0002-9572-3863
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü safakbilgic@gmail.com
Orcid No: 0000-0002-9336-7762

ÖZET

Nanoteknolojinin hızlı gelişimi, gelecekte çevre için genellikle toksik olan normal kimyasalları kısmen ikame edebilecek ve hatta bunların yerini alabilecek benzersiz özelliklere sahip yeni malzemeler sunmaktadır. Bu güncel incelemede, otomotiv, denizcilik, inşaat ve imalat gibi temel sanayi sektörlerinde, daha düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilirlik motivasyonuyla ahşap bazlı kompozitlerde, kil katkılı alev geciktiriciler (FR'ler) konusu araştırılmıştır. Gelişmiş ahşap bazlı kompozitlerin sentezi, karakterizasyonu ve performansının kapsamlı bir araştırılması yapılmıştır. Son yenilikleri ve gelecekteki araştırma yönlerini ana hatlarıyla belirterek, bu inceleme çevre dostu kil katkılı ahşap kompozitlerin, yeni nesil yangın geciktiriciler olarak kullanılabilirliğinin potansiyelini vurgulamaktadır. Bu ilerleme, sürdürülebilir yüksek performanslı teknoloji uygulamalarında ahşabın genişletilmiş kullanımını destekler ve bu durum karbon nötrlüğüne ulaşmaya yönelik küresel girişimlerle uyumludur.

Karbon nötrlüğüne yönelik artan küresel bağlılık, çevresel faydaları nedeniyle ahşabın önemli bir unsur olarak ortaya çıkmasıyla sürdürülebilir yapı malzemelerine daha fazla odaklanılmasını sağlamıştır. Ahşap, iyi mekanik özellikleri, düşük üretim maliyetleri ve yenilenebilirlik gibi birçok avantajı nedeniyle endüstiyel bir malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yanıcılığı birçok sektörde kullanımını sınırlamaktadır. Ahşabın yanıcılığı sorununu çözmek için, ahşabın yangın güvenliğini artırmanın yöntemlerinden biri, nanokatkıların ilavesidir. Bu nedenle, birçok araştırmacı çevre dostu ve düşük maliyetli nanokil katkılarının alev geciktirme kaynağı olarak kullanılabileceğini keşfetmiştir. Ahşap kompozit malzemeler hazırlanarak, nanokil, grafen oksit ve metal oksitler gibi nanopartikülleri ahşap matrislere entegre ederek gelişmiş termal kararlılık ve kömürleşme özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Bu durum, ahşap alt tabakaların yanıcılığını önemli ölçüde azaltarak ısıya ve oksijene karşı sağlam bir bariyer oluşturmasını sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Odun Esaslı Kompozit Malzemeler, Kil, Alev Geciktiriciler, Karbon Nötrlüğü, Ekoloji

GİRİŞ

Ahşap, eski çağlardan beri bina yapımında önemli bir malzeme olmuştur. Ahşap yenilenebilir, çevre dostu, uygun maliyetli bir yapı malzemesidir ve yakın gelecekte kullanımı büyük miktarlarda artabilir. Örneğin Avrupa'da, ahşap iskeletli çok katlı yapıların pazar payının %30, hafif ahşap yapıların pazar payının ise buna karşılık %50 oranında artacağı varsayılmaktadır (Hurmekoski vd., 2023:1). Ekolojik bir perspektiften bakıldığında, geleneksel inşaat malzemelerinin ahşapla değiştirilmesi,

malzeme imalatıyla ilgili toksik gaz emisyonlarında önemli bir azalmaya sebep olacaktır (Horx-Strathern vd., 2017:1). Kanada hükümetinin başlattığı Ahşapla Yeşil İnşaat (GCWood) gibi ahşap malzemelerden yapılmış binalarla ilgili birçok proje dünya çapında devam etmektedir. Kanada'daki inşaat projelerinde daha fazla ahşap kullanımını teşvik etmek için tasarlanmış bir programdır (Lahtela vd., 2023:1).

Ahşap en yaygın ve dayanıklı doğal malzemelerden biridir (Song vd., 2018:224). Düşük ağırlığı, aşırı mukavemeti ve düşük fiyatı nedeniyle inşaat malzemelerinde, elektrik enerjisi tüketiminde, ulaşımda ve mobilyalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Berglund ve Burgert, 2018:1; Zhu vd., 2016:5181; Jia vd., 2019:9993). Ancak ahşap yanıcıdır ve bu özellikleri yoğun nüfuslu bölgelerde inşaat ve mobilyalarda ahşap kullanımını sınırlamaktadır (Wang vd., 2017:325; Kong vd., 2018:3349). Amerika Birleşik Devletleri'nde ahşap yapılar, alçak katlı kamu yapılarının %95'inden fazlasını ve endüstriyel binaların %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır (Lu vd., 2021:1). Selüloz, lignin ve hemiselüloz ahşap hücre duvarlarının ana bileşenleridir (Zhang vd., 2022). Yangının neden olduğu hasar önemli bir küresel sorundur. Bu nedenle, ahşap için yenilikçi alev geciktirici işlem tekniklerine giderek daha fazla önem verilmektedir (Zhang vd., 2021:1). Çalışmalar, alev geciktiricilerin eklenmesinin, ahşap malzemelerin yapısını ve doğal görünümünü etkilemeden yangın güvenliğini artırmanın en etkili yollarından biri olduğunu göstermiştir (Qiu vd., 2018:108; Shao, vd., 2019:1; Yang vd., 2019:1).

Tekstil, ulaşım, elektrikli ekipman ve yapı malzemelerinde birincil olan alev geciktirici (FR) malzemelere olan artan talep, iki temel yaklaşımın geliştirilmesini teşvik etmiştir: yangın koruma sistemlerinin konuşlandırılması ve yangın risklerini azaltmak için alev geciktiricilerin hedef malzemelere entegre edilmesidir (Kim vd., 2018:64). Stratejiler, kimyasal modifikasyonlar, yüzey işlemleri, yangına dayanıklı polimerlerin kullanılması veya normal katkı maddeleri (NA'lar), reaktif katkı maddeleri (RA'lar) veya kombinasyonları olarak gruplandırılan alev geciktirici katkı maddelerinin (FRA'lar) eklenmesini içerir. Malzemenin yanmasını önlemeyi, en aza indirmeyi, bastırmayı veya durdurmayı amaçlarlar. Alev geciktirici sistemleri katı, sıvı veya gaz fazlarında kimyasal veya fiziksel mekanizmalar aracılığıyla çalışır (Morgan ve Gilman, 2013:259; Mngomezulu vd., 2014:149). Daha güvenli yangın geciktiricilere yönelik acil ihtiyaç göz önüne alındığında, odak noktası çevre dostu alternatiflere kaymıştır. Bu geciktiricilerin ahşap esaslı malzemelere uygulanması yöntemleri arasında, emprenye (Mngomezulu vd., 2014:149) ve yüzey kaplamaları (Shao vd., 2019:1) yer almaktadır. Emprenye, ahşabın derinlerine nüfuz etmede etkili olmasına rağmen, genellikle pahalıdır ve önemli miktarda kimyasal ve çözücü israfına yol açarak çevresel ve ekonomik endişelere neden olmaktadır. Buna karşılık, kaplamalar, özellikle dayanıklılık ve etkinliği garantilemek için yapıştırıcı polimerler kullanıldığında daha verimli ve daha az israfa yol açan bir alternatif sunmaktadırlar. Bu çevre dostu kaplamalar yalnızca yangına dayanıklılığı

artırmakla kalmaz, aynı zamanda yangın güvenliğine yönelik daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşıma da katkıda bulunurlar.

ALEV GECİKTİRİCİLERİN AHŞAP VE AHŞAP ÜRÜNLERDEKİ ETKİ MEKANİZMALARI

Ahşap oldukça yanıcı bir malzemedir ve ateşe maruz kaldığında kolayca yanar. Ahşabın termal bozunma senaryosu iyi bilinmektedir. Su kaybı 100°C'de gözlenir ve ardından hemiselülozların termik bozunması yaklaşık 290°C'de başlar ve selüloz 320 ila 380°C arasında bozunur. Lignin 200 ila 500°C arasında geniş bir bozunma sıcaklık aralığına sahiptir (Kim vd. 2010:9797). Ahşabın polimerik bileşenlerinin termal oksidasyonu sırasında, uçucu gazlar, katran (levoglukosan) ve karbonlu kömür karışımı üretilir (Lowden ve Hull 2013:1). Bir yangın durumunda, alev geciktiricilerler yanma sürecini engellemek veya bastırmak için hareket eder. Alev geciktiriciler, yapılarına bağlı olarak, buhar fazında veya yoğunlaştırılmış fazda kimyasal ve/veya fiziksel bir mekanizma aracılığıyla yanma sürecine, yani ısıtma, tutuşma, piroliz veya alev yayılması sırasında müdahale edebilmektedirler (Hodgson ve Gras, 2002:1625).

Genel olarak, malzemelerin yangın geciktiriciliğini arttırmak için çeşitli yaklaşımlar kullanılabilir: ahşabın piroliz yolunun veya kimyasal mekanizmanın değiştirilmesi, izole edici yüzey tabakasının oluşturulması, ısının emilmesi, substratın soğutulması ve piroliz gazlarının seyreltilmesi (LeVan ve Winandy, 1990:113). Ahşabın ana bileşeni selülozun termal bozunması genellikle katran (levoglukosan) ve yanıcı gazların oluşumu ve/veya kömür yoluyla gerçekleşir, bu da karbon oksitleri ve atık oluşumunu takip eder (Östman vd., 2006:327). Bazı alev geciktirici türlerinde bulunan katalitik dehidrasyon reaksiyonu, hidroksil gruplarının selüloz polimerinden ayrılmasıyla sonuçlanır ve buda kömür oluşumuna neden olur. Char, yanma sırasında uçucu gazlar şeklinde açığa çıkan H ve O atomları nedeniyle esas olarak karbondan oluşur.

Grafitik yapıyı temsil eden kömür, onlarca yıl önce odun yanma teorileri hakkındaki geleneksel yayında da belirtildiği gibi 3000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bile kararlıdır (Browne, 1958:1). Bu nedenle, odun kömürünün varlığı ısı ve yakıt gazlarının transferini sınırlandırarak bozunma senaryosunu önemli ölçüde değiştirebilir, böylece alevlerin yayılmasını azaltabilir ve hatta kendi kendine sönebilir. Selüloz ile birlikte, ligninin ayrışması kömür verimine önemli bir katkıda bulunmaktadır (Lowden ve Hull 2013:1). Ayrıca, piroliz gazlarının buharlaşması için bir bariyer rolü oynayan ve yanan malzemeye oksijen erişimini azaltan koruyucu bir tabakanın oluşumu sağlamaktadır. En etkili bariyer özellikleri, yüksek sıcaklıklarda kolayca genleşen (genişleyen) ve alt katman malzemesini yangından koruyan gözenekli bir tabaka oluşturan şişen kaplamaları göstermektedir. Üçüncü bir yaklaşım, endotermik olarak bozunan (ayrışan), ısıyı emen ve alt tabakayı

soğutan, böylece tutuşmayı geciktiren katkı maddeleri kullanmaktır. Bu durum, yanmayı yavaşlatır ve hatta sıcaklık yanma sürecini sürdürmek için gereken sıcaklığın altına düşerse alevin sönmesine bile neden olabilir.

Bir sonraki yaklaşım, yanıcı olmayan (yanmayan) birçok gaz, amonyak, karbondioksit ve su buharı üretmek ve böylece yanıcı gazları seyreltmektir. Genellikle iki veya daha fazla mekanizma aynı anda çalışır ve sinerjik bir etkiye sahip olabililer. Bununla birlikte, yangından korunmayı kolaylaştırmak için farklı mekanizma etkilerine sahip alev geciktiricilerin bir kombinasyonu kullanılabilir.

Alev geciktirici etkinliğinin yanı sıra, alev geciktiricilerin ahşap dayanıklılığı ve çevre üzerindeki etkileri, yani ekolojik kaygı da dikkate alınmaktadır. Günümüzde kerestede en çok uygulanan alev geciktiricilerler fosfor ve bor içerikli olduğu kadar metal ve azot içerikli olanlardır. Alev geçikrici içeren toksik bileşikler, örneğin halojenler, çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle yasaklanmıştır (Yönetmelik (AB) No 305/2011, 2013, REACH Yönetmeliği (EC) No 1907/2006, 2006). Borik asit, üreme üzerindeki olumsuz etkisi nedeniyle Çok Yüksek Endişe Maddesi (SVHC) (Substance of Very High Concern) olarak REACH listesine alınmıştır (Lowden ve Hull, 2013:1).

Ahşap dayanıklılığı, ahşap son ürününün higroskopikliğini artıran higroskopik alev geciktiricilerden olumsuz etkilenebilir. Bu bağlamda, yangına dayanıklı ahşap ürünler için Yangın Reaksiyonlarına Dayanıklı (Durability of Reaction to Fire (DRF)) performans sınıflarına sahip yeni bir İskandinav sistemi (Nordic system) geliştirilmiştir (Östman vd., 2006:327).

Alev geciktirici ahşap malzemelerin dayanıklılık testi ve sınıflandırması için bu yeni yöntemin CEN bünyesinde (Avrupa Standardı, ulusal CEN ve CENELEC Üyeleri tarafından ulusal bir standart olarak uygulanır ve bu nedenle standartlar kataloğuna dahil edilir) bir Avrupa yöntemine de aktarılması gerekmektedir. Alev geçiktirilmiş ahşap son ürün gereklilikleri için geliştirilen yöntemde, iç ve dış mekan ahşap bazlı ürünler için nem içeriği ve yangına dayanım tepki parametreleri NT Fire 054'e uygun olarak kaydedilir. İç mekan kullanımına yönelik malzemeler için genellikle sadece higroskopik özellikler incelenir, NT Build 504. Dış kapı uygulamaları için hızlandırılmış yaşlandırma testi kullanılır, NT Fire 053.

Uygulamada, suda çözünmeyen sızıntı direnci sistemleri geliştirilmiştir:

i) Ahşaba emprenye edildikten (emdirildikten) sonra polimerize olan reçineler (üre, melamin, disiyandiamid, fosforik asit ve formaldehit karışımlarını içerir);

ii) Doğrudan selüloza (hücreye) bağlanan aşı polimer yangın geciktiriciler (Russell vd., 2007:1).

Ahşap ürünler genellikle iki yöntem kullanılarak alev geciktiricilerle modifiye edilebilirler: kimyasal maddelerle emprenye etme (basınçsız ve yüksek basınçlı) ve yüzey işlemi veya kaplama yöntemleridir (Bednarek ve Kaliszuk-Wietecka, 2007:79, Seo vd., 2016:1935). Yonga levha veya kontrplak gibi ahşap malzemeler, alev geciktiricilerin yapıştırıcı sisteme yüklenmesiyle modifiye edilebilmesidir. Doğal elyaf kompozitler/ahşap-plastik kompozitler söz konusu olduğunda, yangın geciktiriciler genellikle eksüzyon, kalıplama veya presleme prosedürlerinden önce birleştirme prosedürleri sırasında diğer bileşenlerle karıştırılmaktadırlar (Turku ve Karki, 2014:180). Emprenye, kaplama veya daldırma ile karşılaştırıldığında, bir ahşap yapıya derinlemesine kimyasal nüfuz sağlamaktadır. Örneğin, basınçla emprenye edilmiş çamda, tüm öz (diri) odun genellikle tamamen emprenye edilirken, yüzeyle işlenmiş numunelerde, alev geciktirici penetrasyon (nüfuz etme) derinliği 1 mm veya daha azdır (Dineff vd., 2011:28).

Küçük boyutları ve suda yüksek nedeniyle inorganik tuzlar, ticari düzeyde ahşap ve ahşap ürünlerin alev geciktiriciliği için çoğunlukla uygulanmaktadır. Mono- ve diamonyum fosfat, amonyum sülfat, boraks, borik asit, çinko klorür, guanil üre fosfat (guanyl urea phosphate) ve sodyum tetraborat tuzlar çoğunlukla kullanılmaktadır (White ve Dietenberger, 2010:1). Ancak alev geciktiriciler ile emprenye işleminde ahşap mukavemetinin zarar görmesi, korozyonun hızlanması ve zehirli gazlar gibi bazı olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir (Russell vd., 2007:1; Bednarek ve Kaliszuk-Wietecka, 2007:79). Mikro/nano boyutlu partiküllerle emprenye işleminin etkinliği ahşap türüne, örneğin ahşabın anatomisine ve kimyasalların ahşaba nüfuz etmesini sağlayan ahşap yapısındaki açıklıkların boyutuna bağlıdır. Ahşabın kesilmesi (oyma) (Islam vd., 2013:395, Civardi vd., 2016:1) veya buharla ön işlemden geçirilmesi (Ishikawa vd., 2005:819, Islam vd., 2013:395) kimyasalların nüfuz etmesini ve tutulmasını iyileştirebilmektedir.

YANICILIK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ, MEKANİZMALARI, PARAMETRELERİ VE STANDARTLARI

Bir malzemenin yanıcılık değerlendirmesi, malzemenin amaçlanan uygulamasına bağlı olarak tutuşabilirliğinin, alev yayılma hızının ve ısı salınımının değerlendirilmesini içermektedir. Ürün geliştirme sırasında malzemeleri incelemek veya üretilen ürünleri test etmek için endüstriyel ve akademik laboratuvarlarda küçük, orta veya tam ölçekli yanıcılık testleri yoluyla çeşitli yanıcılık kriterleri değerlendirilmektedir. Yaygın testler arasında atomik kuvvet mikroskobu (AFM), koni kalorimetre testi, mikro ölçekli yanma kalorimetrisi (MCC) veya piroliz yanma akış kalorimetrisi (PCFC), Limit oksijen indeksi testi (LOI), Ohio Eyalet Üniversitesi (OSU) ısı salınım hızı ölçüm düzeneği, termo gravimetrik analiz (TGA) ve sigortacıların

laboratuvarlarında dikey yanma testi (UL 94) bulunmaktadır (Taib vd., 2022:1; Laoutid vd., 2009:100).

Termal bozunma ve yanıcılık değerlendirmesi, Bunsen brülör testi ve kızdırma teli yanıcılık indeksi için yaygın olarak kullanılan yöntemlere ek olarak, yeşil ahşap kompozitleri kapsamlı bir şekilde değerlendirmek ve karakterize edebilmek için başka farklı teknikler de kullanılabilir. Char'ın karakterizasyonu, Raman spektroskopisi, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), Fourier dönüşümü kızılötesi mikroskobu (FTIR mikroskobu) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) dahil olmak üzere çeşitli analitik yöntemler kullanılarak morfolojisinin ve kimyasal bileşiminin incelenmesini içerir.

2006 yılında, Uluslararası Yangın Araştırma Direktörleri Forumu, (International Forum of Fire Research Directors) malzemelere yönelik mevcut küçük ölçekli yangın testi metodolojilerinde mevcut kısıtlamaları kabul etmiş ve iyileştirme yollarını vurgulamıştır. Dolayısıyla bu tanınma (kabul), yangın güvenliği düzenlemelerinde (yönetmeliklerinde) ilerlemelere yol açmıştır (Bill vd., 2006:536). Duman üretimi ve mikro yapı analizi gibi ek karakterizasyonlarla birlikte yangının tam (eksiksiz) bir görünümünü sağlamak için birden fazla değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Emprenye işlemini (prosedürünü) kolaylaştırmak için Ishikawa ve arkadaşları (2005:819), ısıtma tipi bir kurutma basınçlandırıcısı kullanarak ahşabı buharla ön işleme tabi tutmuşlardır (Ishikawa vd., 2005:819). Bu prosedür açık çukurların (oyukların) yok edilmesini sağlayarak ahşabın içine yangın geciktirici çözeltilerin girişi için yol açmıştır. Boraks/borik asit, trifenil fosfat, bisfenol A biskresil fosfat, alüminyum oksit, magnezyum hidroksit ve perfloro bütan sülfonik asit potasyum tuzu gibi çeşitli alev geciktiriciler test edilmiştir. Bor içeren alev geciktirici örneğinde, ön işlem sıcaklığı 120°C'ye kadar artırıldığında alev geciktirici ile emprenye oranının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Koni kalorimetresi sonuçları, ön işlemin ahşabın (odunun) yanıcılığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, ön işlem olmaksızın öz odunun boraks/borik asitle işlenmesi, saf ve alev geciktirici içeren numuneler için pHRR'nin 182 kW/m^2 'den 106 kW/m^2 'ye ve toplam ısı salınımının (THR) 91,2 MJ/m^2 'den 55,4 MJ/m^2 'ye düşmesine neden olmuştur. Ahşabın 120°C'de ön işlemi, en yüksek ısı salınım oranını (pHRR)' nin 23,5 kW/m^2'ye ve THR'nin 7,3 MJ/m^2'ye düşmesine olanak sağlamıştır. UL 'nin yanma testi, basınç işleminden sonra numuneler için tutuşma süresinin önemli ölçüde uzadığını ve yüksek sıcaklıkta ön işlem görmüş numunelerin tutuşmadığını göstermiştir.

İncelenen diğer alev geciktiriciler arasında, dikkate değer bir etkiyi, florokarbon asit tuzu ve organik fosfat göstermiştir. Ahşabın FR'lerle plazma emdirilmesi Pabelina ve arkadaşları (2012:365) tarafından incelenmiştir. Bu yöntemin doğrudan kimyasal işlemden daha çevre dostu olduğu ileri sürülmektedir. Pabelina ve arkadaşları (2012:365) üç farklı yöntemi karşılaştırmıştır: kontrplağın boyanması, basınçla emprenye edilmesi

(emdirme yapılması) ve kontrplağın plazma emdirilmesi (plazma ile emprenye edilmesi). Araştırmacılar yangın geciktiriciler olarak %10 borik asit çözeltisi, %85 fosforik asit (PA) ve piyasada bulunan bazı alev geciktiriciler kullanmışlardır. Fosforik asit plazma işleminden sonra malzemenin termal olarak daha kararlı olduğu, benzer koşullar altında test edilen diğer örneklerle karşılaştırıldığında en yüksek başlangıç sıcaklığına, bozunma sıcaklığına ve kömürleşmiş kalıntıya sahip olduğu belirlenmiştir. (Pabelina vd., 2012:365). Ayrıca, plazma ile emprenye edilmiş fosforik asit malzeme, fosforik asit boyalı veya buhar emdirilmiş numunelere göre daha yüksek termal stabiliteye sahip olmaktadır.

Emprenye yöntemine kıyasla, kaplama daha basit ve daha uygun bir yöntemdir. Yangın geciktirici kaplamalar, bir alt tabakanın kimyasal modifikasyonunu içermez, bunun yerine tutuşma süresini geciktiren ve termal bozulmayı engelleyebilen koruyucu bir tabaka oluşumunu sağlamaktadır (Mariappan, 2017:101). Kaplamanın bir dezavantajı olarak, dış mekan uygulamalarında alev geciktiricilerin bir alt tabakadan sızması, fiziksel hasar veya bazı uygulamaların korunması gereken estetiği, bazı durumlarda alevgeciktirici kaplamaların uygulanmasını sınırlayabilir. Yüzeyin yanıcılığını azaltmak için iki tür kaplama mevcuttur: şişen (intumescent) ve şişmeyen (non-intumescent). Şişen kaplamalar kritik bir sıcaklığa ulaşıldığında, genellikle 200°C civarındaki sıcaklıklarda, düşük yoğunluklu kömürleşmiş bir tabaka oluşturmak üzere şişer, yani kömürleşme ve köpürme süreçlerinin bir kombinasyonunu oluştururdur. Bu tabaka genellikle alt tabakayı alev yayılımından korur ve bir alt tabakadan ve alt tabakaya ısı ve kütle transferi için fiziksel bir bariyer görevi görmektedir. Şişen sistem (1) dehidrasyon ajanı (susuzlaştırıcı madde) veya asit donörü (asit verici), (2) kömürleşme oluşturan bileşenler ve (3) Şişirme (blowing)/köpükleştirici (spumifik) maddenin (ajanın) kombinasyonudur (Bourbigot vd., 2004:499). Şişen sistem eylemi şu şekilde tanımlanabilir: asit üreten bir katalizör, genellikle amonyum polifosfat (APP), bir kömürleşme oluşturucu (nişasta, glikoz, di/tripentaeritritol, selüloz tozları) ile reaksiyona girerek susuzlaşmasını başlatır ve ardından çapraz bağlama yapar ve şişirme (üfleme) maddesi, örneğin üre, melamin veya başka bir katkı maddesi, erimiş kütle içinde gaz oluşturarak köpük meydana getirir ve bu köpük katılaşarak bir bariyer tabakası oluşturmaktadır (Wladyka-Przybylak ve Kozlowski, 1999:33).

Silika, SiO2, ahşap plastik kompozitlerde ammonyum polyphosphate (APP) etkisini arttırdığı bulunmuştur. Koni kalorimetre ve LOI test sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir. Numunelerin yanması sırasında silika partikülleri numunenin üstünde birikme ve APP ile birleşerek kömürleşmiş bir tabaka oluşturma eğiliminde olmuşlardır. Ayrıca silikanın numune yüzeyinin engellediği de tespit edilmiştir (Zhang vd., 2015:38). Habibzade ve arkadaşları (2016:465) kavak ağacını, emprenye işlemi sırasında partikül agregasyonunu önlemek için önceden polimer içinde dağıtılmış olan %0,5-1,5

oranında nano boyutlu ZnO partikülleri ile basınçlı emprenye yöntemini kullanmışlardır (Habibzade vd., 2016:465). İşlem görmemiş ve ZnO ile işlem görmüş numuneler için tutuşma süresi sırasıyla 15 'den 20 s'ye çıkmıştır. Ancak, nanokompozitlerde parlama süresi ve karbonize alan önemli ölçüde artmıştır. Bunun nedeni, nanopartikül dispersiyonu için kullanılan polimer bileşenlerinden biri olan stirenin yanıcı doğasıydı. İşlem görmüş numuneler daha iyi mekanik performans, çekme, eğilme ve sıkıştırma özelliklerinin yanı sıra daha iyi boyutsal kararlılık göstermiştir. Nano boyutlu wollastonitin (CaSiO3) ahşap için etkili bir FR olduğu bulunmuştur, çünkü nüfuz edilemez bir fiziksel bariyer görevi görerek alevlerin ahşap yapıya yayılmasını önlemektedir (Poshtiri vd., 2014:52). Nanoboyutlandırılmış wollastonit ayrıca orta yoğunluklu lif levha (MDF) yangından korunma (Taghiyari vd., 2013:573) ve özellikle yüzey işlemi, wollastonit nanopartikülleri ile reçine modifikasyonuna kıyasla daha etkili olmuştur.

Tablo 1. Silika 10 PHRR'nin odun lifi (WF)/polipropilen (PP)/APP kompozitinin koni kalorimetre ve LOI sonuçları üzerindeki etkisi (Zhang vd., 2015:38).

Örnek/parametre	IT(s)	PHRR (kW/m^2)	Ortalama HRR (kW/m^2)	MLR (g/s)	LOI
PP/WF	12	701	301	0.175	21.4
PP/WF/APP(30)	18	505	199	0.124	27.4
PP/WF/APP(20)/silika(10)	32	428	156	0.11	28.9

*Burada; tutuşma süresini (IT), ısı salınım oranı (HRR), yanma sırasında malzemelerdeki en yüksek ısı salınım oranını (PHRR).

SONUÇLAR

Yapı malzemeleri için yangın geciktirici teknolojilerindeki önemli ilerlemeler sayesinde üretim maliyetlerinde düşüş, ölçeklenebilirlik ve mekanik bütünlük sağlanmış oluyor. Nanoteknolojideki gelişmeler, sürdürülebilirlik hedefleri ve düzenleyici gerekliliklerle uyumlu, yenilenebilir kaynaklar kullanılarak son derece verimli alev geciktiricilerin geliştirilmesini sağlıyor. Çok işlevli ahşap kompozitlerdeki yenilikler yangına dayanıklılığı artırıyor ve aynı zamanda antimikrobiyal özellikler ve termal yalıtım gibi ek avantajlar sağlınmış oluyor. Artan pazar talebi ve daha yeşil çözümlere yönelik düzenleyici destekle, gelecek, çevre dostu polimer nanokompozit kaplamaların ana akım yapı malzemelerine entegre edilmesi, çevresel etkiyi en aza indirirken daha güvenli ortamlar sağlanması için umut verici beklentiler sunmaktadır.

Bu incelemede, ahşap bazlı alev geciktiricileri, yanıcılık testlerini ve ortaya çıkan araştırma eğilimlerini derinlemesine inceliyor. Sürdürülebilir malzeme uygulamalarında yangın güvenliğini artırmak amacıyla çeşitli malzemeler için özelleştirilmiş, özel olarak tasarlanmış çevre dostu alev geciktirciler geliştirmenin hayati gerekliliğinin altını çiziyor. Çevresel

kaygıların arttığı bir ortamda, işbirlikçi çabalar biyobazlı sürdürülebilir biyolojik olarak parçalanabilen ahşap bazlı malzemelere odaklanıyor. Özellikle ısıya veya yangına maruz kalma durumunda termal bozunmaya karşı duyarlılıkları nedeniyle zorluklar devam etmektedir. Bu malzemeleri katkı maddeleri ile güçlendirme çabaları, alev direncinin arttırılmasında ilerleme göstermektedir. Ancak alev geciktiriciliği, mekanik özellikleri ve çevre standartlarını dengelemek hala bir zorluktur. Biyobazlı malzemelerin araştırılması umut verici sürdürülebilir çözümler sunmakta ve çevresel ve endüstriyel talepleri karşılarken potansiyellerini en üst düzeye çıkarmak için sürekli araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

Mevcut çabalar, geleneksel seçeneklerin yerini almayı amaçlayan çevre dostu alev geciktiricelere odaklanıyor. Bununla birlikte, bu doğal elyafların yanıcılığının ele alınması, uygun maliyetli, çevre dostu iyileştirmeler için daha fazla araştırma yapılmasını ve daha güvenli ve sürdürülebilir kompozit uygulamaları için çeşitli doğal elyaf malzemelerinin araştırılmasını gerektirir.

AFM den UL 94 testine kadar standart yanıcılık değerlendirme yöntemlerinin oluşturulması, malzemelerin yangın davranışını anlamak ve yaygın olarak benimsenmesi açısından çok önemlidir. Değerlerine rağmen bu testlerin gerçek dünyadaki yangın senaryolarını kopyalama ve çevresel etkileri dikkate alma konusunda sınırlamaları vardır. Gelişmiş simülasyon teknikleri, gerçek yangın koşullarını yansıtan dinamik testler ve çok ölçekli analizlerin entegre edilmesi gibi iyileştirmelere ihtiyaç vardır. Gelecekteki çabalar standardizasyona odaklanmalıdır.

Ahşap bazlı kompozitler için alev geciktirici malzemelere yönelik araştırmalar, gaz fazının engellenmesi, yoğunlaşmış fazda kömür oluşumu ve hidratlı mineral söndürme sistemleri dahil olmak üzere çeşitli stratejileri kapsar. Geleneksel yöntemler halojen ve fosfor bileşiklerine dayanırken, mevcut eğilimler çevre dostu alternatiflere, özellikle de silanizasyon, oksidasyon ve fosfor bazlı veya borik asit ilaveleri gibi modifikasyonlarla geliştirilmiş selüloz türevli seçeneklere öncelik vermektedir. Devam eden araştırmalar, uygun maliyetli yenilikçi kaplamalara odaklanarak yangın güvenliğini ve sürdürülebilirliği vurgulamalıdır.

Kompozitler için yangın modelleme hayati öneme sahiptir ancak zorluklarla birlikte gelir. Bölge modelleri yangın senaryolarını basitleştirir ancak ampirik ilişkilere dayanır; saha modelleri ayrıntılar sunar ancak hâlâ gelişmektedir. Analitik modeller ısı iletimine odaklanır ancak lokal ısıtma için karmaşıklık gerektirir. Geliştirilmiş modeller, yangınlar sırasında pirolizi, gaz difüzyonunu ve termal tepkileri kapsar. Otomotiv, denizcilik, inşaat ve havacılık gibi kilit endüstriyel sektörlerin daha sürdürülebilir yangın güvenliği malzemelerine odaklanması gerekmektedir. Mevcut incelemenin sınırlamalarından biri olan bu hususlara gelecekteki incelemelerde daha fazla dikkat edilmesi gerekmektedir.

REFERANSLAR

Bednarek, Z. and Kaliszuk-Wietecka, A. (2007). Analysis of the fire-protection impregnation influence on wood strength. Journal of Civil Engineering and Management 13(2), 79-85.

Berglund, L. A., ve Burgert, I. (2018). Bioinspired wood nanotechnology for functional materials. Advanced Materials, 30(19), 1704285.

Bill Jr, R. G., ve Croce, P. A. (2006). The International FORUM of Fire Research Directors: A position paper on small-scale measurements for next generation standards. Fire safety journal, 41(7), 536-538.

Browne, F. L. (1958). Theories of the combustion of wood and its control: a survey of the literature. Madison, WI, USA: Forest Products Laboratory, Forest Service, US Department of Agriculture, Madison, WI, 69 pp.

Bourbigot, S., Le Bras, M., Duquesne, S., ve Rochery, M. (2004). Recent advances for intumescent polymers. Macromolecular Materials and Engineering, 289(6), 499-511.

Civardi, C., Van den Bulcke, J., Schubert, M., Michel, E., Butron, M. I., Boone, M. N., ... ve Schwarze, F. W. (2016). Penetration and effectiveness of micronized copper in refractory wood species. PLoS One, 11(9), 1-15.

Dineff, P., Gospodinova, D., ve Avramov, I. (2011). Plasma aided flame retardation of wood, wooden products and cellulosic materials. Advances in Materials Science, 11(3), 28-42.

Habibzade, S., Taghiyari, H. R., Omidvar, A., ve Roudi, H. R. (2016). Effects of impregnation with styrene and nano-zinc oxide on fire-retarding, physical, and mechanical properties of poplar wood. Cerne, 22(4), 465-474.

Hodgson, D. M., ve Gras, E. (2002). Recent developments in the chemistry of lithiated epoxides. Synthesis, 2002(12), 1625-1642.

Horx-Strathern, O., Varga, C. and Guntschnig, G. (2017). The Future of Timber Construction: CLT – Cross Laminated Timber. A study about changes, trends and technologies of tomorrow. Stockholm: Stora Enso, 108 pp.

Hurmekoski, E., Kunttu, J., Heinonen, T., Pukkala, T., ve Peltola, H. (2023). Does expanding wood use in construction and textile markets contribute to climate change mitigation? Renewable and sustainable energy reviews, 174, 113152.

Ishikawa, T., Mizuno, K., Kajiya, T., Maki, I., Koshizuka, T., ve Takeda, K. (2005). Structural decay and flame retardancy of wood as a natural polymer. Combustion science and technology, 177(4), 819-842.

Islam, M. N., Ando, K., Yamauchi, H., Kamikawa, D., Harada, T., ve Hattori, N. (2013). Impregnation of Preservative and Fire Retardants into Japanese Cedar Lumber by Passive Impregnation. BioResources, 8(1), 395-404.

Jia, C.; Chen, C.; Mi, R.; Li, T.; Dai, J.; Yang, Z.; Pei, Y.; He, S.; Bian, H.; Jang, S.H. (2019). Clear wood toward high-performance building materials. ACS nano, 13(9), 9993-10001.

Kim, S. S., Kim, J., Park, Y. H., ve Park, Y. K. (2010). Pyrolysis kinetics and decomposition characteristics of pine trees. Bioresource technology, 101(24), 9797-9802.

Kim, N. K., Dutta, S., ve Bhattacharyya, D. (2018). A review of flammability of natural fibre reinforced polymeric composites. Composites Science and Technology, 162, 64-78.

Kong, L., Guan, H., ve Wang, X. (2018). In situ polymerization of furfuryl alcohol with ammonium dihydrogen phosphate in poplar wood for improved dimensional stability and flame retardancy. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(3), 3349-3357.

Lahtela, V., Turku, I., ve Kärki, T. (2023). A review of flame protection of wooden material and future potential with nano additives. Baltic Forestry, 29(2), id636-id636.

Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M., ve Dubois, P. (2009). New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. Materials science and engineering: R: Reports, 63(3), 100-125.

LeVan, S. L., ve Winandy, J. E. (1990). Effects of fire retardant treatments on wood strength: a review. Wood and fiber science, 22(1), 113-131.

Lowden, L. A., ve Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. Fire science reviews, 2, 1-19.

Lu, J., Jiang, P., Chen, Z., Li, L., ve Huang, Y. (2021). Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid. Construction and Building Materials, 267, 121042.

Mariappan, T. (2017). Fire retardant coating. In: Giudice, C. and Canosa, G. (Eds.) New Technologies in Protective Coatings. London: InTechOpen, 28(5), p. 101–122.

Mngomezulu, M. E., John, M. J., Jacobs, V., ve Luyt, A. S. (2014). Review on flammability of biofibres and biocomposites. Carbohydrate polymers, 111, 149-182.

Morgan, A. B., ve Gilman, J. W. (2013). An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions. Fire and materials, 37(4), 259-279.

Östman, B. A. L., ve Mikkola, E. (2006). European classes for the reaction to fire performance of wood products, Holz Als Roh-und Werkstoff, 64(4): 327–337.

Pabelina, K. G., Lumban, C. O., ve Ramos, H. J. (2012). Plasma impregnation of wood with fire retardants. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 272, 365-369.

Poshtiri, A. H., Taghiyari, H. R., ve Karimi, A. N. (2014). Fire-retarding properties of nano-wollastonite in solid wood. Philippine agricultural scientist, 97(1), 52-59.

Qiu, X., Li, Z., Li, X., ve Zhang, Z. (2018). Flame retardant coatings prepared using layer by layer assembly: A review. Chemical Engineering Journal, 334, 108-122.

Russell, L. J., Marney, D. C. O., Humphrey, D. G., Hunt, A. C., Dowling, V. P., ve Cookson, L. J. (2007). Combining fire retardant and preservative systems for timber products in exposed applications-state of the art review. Project no: PN04,. Melbourne: Forest and Wood Products Research and Development Corporation (FWPRDC), 40 pp.

Shao, N., Xue, F., Hou, L., Li, D., Gao, Y., ve Zhu, X. (2019). Effects of ternary potassium containing intumescent flame retardant coating on the combustion and thermal degradation properties of reconstituted tobacco sheet. Thermochimica Acta, 678, 178310.

Seo, H. J., Kim, S., Huh, W., Park, K. W., Lee, D. R., Son, D. W., ve Kim, Y. S. (2016). Enhancing the flame-retardant performance of wood-based materials using carbon-based materials. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 123, 1935-1942.

Song, J.; Chen, C.; Zhu, S.; Zhu, M.; Dai, J.; Ray, U.; Li, Y.; Kuang, Y.; Li, Y.; Quispe, N. (2018). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. Nature, 554(7691), 224-228.

Taghiyari, H. R., Rangavar, H., ve Nouri, P. (2013). Feuerhemmende Eigenschaften von Nano-Wollastonit in mitteldichten Faserplatten. European Journal of Wood and Wood Products, 71, 573-581.

Taib, M. N. A. M., Hamidon, T. S., Garba, Z. N., Trache, D., Uyama, H., ve Hussin, M. H. (2022). Recent progress in cellulose-based composites towards flame retardancy applications. Polymer, 244, 124677.

Thybring, E. E., ve Fredriksson, M. (2021). Wood modification as a tool to understand moisture in wood. Forests, 12(3), 372, 1-18.

Turku, I., ve Karki, T. (2014). Research progress in wood-plastic nanocomposites: a review. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 27(2), 180-204.

Wang, X., Zhang, Y., Yu, Z., ve Qi, C. (2017). Properties of fast-growing poplar wood simultaneously treated with dye and flame retardant. European Journal of Wood and Wood Products, 75, 325-333.

White, R. H., ve Dietenberger, M. A. (2010). Fire safety of wood construction. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 18. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: 190 (18), pp. 1-22.

Wladyka-Przybylak, M., ve Kozlowski, R. (1999). The thermal characteristics of different intumescent coatings. Fire and materials, 23(1), 33-43.

Yang, H., Yu, B., Song, P., Maluk, C., ve Wang, H. (2019). Surface-coating engineering for flame retardant flexible polyurethane foams: A critical review. Composites Part B: Engineering, 176, 107185.

Zhang, Q., Zhan, J., Zhou, K., Lu, H., Zeng, W., Stec, A. A., ... ve Gui, Z. (2015). The influence of carbon nanotubes on the combustion toxicity of PP/intumescent flame retardant composites. Polymer Degradation and Stability, 115, 38-44.

Zhang, L., Yi, D., Hao, J., ve Gao, M. (2021). One-step treated wood by using natural source phytic acid and uracil for enhanced mechanical properties and flame retardancy. Polymers for Advanced Technologies, 32(3), 1176-1186.

Zhang, X., Li, L., ve Xu, F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. Forests, 13(3), 439.

Zhu, M.; Song, J.; Li, T.; Gong, A.; Wang, Y.; Dai, J.; Yao, Y.; Luo, W.; Henderson, D.; Hu, L. (2016). Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 28(26), 5181-5187.

Minikanallarda Serpantin Kanal Sayısının Isıl Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Bahadır GEMİCİOĞLU[1]

Tolga DEMİRCAN[2]

1- Arş. Gör.; Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. bahadirgemicioglu@kku.edu.tr ORCID No: http://orcid.org/0000-0001-8403-1848

2- Doç. Dr.; Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. tolgademircan@gmail.com ORCID No: http://orcid.org/0000-0003-4805-6428

ÖZET

Her geçen gün teknolojinin ilerlemesine paralel olarak mühendislik sistemlerinin geometrik boyutları da azalış göstermektedir. Ancak bu boyutsal küçülmenin aksine sistemi oluşturan elemanların oluşturdukları ısıda artış göstermektedir. Daha küçük boyutlara sahip sistem elemanlarının daha yüksek ısı üretimi nedeniyle, sistem sıcaklığında aşırı ısınma ve yüksek sıcaklılar gerçekleşebilmektedir. Bu durum sistemi oluşturan elektronik elemanların görevlerini yerine getirememesine ve bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle elektronik elemanların soğutularak güvenli çalışma sıcaklıklarında tutulması gerekmektedir. Günümüzde bu amaçla birçok soğutma sistemi kullanılmakla beraber, mini kanallı ısı alıcılarda elektronik elemanların soğutması amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında serpantin tip mini kanala sahip ısı alıcılar üzerine yoğunlaşılmıştır. Bu nedenle bu çalışmada elektronik elemanların soğutulması için kullanılan serpantin tip minikanallarda kanal sayısının değişiminin akış karakteristikleri ve ısıl performans üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Serpantin kanal sayısı değiştirilerek (3-5-7 ve 9 kanallı) dört farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu geometriler için beş farklı kütlesel debide sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda artan akış debisi ile basınç farkının, pompalama gücünün ve Nusselt sayısının artış gösterdiği belirlenmiştir. Isı alıcısının sahip olduğu serpantin kanal sayısının artması ile ısı transferinin olumlu yönde etkilendiği ve Nusselt sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Serpantin kanal sayısı dokuz ve kütlesel debinin 0.006 kg/s olduğu durum için en yüksek ısıl performansın gerçekleştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Minikanal, Serpantin, CFD, HAD, Isı Transferi

GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte kullandığımız elektronik sistem ve cihazların boyutları da küçülmeye başlamıştır. Cihaz boyutları küçülerek daha fazla fonksiyonu yerine getirirken, aşırı ısınma problemleri de baş göstermeye başlamıştır. Bu mini cihazların etkin bir şekilde soğutulması ise mühendislerin ve araştırmacıların ilgisini çeken bir konu haline gelmektedir. Bu nedenle bu çalışma da bir elektronik elemanın minikanallı soğutma yöntemi ile soğutulması üzerine yoğunlaşılmıştır. Günümüzde mikro işlemcilerin, PV panellerin ve lithum-ion pillerinin vb. birçok mühendislik siteminin soğutulmasında minikanallı ısı alıcıları kullanılmaktadır. Minikanallı ısı alıcıların birçok çeşidi olmakla beraber, bu çalışmada özellikle serpantin tip minikanallı ısı alıcılarının ısıl ve akış karakteristikleri üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda bu çalışmada, serpantin tip minikanala sahip bir

ısı alıcısında serpantin kanal sayısının ve akış debisinin değişiminin performans üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Literatür araştırması yapılmış ve bazı çalışmalar detaylı bir şekilde aşağıda verilmiştir.

Ho ve ark. [1] mini/mikro kanallı çift katmanlı ısı alıcısını soğutma performansı üzerine çalışmışlardır. İlgili çalışmada, mini kanallı ısı alıcısının hidrolik çapı 0,12 cm ve en boy oranı ise 3'tür. İki kanal arasındaki kanatçıkların genişliği 0,04 cm'dir. Mini kanal ve mikro kanalın toplam genişliği aynıdır ve 1,44 cm'dir. Tek katmanlı mikro kanallı ısı emicisi yerine çift katmanlı mini/mikro kanal kullanımıyla basınç kaybının azaldığını gözlemlemişlerdir. Toplam 345,69 cm^3/dak hacimsel debi için, tek katmanlı mikro kanallı ısı emicisi yerine çift katmanlı mini/mikro kanal kullanılmasıyla basınç kaybını yaklaşık %35,41 azaltmışlardır. Toplam hacimsel debi arttıkça Rh,max,dl azaldığını gözlemlemişlerdir. Ho ve ark. [2] tek katmanlı mikro kanalla, mini/mikro kanallı çift katmanlı ısı alıcısının nanoakışkan kullanımı durumunda soğutma performansını karşılaştırmışlardır. Saf su ve alümina-su nanoakışkanını soğutucu akışkan olarak kullanmışlardır. Mini/mikro kanallı çift katmanlı ısı alıcısının, tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcısının yerine kullanılması durumunda basınç düşüşünün önemli ölçüde azaltılabileceğini gözlemlemişlerdir. Hacimsel debi oranı 2'den düşük olduğu durumda, mini/mikro kanallı çift katmanlı ısı alıcısının ortalama konveksiyon ısı transfer katsayısının tek katmanlı mikro kanallı ısı alıcısından daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

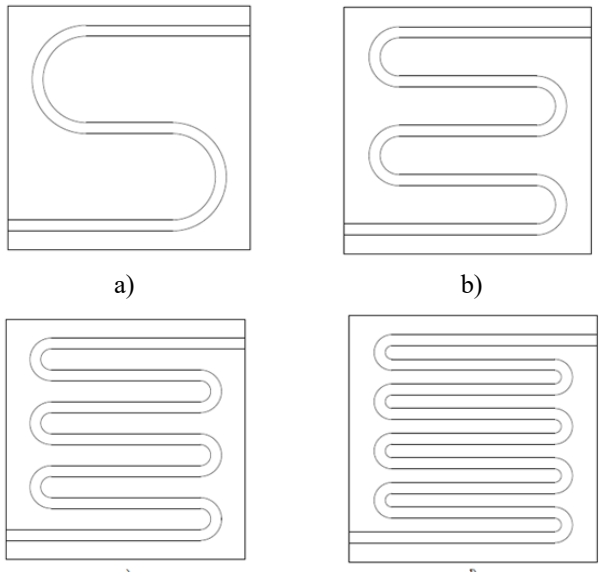
Zhang ve ark. [3] çekirdekleştirici etkenle zenginleştirilmiş nanoakışkanların manifold mini kanallarında akış ve ısı transfer davranışını incelemişlerdir. Çalışma akışkanları olarak; eikosan, eikosanol ve metal oksit parçacıklarından (nano-MgO) hazırlanan kompozit nano faz değişim emülsiyonlarını (NPCE) kullanmışlardır. Bu akışkanların düşük aşırı soğutmaya, yüksek termal iletkenliğe ve yüksek stabiliteye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu NPCE'leri kullanarak iki mini kanalda konvektif ısı transferi çalışmaları yapmışlardır. Kanal tipinin, NPCE'lerin ve Re sayısının ısı transferi, akış karakteristikleri ve genel performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak hazırladıkları NPCE'nin suya kıyasla mini kanallardaki ısı transfer katsayısını geliştirebildiğini gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %6 eikosan +%1 nano-MgO+0,6 eikosanol karışımının kullanımının, ısı transfer katsayısında %29,7 ile en yüksek artışı sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca manifold mini kanalın dikdörtgen mini kanala göre daha iyi kapsamlı performans gösterdiğini bulmuşlardır. Genel olarak kompozit nanoakışkanlı manifold MCHS'nin değerlendirilen performans göstergelerinin dikdörtgen MCHS'ninkinden %17,9 daha yüksek çıktığını tespit etmişlerdir.

Hussein [4] çoklu mini kanallı bir ısı alıcısında; kare pimli kanatçıkların etkisini; ısı transferi ve hidrotermal performans açısından sayısal olarak irdelemiştir. Akış dağılımının iyileştirilmesi yoluyla akışın kötü dağılım sorununu çözecek ısı alıcılar üzerinde yoğunlaşmıştır. Kare kanatçıklar ve kare pimli kanatçıklar içeren yenilikçi ısı alıcısının hidrotermal performansını sayısal simülasyonlarla incelemiştir. Araştırmasında tek fazlı akış, zamandan bağımsız koşul ve soğutucu olarak su kullanmıştır. Kütlesel debiyi 0,0021-0,0045 kg/s aralığında tutmuştur. Deneyden elde edilen verilerden; değiştirilmiş kanalların geleneksel dikdörtgen kanallara göre daha iyi ısı transferi sergilediğini gözlemlemiştir. Kütlesel debi artışıyla ortalama Nusselt sayısının, basınç düşüşünün ve performans endeksinin artmasına, ortalama termal direncin azalmasına neden olduğunu belirlemiştir. Test edilen tüm yeni konfigürasyonlar arasında, kare kanatçıklara sahip ve kare pin kanatçıklı çoklu mini kanallı (SSPMMCHS) ısı alıcısının, Nusselt sayısında geleneksel tasarımla karşılaştırıldığında iki kattan fazla artış gösterdiğini tespit etmiştir.

Ghorbani ve ark. [5] yakınsak-ıraksak mikrokanallar aracılığıyla yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistemin geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Yakınsak-ıraksak mikrokanalları üç genlik, üç dalga boyu ve farklı Reynolds sayılarında incelemişler ve sonuçları basit mikrokanallarla mukayese etmişlerdir. Çıktı sonuçlarını sıcaklık, basınç, hız eğrileri, Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve etkinlik oranı olarak sunmuşlardır. Yakınsak-ıraksak mikrokanalları, basit mikrokanallarla karşılaştırdıklarında; kanal boyunca hız gradyanları yaparak duvar sıcaklığını yaklaşık 0,4-2 Kelvin düşürdüklerini tespit etmişlerdir. Sıcaklıktaki düşüşün en iyi durumda ısı transfer kapasitesinin 3 kata kadar artmasına yol açar ve en kötü durumda 1,5 katına kadar artış sağladığını bulmuşlardır. Dalga boyunun arttırılması sistemin performansını artırırken, daha büyük dalga genliklerinde ise tam tersi bir eğilim görmüşlerdir.

2. PROBLEMİN TANIMLANMASI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

Bu çalışmada serpantin tip minikanala sahip bir ısı alıcısı ele alınmıştır. Bu minikanalda serpantin kanal sayısı değiştirilerek 3 kanallı, 5 kanallı, 7 kanallı ve 9 kanallı olmak üzere dört farklı model geometrisi belirlenmiştir. Bu kapsamda oluşturulan model geometrilerin şematik gösterimi Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Sayısal modellerin şematik gösterimi

Çalışma kapsamında oluşturulan dört model tipinin geometrik boyutları aynı alınmış sadece serpantin kanal sayısı değiştirilmiştir. Bu kapsamda 100x100x7 mm boyutlarında alüminyum malzemeden oluşan blok şeklinde bir ısı alıcısı tasarlanmış ve içerisine 4,5x2,5 mm kesit alanına sahip serpantin şeklinde bir kanal açıldığı düşünülmüştür. Minikanalın alt yüzeyine sabit bir ısı akısı uygulanmıştır. Serpantin kanal içerisinden ise soğutucu akışkan olarak su geçirildiği varsayılmıştır. Suyun ve alüminyumun termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Termofiziksel Özellikler [7]

	k (W/mK)	ρ(kg/m^3)	μ (Pas)	c_p (J/kg^{o}C)
Su	0,6	998,2	0,001003	4182
Alüminyum	37	-	-	-

Problemin sayısal olarak çözülebilmesi için diferansiyel denklemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan diferansiyel denklemlerin [8] genel hali aşağıda verilmiştir.

2.1. Diferansiyel Denklemler

Süreklilik Denklemi [8]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \quad (1)$$

Momentum Denklemi (x-yönlü) [8]

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (2)$$

Momentum Denklemi (y-yönlü) [8]

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

Momentum Denklemi (z-yönlü) [8]

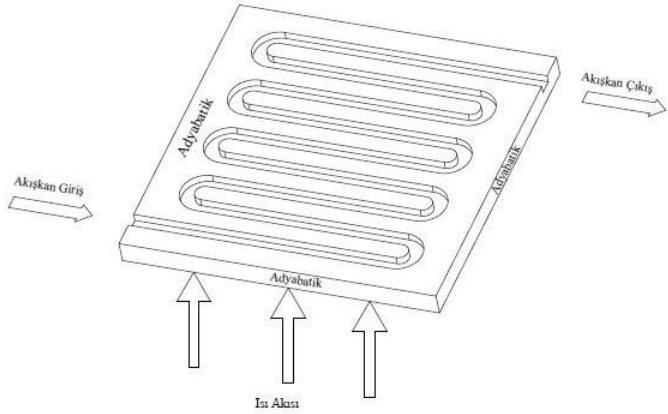
$$\rho\left(u\frac{\partial z}{\partial x}+v\frac{\partial z}{\partial y}+w\frac{\partial z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 z}{\partial z^2}\right) \quad (4)$$

Enerji Denklemi [8]

$$\rho\, c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=k_f\nabla^2 T+2\mu\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right)$$
$$+\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \quad (5)$$

2.2. Sınır şartları

Minikanallı ısı alıcısının alt yüzeyine sabit 10000 W/m2 ısı akısı uygulanmış, diğer tüm katı yüzeylerin yalıtılmış olduğu varsayılmıştır. Akışkanın kanal giriş kütlesel debisi 0,02-0,06 kg/s aralığında değiştirilmiş, kanal çıkış basıncı ise atmosfer basıncı olarak kabul edilmiştir. Minikanalın sınır şartlarının şematik gösterimi Şekil 2'de görülmektedir.



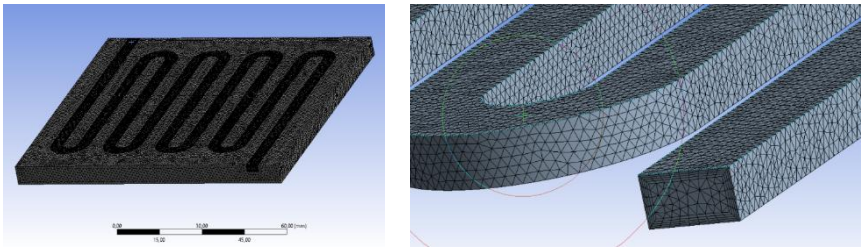
Şekil 2: Sınır şartlarının şematik gösterimi

3. SAYISAL YÖNTEM

Öncelikle serpantin tip minikanallı ısı alıcısı için katı modeller oluşturulmuştur. Sonra bu katı modellere meshing programı yardımıyla ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra Ansys Fluent paket programı aracılığı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analiz aşamasında, akış laminer olarak kabul edilmiş ve SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Momemtum ve enerji denklemlerinin çözümünde second order upwind metodu tercih edilmiştir. Tüm denklemlerin yakınsama kriteri ise 10^{-9} olarak belirlenmiştir.

3.1. Optimum Ağ Yapısının Belirlenmesi

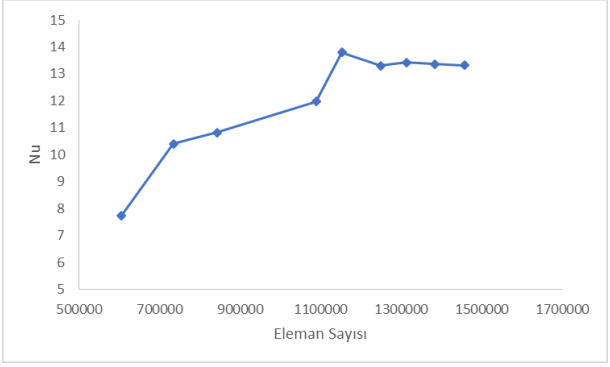
Problemin diferansiyel denklemlerinin sayısal olarak çözülebilmesi için, model geometrinin düğüm noktalarına ayrılarak bir ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda, akışın geçtiği kanallara daha yoğun, katı kısma ise daha gevşek bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca akışkanın yüzeyle temasta olduğu sınır tabaka bölgelerinde ise inflation komutu kullanılarak daha sık bir ağ yapısı sağlanmıştır. Oluşturulan ağ yapısının görünümü Şekil 3'de verilmektedir.



a) b)

Şekil 3: Kullanılan ağ yapısının görünümü a) tüm geometri b) sadece akışkan bölge

Elde edilen sayısal sonuçların ağ yapısından etkilenmemesi ve daha güvenilebilir sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla, oluşturulan model geometri için farklı düğüm sayılarında ağ yapıları oluşturulmuştur. Bu ağ yapıları kullanılarak simülasyonlar yapılmış, değişen düğüm sayılarının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenerek optimum bir ağ yapısı belirlenmiştir. Nusselt sayısının ağ yapısını oluşturan eleman sayısına göre değişimi Şekil 4'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 1200000 eleman sayısından sonra Nusselt sayısının değeri pek değişmemektedir. Bu nedenle eleman sayısı yaklaşık olarak1300000 olan ağ yapısı optimum ağ yapısı olarak belirlenmiş ve tüm analizler bu ağ yapısı için yapılmıştır.

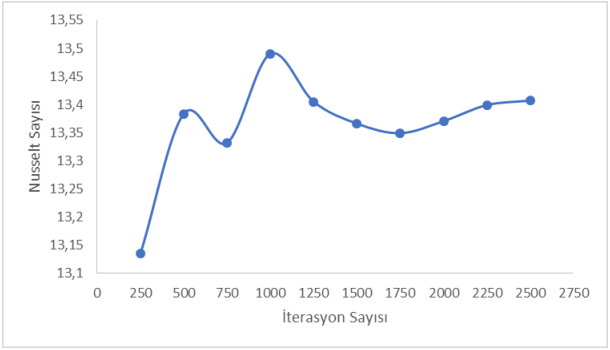


Şekil 5: Nusselt sayısının ağ yapısına göre değişimi

3.2. Optimum İterasyon Sayısının Belirlenmesi

Benzer şekilde sayısal sonuçların iterasyon sayısından etkilenmemesi amacıyla, farklı iterasyon sayısına sahip analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak oluşturulan Nusselt sayısının iterasyon sayısına göre değişimini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir.

Şekilden de görüldüğü üzere yaklaşık olarak 1250 iterasyondan sonra sonuçlar fazla değişmemektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında yapılan tüm analizler için minimum 1400 iterasyonun tamamlanması beklenmiş ve sonuçlar alınmıştır.

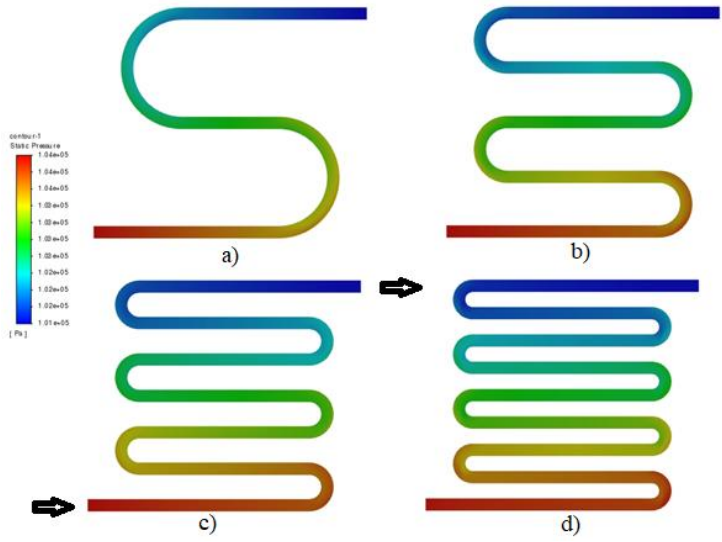


Şekil 6: Nusselt sayısının iterasyon sayısına göre değişimi

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

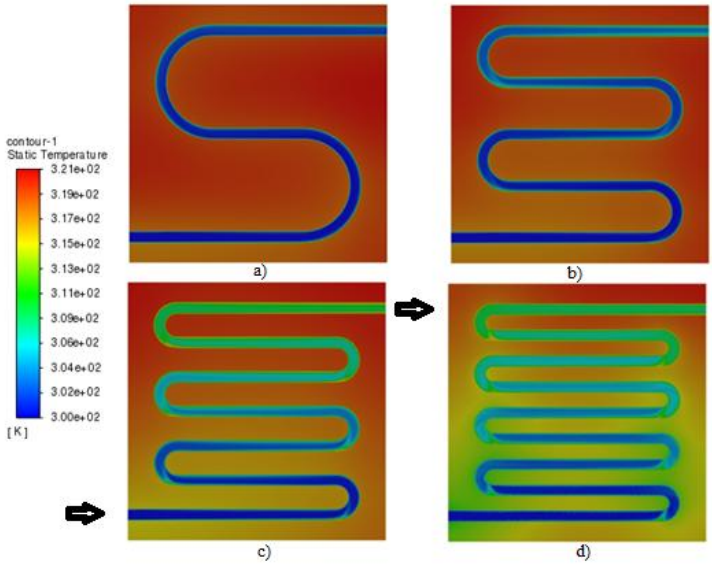
Bu çalışmada serpantin tip minikanallı bir ısı alıcısının ısıl ve akış karakteristikleri belirlenerek, ısı alıcısının ısıl performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda serpantin tip minikanal geometrisi belirlenmiş ve serpantin kanal sayısı değiştirilerek (3-5-7-9 kanal) dört farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Tüm bu model geometrilerinde 5 farklı kütlesel debi için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar için oluşturulan grafikler aşağıda detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Farklı kanal sayısına sahip minikanallar için basınç dağılımlarının değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde serpantin kanal sayısındaki artışın basınç kaybı üzerinde artırıcı bir etkisinin olduğu görülmektedir. Üç serpantin kanal için minimum basınç kaybı gözlemlenirken, dokuz serpantin kanal kullanılması durumunda en yüksek basınç kaybı değerlerine ulaşılmıştır. Serpantin sayısındaki kademeli artış neticesinde basınç farkı artış göstermiştir.



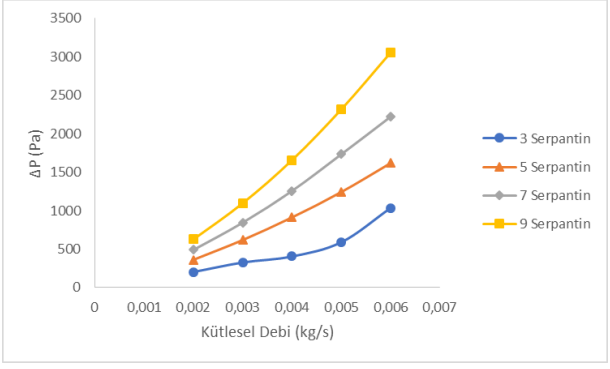
Şekil 7: Farklı model geometrileri için basınç dağılımı a) 3 kanallı, b) 5 kanallı, c)7 kanallı, d) 9 kanallı

Şekil 8'de farklı serpantin kanal sayısına sahip modeller için elde edilen sıcaklık dağılımları birlikte verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, tüm geometrilerde benzer olarak akışkan olarak kullanılan su kanala düşük sıcaklıkta girmektedir. Su kanal boyunca hareket ettikçe alt yüzeyden gerçekleşen ısı transferi nedeniyle sıcaklığı artmakta ve çıkışta maksimum değer ulaşmaktadır. Suyun ısıyı kendi üzerine çekmesi sonucu, metal sıcaklığının kanal girişine yakın bölgelerde daha düşük kanal çıkışına yakın bölgelerde ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca serpantin sayısındaki artışın metal sıcaklığı üzerinde azaltıcı bir etkisi olduğu görülmektedir. Dokuz serpantin kullanılması durumunda en düşük metal sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır. Serpantin sayısındaki kademeli artış neticesinde katı sıcaklık değerlerinde düşüş, akışkan sıcaklık değerlerinde ise yükseliş gözlemlenmiştir.



Şekil 8: Farklı model geometrileri için sıcaklık dağılımı a) 3 kanallı, b) 5 kanallı, c)7 kanallı, d) 9 kanallı

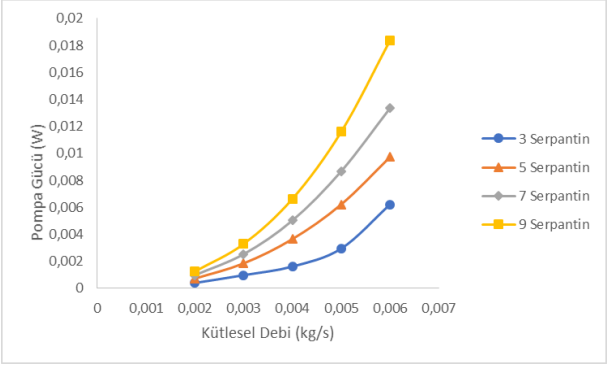
Farklı serpantin kanal sayılarına sahip modeller için basınç farkının kütlesel debi ile değişimi Şekil 9'da verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere tüm kanal sayıları için benzer olarak kütlesel debinin artışı ile basınç farkı da arış göstermektedir. Sabit kütlesel debi için şekil incelendiğinde ise, serpantin kanal sayısındaki artışın basınç farkını artırdığı görülmektedir. Bu durum tüm kütlesel debiler için benzerlik göstermektedir.



Şekil 9: Farklı serpantin kanal sayıları için basınç farkının kütlesel debi ile değişimi

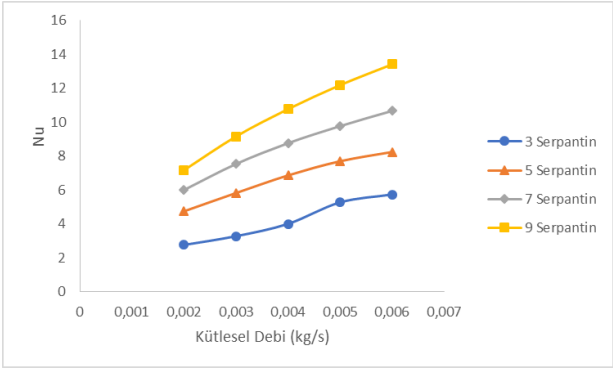
Şekil 10'da ise farklı serpantin kanal sayılarına sahip modeller için pompa gücünün kütlesel debi ile değişimi görülmektedir. Tüm model

geometriler için kütlesel debideki artışın gerekli olan pompa gücünün artmasına neden olduğu görülmektedir. Serpantin kanal sayısının artması da pompalama gücünün artmasına sebep olmaktadır. Şekil 10 ve Şekil 11 birlikte ele alındığında artan serpantin sayısıyla beraber basınç farkının arttığı, bu durumun ise gerekli olan pompalama gücünün artmasına neden olduğu söylenebilir.



Şekil 10: Farklı serpantin kanal sayıları için pompa gücünün kütlesel debi ile değişimi

Farklı serpantin kanal sayısına sahip modeller için kütlesel debinin değişimine göre Nusselt sayısının değişim Şekil 11'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde akışın kütlesel debisinin artışı ile Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Bu durum tüm geometriler için benzerdir. Nusselt sayısında ki bu artışın sebebinin, kütlesel debinin artmasıyla zorlanmış konveksiyonla gerçekleşen ısı transferinin daha baskın hale gelmesi olduğu söylenebilir. Sabit kütlesel debi için, Nusselt sayısının kanal sayısına göre değişimi incelendiğinde, kanal sayısında ki artışın ısı transferini olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Bu durum tüm debiler için benzerlik göstermektedir. Serpantin kanal sayısının artması ile Nusselt sayısı da artmaktadır. En yüksek Nusselt sayısı dokuz kanala sahip geometri için gözlemlenmiştir.



Şekil 11: Farklı serpantin kanal sayıları Nusselt sayısının kütlesel debi ile değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektronik elemanların soğutulması için kullanılan serpantin tip minikanallarda kanal sayısının değişiminin akış karakteristikleri ve ısıl performans üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda serpantin kanal sayısı üç, beş, yedi ve dokuz olacak şekilde dört varklı model geometri oluşturulmuş ve bu modeller için 5 farklı kütlesel debide analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda artan akış debisi ile basınç farkının, pompalama gücünün ve Nusselt sayısının artış gösterdiği belirlenmiştir. Serpantin kanal sayısında ki artışta ısı transferini olumlu yönde etkileyerek Nusselt sayısının artmasına sbep olmuştur. Çalışılan parametre aralığında en yüksek ısı transferinin serpantin kanal sayısı dokuz olan geometri de kütlesel debinin 0.006 kg/s olduğu durum için gerçekleştiği görülmüştür.

KAYNAKÇA

[1] Ho C.J., Peng J.-K., Yang T.-F., Rashidi S., Yan W.M.(2023). Assessment of Cooling Performance of Mini/Micro-Channel Stacked Double Layer Heat Sink. Alexandria Engineering Journal, 80, 465–474.

[2] Ho C.J., Peng J.-K., Yang T.-F., Rashidi S., Yan W.M.(2023). Comparison of Cooling Performance of Nanofluid Flows in Mini/ Micro-Channel Stacked Double-Layer Heat Sink and Single-Layer Micro-Channel Heat Sink. International Journal of Thermal Sciences, 191, 108375.

[3] Zhang J., Zhang J., Du Y., Cui G., Lu W., Yang G. (2024). Flow and Heat Transfer Behaviour of Nucleating Agent-Enhanced Nanofluids through Manifold Mini-Channels. Applied Thermal Engineering, 236, 121587.

[4] Hussein H. A. (2023). Numerical Hydrothermal Evaluation of Heat Transfer in a Multi-Mini-Channel Heat Sink: Effect of Square Pin Fins. Results in Engineering, 20, 101403.

[5] Ghorbani M., Rahimi M., Pahamli Y. (2023). Enhancement of Concentrator Photovoltaic System through Convergent-Divergent Microchannels. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications,

[6] Al-Hasani H. M,, Freegah B. (2022). Influence of Fluid Inlet–Outlet on Hydrothermal Evaluation for Different Serpentine Mini-Channel Heat Sink Configurations. Heat Transfer, 51-8, 7635-7654.

[7] Incropera, P.F., Dewitt, P. D., Bergman, L. T., Lavine, S. A. Fundementals of Heat and Mass Transfer, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007.

[8] Foong A. J. L., Ramesh N., & Chandratilleke T. T. (2009). Laminar Convective Heat Transfer in a Microchannel with Internal Longitudinal Fins. International Journal of Thermal Sciences, 48-10, 1908–1913.

Eklemeli İmalata Yönelik Tasarlanan Kalça İmplantlarında İç Yapı Geometrisinin Mekanik Davranışa Etkisi*

Yunus Emre DELİKANLI[1]

Mehmet Cengiz KAYACAN[2]

1- Dr. Öğr. Üyesi; Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü. emredelikanli@isparta.edu.tr
ORCID No: 0000-0002-5647-1755

2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. cengizkayacan@sdu.edu.tr
ORCID No: 0000-0003-0993-243X

* Bu kitap bölümü "*Özel geometriyle pürüzlendirilmiş ve hafifletilmiş kalça implantının tasarımı ve lazer sinterleme yöntemi ile imalatı*" başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri, sunduğu yüksek tasarım serbestliği sayesinde ortopedik implant tasarımında geleneksel yaklaşımların ötesine geçilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle karmaşık iç yapı ve yüzey geometrilerinin tasarlanabilmesi, implantların mekanik davranışının kontrollü biçimde yönlendirilmesini mümkün kılmakta; ancak bu durum, mekanik performansın öngörülebilirliğini de kritik bir tasarım problemi haline getirmektedir. Bu bağlamda, eklemeli imalata yönelik tasarlanan implantlarda mekanik davranışın güvenilir biçimde değerlendirilmesi, sonlu elemanlar analizi (SEA) temelli sayısal modelleme yaklaşımlarının doğru kurgulanmasına bağlıdır.

Çalışmada, seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemiyle üretilebilirliği gözetilerek tasarlanan kalça implantlarında; implant geometrisi, iç yapı ve yüzey tasarım kararları ile mekanik davranış arasındaki ilişki sistematik olarak incelenmiştir. Referans olarak Zwey Müller tipi bir kalça implantı geometrisi seçilmiş; bu geometri üzerinde tam dolu yapı ile birlikte KRZ kafes iç yapıya sahip küçük gözenekli (0.3 mm) ve büyük gözenekli (0.6 mm) yüzey geometrileri modellenmiştir. Tüm implantlar için ISO 7206-4 standardına uygun yükleme koşulları altında sonlu elemanlar modelleri oluşturularak eşdeğer gerilme ve elastik bölge deplasman değerleri değerlendirilmiştir.

Sayısal analiz sonuçlarına göre, –2300 N bası yüklemesi altında tam dolu implantta yaklaşık 211 MPa maksimum eşdeğer gerilme oluşurken, küçük ve büyük gözenekli implantlarda bu değer sırasıyla yaklaşık 233 MPa ve 235 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Elastik deplasman değerleri ise tam dolu implantta yaklaşık 0.224 mm olarak hesaplanmış; küçük gözenekli implantta 0.242 mm, büyük gözenekli implantta ise 0.253 mm seviyelerine yükselmiştir. Elde edilen bulgular, gözenek çapının artmasıyla birlikte etkin kesit alanının azaldığını ve buna bağlı olarak implant rijitliğinin düştüğünü açıkça göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre, Eİ odaklı kalça implantı tasarımında optimal yaklaşımın; maksimum geometrik serbestlikten ziyade, mekanik davranışı öngörülebilir ve güvenilir yapılar elde etmeye odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Tasarım kararları ile sonlu elemanlar modelleme varsayımlarının birlikte ele alınması, yalnızca kalça implantları için değil, eklemeli imalatla üretilen diğer ortopedik implant türleri için de genellenebilir bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi – SLS – kalça implantı – eklemeli imalat- mekanik davranış

GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri, son yıllarda mühendislik uygulamalarında sağladığı tasarım serbestliği ve üretim esnekliği sayesinde özellikle yüksek katma değerli alanlarda ve karmaşık şekilli parçaların imalatında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor veya imkansız olan karmaşık geometrilerin, katmanlı üretim prensibiyle doğrudan nihai parça olarak elde edilebilmesi; eklemeli imalatı savunma, havacılık, uzay ve tıp alanları için stratejik bir üretim yöntemi haline getirmiştir (Gao vd., 2015). Bu dönüşümün en belirgin yansımalarından biri, ortopedik implant tasarım süreçlerinde gözlenmektedir.

Ortopedik implantlar, insan vücudu içerisinde uzun süreli ve değişken yükler altında çalışan, yüksek güvenilirlik ve öngörülebilir mekanik davranış gerektiren mühendislik ürünleridir (Wang, 2011). Bu tür uygulamalarda mekanik performans; yalnızca kullanılan malzemenin özelliklerine değil, implant geometrisine, iç yapı düzenine ve bu geometrilerin sayısal olarak nasıl modellenip analiz edildiğine doğrudan bağlıdır. Eklemeli imalat teknolojileri, özellikle metal implantlarda gözenekli iç yapılar, yüzey pürüzlendirme stratejileri ve ağırlık azaltmaya yönelik karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanıyarak, implant tasarımında geleneksel yaklaşımların ötesine geçilmesini sağlamıştır (Parthasarathy, 2014). Ancak artan geometrik karmaşıklık, mekanik davranışın güvenilir biçimde öngörülmesini daha kritik hale getirmiştir.

Metal eklemeli imalat yöntemleri arasında yer alan seçici lazer sinterleme (SLS), özellikle karmaşık iç yapı ve yüzey geometrilerinin modellenmesine olanak tanıması nedeniyle, ortopedik implant tasarım çalışmalarında yaygın olarak referans alınan bir üretim yaklaşımıdır. Bununla birlikte, SLS sürecinde kullanılan lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve kontur stratejileri gibi imalat parametreleri; üretilen parçanın mikroyapısını, etkin kesit alanını ve dolayısıyla mekanik davranışını doğrudan etkilemektedir (Kayacan vd., 2016). Aynı malzeme ve aynı geometriye sahip implantların, farklı iç yapı tasarımları ve üretim karakteristikleri nedeniyle farklı mekanik tepkiler vermesi, bu sürecin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Çalışmada, SLS yöntemiyle üretilebilirliği gözetilerek tasarlanan kalça implantları özelinde; implant geometrisi, iç yapı ve yüzey tasarım kararları ile mekanik davranış arasındaki ilişki, sonlu elemanlar analizleri sonuçlarıyla değerlendirilmiştir. İmplant tasarımında yalnızca geometrik optimizasyonun değil, sonlu elemanlar modelleme varsayımlarının ve sınır şartlarının da tasarımın ayrılmaz bir parçası olarak ele alınması gerektiği yaklaşımı ile, Eİ tabanlı implant tasarımına yönelik gelecekteki çalışmalara metodolojik bir çerçeve sunulmuş ve farklı implant türlerine genellenebilir sonuçlar üretmesi hedeflenmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisinin tasarım serbestliği

Eİ teknolojileri, malzemenin katmanlar halinde üst üste yığılarak şekillendirilmesi prensibine göre çalışan ve bu sayede geleneksel imalat yöntemlerinin geometrik kısıtlarını büyük ölçüde ortadan kaldıran üretim teknikleridir. Özellikle metal Eİ yöntemleri, yüksek mekanik dayanım gerektiren mühendislik uygulamalarında fonksiyonel parçaların üretimini mümkün kılmıştır. Bu durum, ortopedik implantlar gibi yüksek güvenilirlik ve uzun servis ömrü gerektiren bileşenlerin tasarımında eklemeli imalatı önemli bir tasarım aracı haline getirmiştir.

Ortopedik implant uygulamalarında kullanılan metal Eİ yöntemleri arasında seçici lazer sinterleme (SLS), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ve elektron ışınlı ergitme (EBM) gibi süreçler yer almaktadır. Bu yöntemlerin tümü toz yataklı üretim prensibine dayanmakla birlikte; enerji kaynağı, işlem atmosferi ve katman oluşturma mekanizmaları bakımından birbirlerinden ayrılmaktadır (Yusuf, 2017). Enerji kaynağı olarak lazerin kullanıldığı SLS yöntemi, metal tozların kontrollü biçimde sinterlenmesini esas almakta; bu sayede yüksek boyutsal doğruluk, karmaşık iç geometri üretimi ve tekrarlanabilir mekanik özellikler sunmaktadır.

İmplant geometrisinin tasarımında, iç bölge ve yüzey özellikleri; yalnızca biyolojik uyumluluk veya ağırlık azaltma hedefleri doğrultusunda değil, aynı zamanda SLS sürecinin getirdiği imalat karakteristikleri dikkate alınarak belirlenmelidir. Aksi halde, sayısal modellerde öngörülen mekanik performans ile gerçek üretim sonrası davranış arasında anlamlı sapmalar ortaya çıkabilmektedir.

Çalışma kapsamındaki kalça implantları, eklemeli imalatın sağladığı geometrik tasarım serbestliği ile SLS yönteminin imalat sınırlarını birlikte gözeten bir yaklaşımla modellenmiştir. Referans implant geometrisinin belirlenmesi, iç yapı ve yüzey tasarımlarının oluşturulması ve bu tasarımların mekanik davranış üzerindeki etkilerinin incelenmesi, tasarım – mekanik performans ilişkisinin somut olarak ortaya konulabilmesi açısından kritik rol oynamaktadır.

Kalça implantı tasarım stratejisi ve referans implantın belirlenmesi

İmplantların mekanik davranışlarının karşılaştırılabilmesi amacıyla öncelikle bir referans implant geometrisinin tanımlanması gerekmektedir. Bu referans geometri, hem klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan implant tiplerini temsil etmeli hem de eklemeli imalatın sunduğu tasarım olanaklarının sistematik biçimde incelenmesine imkan sağlamalıdır. Bu nedenle çalışmada, uzman görüşlerine göre klinik kullanımda kendini kanıtlamış bir kalça implantı tipi referans olarak seçilmiştir (Delikanlı, 2019).

Referans implant geometrisinin belirlenmesinde temel kriterlerden biri, implantın femur kanalı içerisinde stabil bir şekilde konumlanabilmesi ve kemik–implant arayüzünde bağıl hareketlerin sınırlandırılmasıdır. Bu amaç

doğrultusunda, gövde kesiti dörtgen formda olan ve kemik içerisinde dönmeye karşı yüksek direnç gösteren Zwey Muller tipi kalça implantı geometrisi tercih edilmiştir (Şekil 1.). Bu tip implantlar, özellikle proksimal femur bölgesinde sağladıkları mekanik kilitlenme etkisi sayesinde, implant–kemik arayüzünde oluşabilecek mikro yer değiştirmeleri azaltmakta ve uzun dönem stabilite açısından avantaj sunmaktadır.



Şekil 1. Referans implant (sol) ve 3B modeli (sağ)

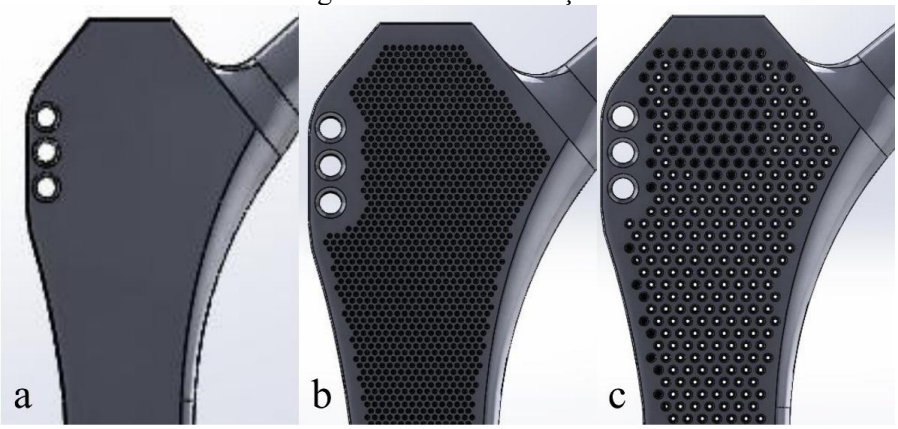
Seçilen referans geometri, iç yapı ve yüzey tasarım stratejileri için sabit bir temel oluşturacak şekilde tanımlanmıştır. Böylece çalışma sonucu elde edilecek mekanik davranış farklılıklarının doğrudan iç yapı tasarımı ve imalat sürecine atfedilebilmesine olanak sağlanmıştır. Referans implantın boyutları belirlenirken, hem ISO 7206 standartlarında tanımlanan yorulma test koşulları hem de klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan femoral stem ölçüleri dikkate alınmıştır (ISO, 2010). İmplantın toplam boyu, proksimal ve distal kesit geçişleri ile boyun bölgesinin geometrisi; yük aktarımının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi amacıyla literatürde raporlanan tipik kalça implantı ölçüleriyle uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır.

Kalça implantı tasarım stratejisi ve referans implantın belirlenmesi

Eİ teknolojilerinin ortopedik implant tasarımına sağladığı en önemli katkılardan biri, parçanın yalnızca dış geometrisinin değil, iç yapısının da fonksiyonel ve beklenen mekanik performansı sergileyecek şekilde tasarlanabilmesine olanak tanımasıdır. Geleneksel imalat yöntemleriyle büyük ölçüde homojen ve tam dolu olarak üretilen kalça implantları, Eİ sayesinde farklı iç yapılara ve yüzey geometrilerine sahip olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Bu durum, implantın mekanik davranışının kontrollü

biçimde yönlendirilmesini mümkün kılarken, imalat sürecine özgü yeni tasarım yaklaşımlarını da beraberinde getirmektedir.

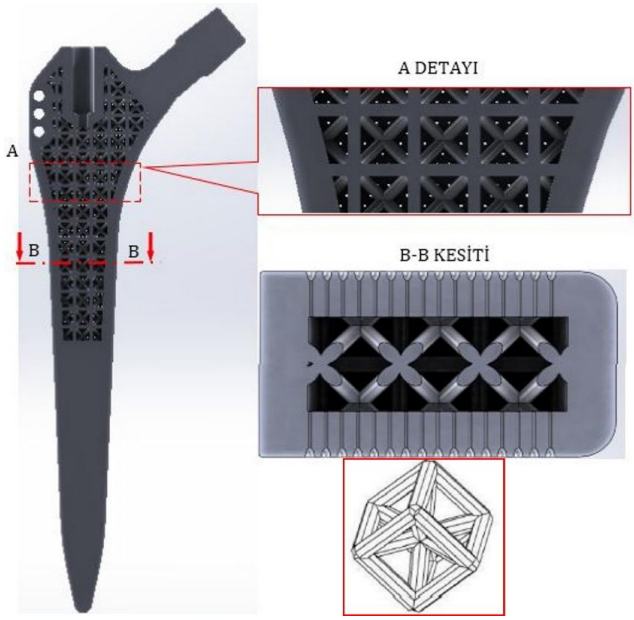
Çalışmada, tasarım–imalat–mekanik davranış ilişkisini sistematik biçimde inceleyebilmek amacıyla, referans implant geometrisi üzerinde üç farklı yapı tipi tanımlanmıştır. Bunlar; tam dolu (katı) yapı ile birlikte, KRZ iç kafes geometrisine dayalı 0.3 mm çapında küçük gözenekli (KG) ve 0.6 mm çapında büyük gözenekli (BG) yapılar olarak modellenmiştir (Şekil 2). Tüm modellerde implantın dış makro geometrisi sabit tutulmuş; iç yapı geometrisi KRZ kafes yapısı temel alınarak tanımlanmış ve yüzey geometrisi küçük ve büyük gözenekli olacak şekilde değiştirilmiştir. Böylece elde edilen mekanik davranış farklılıklarının, doğrudan tasarıma ve buna bağlı imalat karakteristiklerine bağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 2: Referans geometrisi yüzeyinde oluşturulan yüzey geometrileri (Tam dolu (a), KG (b) ve BG (c)

Tam dolu implant tasarımı, çalışmada karşılaştırma amacıyla kullanılan temel yapı tipini oluşturmaktadır. Bu yapı, Eİ sürecinin geometrik serbestliğinden yararlanılmadan, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmiş implantlara mekanik açıdan en yakın davranışı temsil etmektedir. Tam dolu yapı, rijitlik ve yük taşıma kapasitesi açısından referans kabul edilerek, gözenekli yapıların mekanik performansının değerlendirilmesinde bir başlangıç noktası olarak kullanılmıştır.

Gözenekli iç yapı tasarımlarında ise, KRZ kafes geometrisi, hem imal edilebilirlik hem de mekanik süreklilik açısından tercih edilmiştir. KRZ yapı, düzenli hücre topolojisi sayesinde yük aktarımının belirli yönlerde sürekliliğini koruyan, ancak aynı zamanda etkin kesit alanının kontrollü biçimde azaltılmasına olanak tanıyan bir kafes yapı karakteri sunmaktadır (Şekil 3). Bu yapı tipi, özellikle SLS sürecinde, karmaşık ancak tekrarlanabilir iç geometrilerin üretilebilmesi açısından avantaj sağlamaktadır (Shuzun, 2018; Koch, 2018).



Şekil 3: KRZ iç yapıya sahip implant kesiti

Yüzey geometrisi tasarımı da iç yapı düzeniyle doğrudan ilişkili olacak şekilde ele alınmıştır. Yüzeyde modellenen gözenekler, kemik–implant arayüzünde temas alanını artırmakla birlikte, yüzey yakınındaki kesit geometrisinin daha karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır. SLS sürecinde, özellikle KRZ yapıya ait ince bağlantı elemanları ve dar geçiş bölgeleri, lazerin ısı etkisi ve toz yatak davranışı nedeniyle hedeflenen geometriden sapmalara daha duyarlı hale gelmektedir. Bu durum, iç yapı tasarımının mekanik davranış üzerindeki etkisinin yalnızca tasarım sürecinde değil, aynı zamanda üretim sürecine (imalat parametrelerine) bağlı olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Tasarım – mekanik davranış ilişkisi

Eİ ile üretilen implantlarda iç yapı tasarımı, implantın mekanik davranışını belirleyen temel unsurlardan biridir. Özellikle gözenekli yapıların kullanıldığı tasarımlarda, yük taşıma kapasitesi ve rijitlik gibi mekanik özellikler yalnızca malzemenin elastisite modülüne değil, aynı zamanda etkin kesit alanına doğrudan bağlıdır. Gözenek geometrisi, bu etkin kesit alanını belirleyen en kritik tasarım parametrelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Gözenekli implantlarda, gözenek çapının ve dağılımının artmasıyla birlikte, implantın taşıyıcı kesit alanı azalmakta ve yükler daha sınırlı bir malzeme hacmi üzerinden aktarılmaktadır. Bu durum, özellikle eğilme ve basma yükleri altında, yerel gerilme gradyanlarının ve elastik deformasyonların artmasına neden olmaktadır. Eklemeli imalatın sunduğu tasarım serbestliği sayesinde gözenek çapı ve geometrisi geniş bir aralıkta

değiştirilebilse de, bu serbestliğin mekanik davranış üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirilmediği takdirde, istenmeyen rijitlik kayıpları ya da servis ömrü sırasında parçada hasar meydana gelebilir.

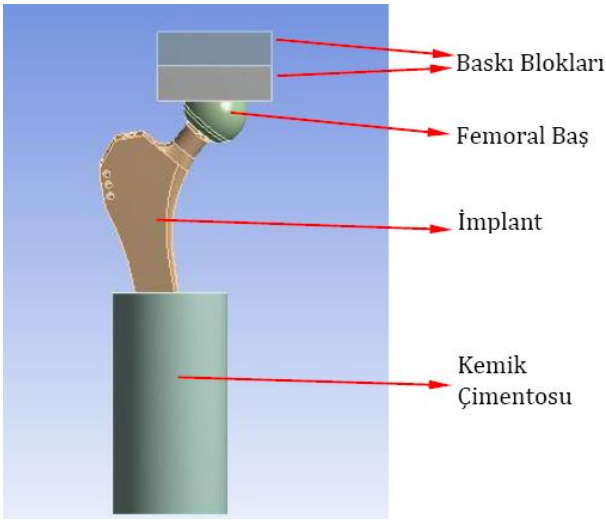
KG implantlar, taşıyıcı malzeme sürekliliğini büyük ölçüde koruyarak daha yüksek bir etkin kesit alanına sahiptir. Buna karşılık, BG implantlarda, gözeneklerin kapladığı hacmin artmasıyla birlikte etkin kesit alanı belirgin şekilde azalmaktadır. Bu durum, implantın rijitlik davranışında ölçülebilir farklılıklara yol açmaktadır. Etkin kesit alanındaki bu değişim, yalnızca global deformasyon seviyelerini değil, aynı zamanda implantın farklı bölgelerinde oluşan yerel mekanik tepkileri de etkilemektedir. Gözenekli yapıların iç bölgesinde, yük aktarımı daha karmaşık bir yol izlemekte; yükler, KRZ yapıdaki ince kesitlerden geçerek taşınmaktadır. Bu durum, iç yapının geometrik süreksizlikler içermesi nedeniyle, gerilme ve deformasyon dağılımlarının homojen olmaktan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, gözenek geometrisi yalnızca ağırlık azaltma amacıyla değil, yük aktarım mekanizmasını belirleyen bir tasarım unsuru olarak ele alınmalıdır.

Sonlu Elemanlar Analizi

Yüzey gözenek ve iç yapı geometrisinin implantın yük taşıma kapasitesi ve oluşacak deformasyon miktarına etkisini gözlemlemek amacıyla, modellenen implantlar için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur (Şekil 4). Oluşturulan modelde ISO 7206-4:2010 standardında belirtilen yükleme koşulları kurgulanarak KG, BG ve tam dolu implantlarda meydana gelen eşdeğer gerilmeler ve deplasman değerleri değerlendirilmiştir. Düşük elastisite modülü ve yüksek biyouyumluluğu sebebiyle ortopedik implantlarda sıkça kullanılan Ti6Al4V alaşımı (Liu vd., 2004; Eldesouky vd., 2014; Barui vd., 2017; Croitoru vd., 2017) implant malzemesi olarak seçilmiştir.

Sonlu eleman modellerinin çözümlemelerinde, Ansys® Workbench 16.2 yazılımı kullanılmıştır. SEA modeli; yüklemeyi implant gövdesine ileten iki baskı bloğunu, femur başı komponentini ve femur başı merkezinden 80 mm uzaklıkta, 10° addüksiyon ve 9° fleksiyon açısı ile çimentoya gömülü implant gövdesini içerecek şekilde oluşturulmuştur.

SEA analizinde baskı bloklarının deformasyonu ihmal edilecek şekilde elastisite modülleri yüksek tanımlanmış (rijit cisim davranışı sergiledikleri kabul edilerek), böylece yüklemenin tamamının implant baş komponentinden implant gövdesine aktarılması hedeflenmiştir. Ayrıca implant gövdesinin içine gömülü olduğu kemik çimentosu geometrisi alt yüzeyinden sabitlenmiş, böylece yükleme sırasında implantın, elastisite modülü çok daha düşük olan kemik çimentosu içerisindeki deplasman miktarının gözlenebilmesi hedeflenmiştir. SEA modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modelindeki yapısal bileşenler

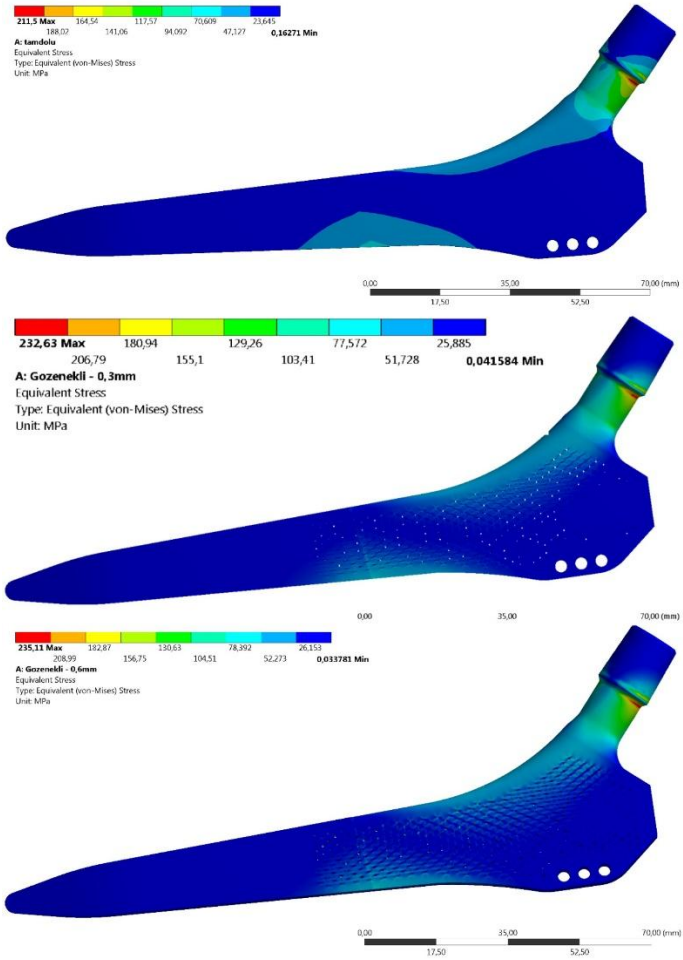
Tablo 1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (GPa)
Çelik (Baskı Blokları)	0.3	210
Ti6Al4V (implant)	0.342	110
Cr-Co (femoral baş)	0.33	200
Kemik Çimentosu	0.3	3.8

SEA modelindeki tüm parçalarda 10 düğümlü tetrahedral elemanlar (SOLID187) ve 20 düğümlü tetrahedral elemanlar (SOLID186) kullanılarak mesh oluşturulmuştur. Çözüm hassasiyetini artırmak amacıyla implant boynu ve temas yüzeyleri gibi kritik alanlarda eleman sayısı artırılmıştır. Katı implantı içeren SEA modeli yaklaşık 650.000 eleman ve BG ve KG implantları içeren model ise sırasıyla yaklaşık 3.500.000-12.000.000 eleman içermektedir. 2300 N şiddetinde bası yükü, basma bloklarının üst yüzeyinden uygulanmış, analiz sonucunda implantta meydana gelen eşdeğer gerilme ve deplasman değerleri gözlenmiştir.

Araştırma bulguları

SEA eşdeğer gerilme sonuçları incelendiğinde; –2300 N bası yüklemesi altında, tam dolu implantta yaklaşık 211 MPa maksimum eşdeğer gerilme oluşmuş, KG ve BG implantlarda ise gözenek çapına bağlı olarak 232–235 MPa aralığında eşdeğer gerilmeler meydana gelmiştir. Tüm implant türlerinde maksimum eşdeğer gerilmelerin, yük aktarımının yoğunlaştığı implant boyun bölgesinde oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Eşdeğer gerilme sonuçları

Elastik deplasman değerleri incelendiğinde ise, tam dolu implant için yaklaşık 0.224 mm mertebesinde bir deplasman elde edilirken, KG implantlarda bu değer yaklaşık 0.242 mm, BG implantta ise yaklaşık 0.253 mm seviyelerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, gözenek çapının ve buna bağlı etkin kesit alanının azalmasının, implantın rijitliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Deplasman ve eşdeğer gerilme sonuçları

Gözenek Çapı	Deplasman (mm)	Eşdeğer Gerilme (MPa)
Tam dolu	0.22541	211.5
KG	0.24214	232.63
BG	0.25308	235.11

Yüzey gözenek çapının artmasıyla birlikte, implantın gövdesindeki yük taşıyıcı etkin alan azalmakta; bu durum, özellikle eğilme ve basma yükleri altında daha yüksek deplasmanların oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Buna karşılık, KG implantlar, gözenekli olmalarına rağmen yük taşıma sürekliliğini daha yüksek ölçüde koruyarak, BG implanta kıyasla daha dengeli rijitlik davranışı sergilemektedir.

SONUÇ

Tasarım ve modelleme süreçlerinde gözenekli iç yapı kullanılması, implantların hafifletilmesi ve fonksiyonel özelliklerinin artırılması açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte, etkin kesit alanındaki azalma ve yük aktarım yollarının karmaşıklaşması nedeniyle mekanik davranış üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Özellikle gözenek çapının artmasıyla birlikte, implant rijitliğinde azalma ve elastik deplasman değerlerinde artış gözlenmesi, iç yapı geometrisinin mekanik tasarım açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, gözenekli yapıların yalnızca biyolojik uyum hedefleri doğrultusunda değil, mekanik performans gereklilikleri dikkate alınarak tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, SLS ile üretilmesi planlanan kalça implantlarında optimal tasarımın; maksimum geometrik serbestlikten ziyade, mekanik davranışı öngörülebilir, tekrarlanabilir ve güvenilir imalatlar elde etmeye odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Tasarım, imalat parametreleri ve mekanik performans arasındaki ilişkinin birlikte ele alınması, yalnızca kalça implantları için değil, eklemeli imalatla üretilen diğer ortopedik implant türleri için de genellenebilir bir yaklaşım olarak düşünülebilir.

REFERANSLAR

Barui S, Chatterjee S, Mandal S, vd., (2017). Microstructure and compression properties of 3D powder printed Ti-6Al-4V scaffolds with designed porosity: experimental and computational analysis. Mater Sci Eng, 70: 812-823.

Croitoru ASM, Pacioga BA, Comso CS., (2017). Personalized hip implants manufacturing and testing. Appl Surf Sci, 417: 256-261.

Delikanlı YE., Kayacan MC., (2019). Design, manufacture, and fatigue analysis of lightweight hip implants. J. Appl. Biomater. Funct. Mater. 17 (2), 2280800019836830.

Eldesouky I, Abdelaal O., El-Hofy H., (2014). Femoral hip stem with additively manufactured cellular structures. In: IEEE conference on biomedical engineering and sciences, Miri, Sarawak, Malaysia, 8–10 December 2014.

Gao W., vd. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer - Aided Design, 69, 65-89.

ISO 7206-4:2010: Implants for surgery – partial and total hip prostheses. Part 4. Determination of endurance properties of stemmed femoral components.

Parthasarathy J., (2014). 3D Modeling, Custom Implants and its Future Perspectives in Craniofacial Surgery. Ann. Maxillofac. Surg., 4, 9-18.

Kayacan MC., Delikanlı YE., Duman B., Özsoy K., (2018). Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak sls ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1), 127-143.

Liu X, Chu PK, Ding C., (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys and related materials for biomedical applications. Mater Sci Eng, 47: 49-121.

Koch FW, Koch AK, Amling M, vd. (2018). Histopathological findings at the 3D titanium fiber mesh-bone interface of a porous coated acetabular cup after a lifetime of 27 years. Osteologie, 27: 165-171.

Shujun L, Xiaokang L, Wentao H, vd. (2018). Fabrication of open-cellular (porous) titanium alloy implants: osseointegration, vascularization and preliminary human trials. SciChina Mater, 61: 525-536.

Wang W., Ouyang Y., Poh C.K., (2011). Orthopaedic Implant Technology: Biomaterials fromPast to Future Review Article, Academy of Medicine, 40 (5), 237-244.

Yusuf S.M., Gao N., (2017). Influence of Energy Density on Metallurgy and Properties in Metal Additive Manufacturing. Materials Science and Technology, 1- 21.

Eriyik Yığma Yöntemi (Fused Deposition Modelling) ve Kullanılan Filamentler

Muhammet Osman ÜÇBUNAR[1]

Mustafa Özgür ÖTEYAKA[2]

1- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havaclık Bilimleri ve Teknolojileri. osmanucbunar2606@gmail.com ORCID No: 0009-0008-2712-1319

2- Prof. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Eskişehir Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mekatronik Programı. moteyaka@gmail.com ORCID No: 0000-0002-1488-6098.

ÖZET

Eriyik Yığma Modelleme (FDM), düşük maliyeti, operasyonel kolaylığı ve geniş malzeme yelpazesi nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan eklemeli imalat teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Katmanlı üretim prensibine dayanan bu yöntem, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verileri doğrultusunda termoplastik bir filamentin ısıtılarak yarı sıvı hale getirilmesi ve bir nozül aracılığıyla yapı tablası üzerine katman katman serilmesi esasına dayanmaktadır. FDM yöntemiyle üretilen parçaların fonksiyonel performansı ve mekanik bütünlüğü, başlangıç materyali olarak seçilen filamentin karakteristik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) gibi geleneksel polimerler hızlı prototipleme süreçlerinde halen standart kabul edilse de, endüstriyel uygulamalar doğrultusunda mühendislik tipi malzemelere olan ilgi hızla artmaktadır. Polietilen Tereftalat Glikol (PETG), Polikarbonat (PC) ve Termoplastik Poliüretan (TPU) gibi gelişmiş filamentler; yüksek ısıl kararlılık, kimyasal direnç ve esneklik gibi spesifik avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, karbon fiber veya cam fiber ile güçlendirilmiş kompozit filamentlerin geliştirilmesi, saf polimerlerin düşük sertlik ve anizotropi gibi yapısal kısıtlamalarını aşarak FDM'nin havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren sektörlerdeki kullanım alanını genişletmiştir. Bu çalışma, FDM proses mekanizmasını kapsamlı bir şekilde incelemekte ve yaygın olarak kullanılan filament türlerinin mekanik ve termal özelliklerini sistematik bir yaklaşımla değerlendirmektedir. Malzeme özellikleri ile nihai parçanın yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyeti ve katmanlar arası yapışma direnci arasındaki ilişkinin analiz edilmesiyle, bu çalışma spesifik mühendislik uygulamaları için optimize edilmiş malzeme seçimine rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Eklemeli İmalat, FDM, Termoplastik Filamentler, PLA, ABS, Kompozit Malzemeler, Mekanik Özellikler.

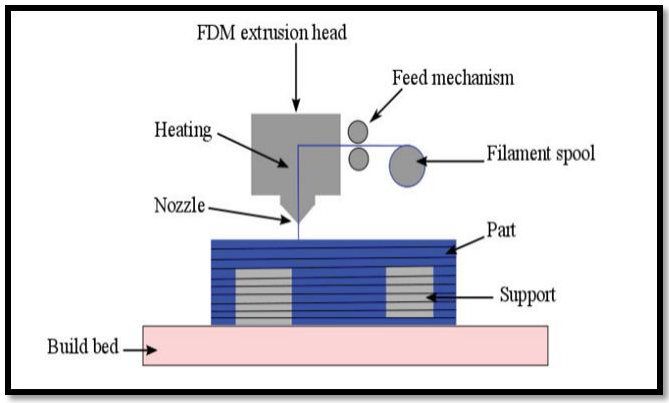
GİRİŞ

Eriyik Yığma Modelleme (FDM) veya literatürdeki diğer adıyla Erimiş Filament Fabrikasyonu (FFF), eklemeli imalat teknolojileri içerisinde "malzeme ekstrüzyonu" kategorisinde yer alan ve günümüzde en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin temel işleyişi; termoplastik bir filamentin, erime sıcaklığına kadar ısıtılan bir nozül (meme) içerisinden geçirilerek yarı akışkan hâle getirilmesi ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine sadık kalarak baskı tablası üzerine katman katman serilmesi esasına dayanır.

FDM süreci, dijital bir CAD modelinin oluşturulmasıyla başlar. Ardından, bu modelin fiziksel katmanlara dönüştürüldüğü dilimleme (slicing) aşamasına geçilir. Bu aşamada tanımlanan; katman kalınlığı, doluluk oranı (infill), tarama açısı (raster angle) ve baskı hızı gibi üretim parametreleri, nihai parçanın kalitesini belirleyen kritik unsurlardır. Söz konusu parametreler, ekstrüzyon sırasındaki malzeme akış debisi, katmanlar arası adhezyon (yapışma) kuvveti ve parçanın boyutsal hassasiyeti üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır (**Şekil 1**).

Baskı işlemi tamamlandıktan sonra, karmaşık geometrileri desteklemek amacıyla kullanılan yapıların uzaklaştırılması işlemi gerçekleştirilir. İhtiyaca bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek veya mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla zımparalama, ısıl işlem veya kimyasal iyileştirme gibi ardıl işlemler (post-processing) uygulanabilmektedir.

Literatürde FDM, herhangi bir kalıp veya özel takım gerektirmemesi sayesinde karmaşık formların düşük maliyet ve yüksek hızla üretilmesine imkan tanıyan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, tasarım aşamasından nihai ürüne geçiş süresini (lead time) dramatik şekilde kısaltmaktadır. Güncel çalışmalar, FDM'nin artık sadece hızlı prototipleme ile sınırlı kalmadığını; düşük ekipman maliyeti, açık kaynaklı yazılım esnekliği ve geniş malzeme yelpazesi sayesinde fonksiyonel ve yük taşıyıcı parçaların üretiminde de stratejik bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Fico vd., 2022).



Şekil 1. FDM Yazıcı Çalışma Prensibi (Ala'aldin Alafaghani vd,2017)

Eriyik Yığma Modelleme (FDM), malzeme ekstrüzyonu prensibine dayanan, termoplastik bir filamentin kontrollü bir termo-mekanik çevrimle şekillendirildiği bir eklemeli imalat teknolojisidir. Süreç, filamentin bir tahrik mekanizması aracılığıyla makaradan çekilerek ekstrüder sistemine iletilmesiyle başlar. Burada malzeme, ekstrüderin soğuk bölge (cold end) ve sıcak bölge (hot end) olarak tanımlanan termal bölgelerinden geçer. Sıcak bölgede, malzemenin camsı geçiş veya ergime sıcaklığının üzerine çıkılmasıyla akışkan bir rejim elde edilir.

Yarı eriyik faza geçen polimer, dilimleme yazılımı tarafından üretilen ve sayısal kontrol (NC) kodlarına dönüştürülen takım yollarını takip ederek nozül aracılığıyla yapı tablasına aktarılır. Yazıcı kafasının X–Y düzlemindeki hassas hareketi ile her bir katmanın geometrisi oluşturulur. Bir katmanın inşası tamamlandığında, yapı platformunun Z ekseni doğrultusunda önceden tanımlanan katman yüksekliği kadar aşağı inmesiyle (veya kafanın yukarı çıkmasıyla) yeni katman için zemin hazırlanır. Bu ardışık biriktirme, soğuma ve yeniden katmanlama döngüsü, dijital modelin fiziksel bir yapıya dönüşmesini sağlar.

Literatürde; katman kalınlığı, baskı hızı, nozül/tabla sıcaklıkları ve doluluk oranı gibi operasyonel parametrelerin; katmanlar arası adhezyon kalitesi, boyutsal hassasiyet ve yüzey morfolojisi üzerinde belirleyici olduğu kabul edilmektedir. Özellikle Polilaktik Asit (PLA) ve benzeri mühendislik termoplastiklerinde, katmanlar arası füzyon mekanizması ve soğuma profiline bağlı olarak gelişen kalıntı gerilmeler, nihai parçanın anizotropik doğasını ve mekanik performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır (Daminabo vd., 2020).

Eriyik Yığma Modelleme (FDM) veya teknik literatürdeki karşılığıyla malzeme ekstrüzyonu tabanlı eklemeli imalat, termoplastik polimerlerin kontrollü bir termal çevrimle ergitilerek bir nozül aracılığıyla katmanlı biçimde biriktirilmesi prensibine dayanan, günümüzün en yaygın üretim

metotlarından biridir. FDM teknolojisi; donanım bileşenlerinin standartlaşması, dilimleme yazılımlarının (slicing software) hesaplama kabiliyetlerinin artması ve filament formundaki malzeme çeşitliliğinin genişlemesiyle birlikte olgun bir endüstriyel süreç aşamasına ulaşmıştır. Bununla birlikte, süreç parametreleri ile nihai parçanın fonksiyonel performansı arasındaki ilişkinin çok değişkenli yapısı, yöntemi halen güncel ve aktif bir araştırma alanı kılmaktadır.

FDM iş akışı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında geliştirilen üç boyutlu modellerin dilimleme yazılımları vasıtasıyla katmanlara ayrılmasıyla başlar. Üretim öncesinde tanımlanan; katman kalınlığı, doluluk oranı (infill), tarama açısı (raster angle), baskı hızı ile nozül ve tabla sıcaklıkları gibi temel parametreler, ekstrüzyon sırasındaki reolojik davranışı, katmanlar arası adhezyon (yapışma) kalitesini ve parçanın yapısal bütünlüğünü doğrudan belirlemektedir. Herhangi bir kalıp veya özel takım gerektirmemesi, karmaşık geometrilerin düşük maliyetle imaline olanak tanıması ve tasarımdan nihai ürüne geçiş süresini (lead time) minimize etmesi; FDM'yi hızlı prototipleme evresinden fonksiyonel uç ürün üretimi aşamasına taşımıştır. Sunduğu avantajlara karşın, FDM yönteminin doğasından kaynaklanan bazı yapısal kısıtlar mevcuttur. Özellikle katmanlar arası füzyonun (ergime birleşmesi) sınırlı kalması, parçalarda belirgin bir mekanik anizotropi (yön bağımlı dayanım) ve görece yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşmasına neden olmaktadır. Literatürde; PLA, ABS ve PETG gibi farklı termoplastik sistemlerin FDM sürecindeki termomekanik tepkilerinin değişkenlik gösterdiği, bu bağlamda her malzeme türü için süreç parametrelerinin spesifik olarak optimize edilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Güncel araştırmalar, bu kısıtların aşılabilmesi adına süreçlerin modellenmesi, yapay zeka tabanlı optimizasyon teknikleri ve gelişmiş kompozit malzeme sistemlerinin entegrasyonuna odaklanarak FDM'nin endüstriyel uygulama spektrumunu genişletmektedir (Zhou vd., 2024).

FDM Modellemede Kullanılan Filamentler

FDM/FFF tabanlı eklemeli imalat süreçlerinde hammadde konfigürasyonu, üretim safhasındaki reolojik kararlılıktan nihai bileşenin termo-mekanik performans spektrumuna kadar geniş bir değişken grubunu doğrudan kontrol etmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan polimerik filamentler (PLA, ABS, PETG ve Poliamid/Nylon), özgün ısıl ve mekanik karakteristikleri doğrultusunda farklı mühendislik gereksinimlerine yanıt vermektedir.

PLA (Polilaktik Asit), düşük termal büzülme katsayısı ve işleme kolaylığı sayesinde boyutsal hassasiyetin ön planda olduğu prototipleme ve görselleştirme uygulamalarında baskınlığını korumaktadır. Buna karşılık ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), yüksek darbe tokluğu ve servis sıcaklığı

gerektiren fonksiyonel mühendislik parçalarında stratejik bir avantaj sunmaktadır. PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) ise, PLA'nın sunduğu proses pratikliği ile ABS'in mekanik mukavemet beklentisi arasında bir "optimum denge" aranan hibrit senaryolarda tercih edilmektedir. Daha zorlu çalışma koşulları ve dinamik yüklemeler söz konusu olduğunda ise, yüksek mukavemet-süneklik dengesiyle öne çıkan Nylon (Poliamid) filamentler fonksiyonel nihai ürün üretimi için kritik bir rol oynamaktadır.

FDM teknolojisinde "evrensel bir en iyi malzeme" tanımı yerine; hedeflenen çevresel koşullar, mekanik yükleme tipleri ve istenen yüzey kalitesi parametreleri doğrultusunda malzeme–proses parametresi kombinasyonunun eş zamanlı olarak optimize edilmesi gerekliliği literatürde güçlü bir şekilde vurgulanmaktadır (Enriconi vd., 2025).

Polilaktik Asit (PLA)

PLA mısır nişastası ve şeker kamışı gibi yenilenebilir biyokütle kaynaklarından fermente edilen laktik asidin polimerizasyonu ile elde edilen, alifatik polyester grubuna ait biyobozunur bir termoplastiktir. Sürdürülebilir ve ekolojik karakteri sayesinde geniş bir endüstriyel spektrumda kendine yer bulan PLA; düşük yoğunluğu, yüksek rijitliği ve mükemmel işlenebilirliği ile biyomedikal cihazlardan gıda ambalajlarına, hızlı prototiplemeden karmaşık görselleştirme modellerine kadar pek çok alanda temel materyal olarak kabul edilmektedir.Termomekanik Davranış ve Yapısal SınırlandırmalarPLA'nın doğası gereği sahip olduğu yarı kristalin (semi-crystalline) morfoloji, uygulanan üretim yöntemine ve termal geçmişine bağlı olarak malzemenin mekanik ve termal karakteristiklerinde belirgin varyasyonlara yol açmaktadır. Literatürde, PLA'nın mekanik performansının (elastisite modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması); kristalinlik derecesi, moleküler ağırlık dağılımı ve son kullanım senaryolarındaki servis koşullarına karşı oldukça hassas olduğu bildirilmektedir.Özellikle termal hassasiyet, PLA bazlı bileşenlerin yapısal performansını sınırlayan en kritik faktördür. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığının (Tg) yaklaşık 55–65 °C bandında olması, bu eşik aşıldığında malzemenin rijitliğini dramatik şekilde kaybederek camsı formdan kauçuğumsu forma geçmesine neden olmaktadır. Bu termal kısıt, yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren mühendislik uygulamalarında PLA'nın kullanım potansiyelini daraltan temel bir parametredir (Farah vd., 2016). Biyomedikal Uygunluk ve Fonksiyonel OptimizasyonYapısal kısıtlamalarına rağmen; mükemmel biyouyumluluğu, düşük toksisitesi ve kontrol edilebilir mekanik doğası, PLA'yı özellikle biyomedikal mühendisliği uygulamalarında (cerrahi dikişler, stentler, doku iskeleleri) vazgeçilmez kılmaktadır. Bilimsel çalışmalarda, hedeflenen fonksiyonel performansın elde edilebilmesi için üretim parametrelerinin malzeme morfolojisi üzerindeki etkisinin doğru modellenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. PLA'nın endüstriyel başarısı; özgün malzeme

özelliklerinin, üretim tekniği ve çevresel faktörler ile entegre bir biçimde optimize edilmesine dayanmaktadır.

Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS)

ABS filamentler; amorf yapıları, yüksek darbe toklukları ve üstün termal stabilite karakteristikleri ile FDM (Eriyik Yığma Modelleme) ekosisteminde fonksiyonel mühendislik uygulamaları için en çok tercih edilen termoplastikler arasında yer almaktadır. Literatürde ABS'nin, Polilaktik Asit (PLA) ile kıyaslandığında daha yüksek bir camsı geçiş sıcaklığına (Tg~105°C) ve ısıl deformasyon direncine sahip olduğu; bu özellikleri sayesinde otomotiv iç trim bileşenleri, elektronik muhafazalar ve zorlu servis koşullarına maruz kalan yapısal parçalar için optimize edilmiş bir çözüm sunduğu vurgulanmaktadır.

ABS'nin mekanik avantajlarına karşın, yüksek termal genleşme katsayısı ve soğuma evresinde polimer zincirlerinde biriken iç gerilmeler, üretim sürecinde bazı teknik zorlukları beraberinde getirmektedir. Özellikle "warping" (çarpılma) olarak tanımlanan boyutsal deformasyonlar, malzemenin yüksek ısıl büzülme eğiliminin bir sonucudur.

Bu kısıtlamaların minimize edilmesi amacıyla literatürde şu teknik stratejiler önerilmektedir:

Isıl Kontrol: Malzemenin kademeli soğumasını sağlamak amacıyla kapalı ve ısıtmalı bir baskı hacminin (enclosed chamber) kullanılması.

Yüzey Adhezyonu: Yüksek tabla sıcaklığı kontrolü ve yapı tablasına tutunmayı artıran brim veya raft gibi yardımcı katman stratejileri (Agócs vd., 2024).

ABS ile üretilen bileşenlerin nihai mekanik davranışı, seçilen süreç parametrelerine karşı son derece duyarlıdır. Özellikle katmanlar arası füzyon (ergime birleşmesi) kalitesinin optimizasyonu, parçanın anizotropik özelliklerini iyileştirmede ve yapısal bütünlüğü sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. FDM süreçlerinde ABS kullanımı; malzemenin sunduğu ileri mekanik özellikler ile prosese özgü termal sınırlandırmalar arasındaki dengenin, doğru parametre yönetimi ile kurulmasını zorunlu kılmaktadır.

Polyethylene Terephthalate Glycol-modified (PETG)

PETG glikol ile modifiye edilmesi sonucu elde edilen, amorf yapılı bir kopolimerdir. FDM (Eriyik Yığma Modelleme) ekosisteminde PLA'nın işleme pratikliği ile ABS'nin yapısal dayanımı arasında bir "denge materyali" olarak konumlanan PETG, sunduğu yüksek baskı kararlılığı ve fonksiyonel mekanik profili sayesinde stratejik bir alternatif haline gelmiştir.

Literatürde, glikol modifikasyonunun malzemenin kristalleşme eğilimini sınırladığı ve bu durumun üretim esnasında hacimsel büzülme ile

"warping" risklerini minimize ettiği vurgulanmaktadır. Kristalleşmenin baskılanması, soğuma döngüsünde daha kararlı bir reolojik davranış sergilenmesini sağlayarak, boyutsal hassasiyetin kritik olduğu karmaşık geometrilerin yüksek doğrulukla üretilmesine olanak tanımaktadır.

Mekanik karakteristikleri incelendiğinde PETG, uygun baskı parametreleri altında PLA'ya yakın çekme dayanımı değerleri sunarken, çok daha yüksek bir kopma uzamasına sahiptir. Bu durum, malzemenin gevrek (brittle) yerine sünek (ductile) bir davranış sergilemesini sağlayarak darbe tokluğunu artırmaktadır. Ancak malzemenin viskoz akış davranışı; nozül sıcaklığı ve baskı hızına karşı son derece duyarlıdır (Dizon vd., 2018).

Düşük sıcaklık değerlerinde katmanlar arası füzyon (ergime birleşmesi) zayıflayarak yapısal bütünlük bozulabilirken; aşırı yüksek sıcaklıklar, viskozite kaybına bağlı olarak "iplenme" (stringing) ve "akma" (oozing) gibi yüzey morfolojisini olumsuz etkileyen kusurlara yol açabilmektedir.

Kimyasal açıdan PETG; suya, asitlere ve alkali ortamlara karşı sergilediği yüksek direnç ile sıvı temaslı bileşenler ve dış ortam koşullarına maruz kalan parçalar için ideal bir adaydır. Malzemenin doğal yarı saydam yapısı ve karakteristik yüzey parlaklığı, optik homojenlik ve estetik kalite gerektiren uygulamalarda tercih edilmesine katkı sunmaktadır. PETG'nin FDM sürecindeki başarısı; malzemenin özgün reolojik özellikleri ile üretim parametrelerinin eş zamanlı olarak optimize edilmesine dayanmaktadır.

Poliamid Esaslı Filamentler (Nylon / PA)

Poliamid (PA6, PA12 vb.) esaslı filamentler, yüksek süneklikleri, üstün dinamik yorulma dirençleri ve aşınma karakteristikleri ile FDM (Eriyik Yığma Modelleme) ekosisteminde ileri mühendislik uygulamaları için kritik bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Poliamidlerin sahip olduğu yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve plastik deformasyon kabiliyeti; dişliler, menteşeler, mafsallar ve darbe etkisine maruz kalan hareketli bileşenlerin üretiminde, PLA ve ABS gibi rijit polimerlerin aksine kırılganlık riskini minimize ederek fonksiyonel bir avantaj sağlamaktadır.

Poliamidlerin sunduğu mekanik avantajlara karşın, malzemenin belirgin higroskopik karakteri (nem absorpsiyon eğilimi), FDM süreçlerinde karşılaşılan en temel teknik sınırlamadır. Poliamid moleküler yapısındaki amit grupları ile su molekülleri arasındaki hidrojen bağları, filamentin ortamdaki nemi hızla bünyesine almasına neden olmaktadır.

Baskı öncesinde uygun dehidrasyon (kurutma) işlemine tabi tutulmayan filamentlerde, ekstrüzyon esnasında ani buharlaşan nem; yapı içerisinde kontrolsüz gözenekliliğe (porozite), mikroskobik çatlaklara ve katmanlar arası füzyon (ergime birleşmesi) zayıflıklarına yol açmaktadır. Bu morfolojik kusurlar; parçanın yalnızca yüzey kalitesini bozmakla kalmayıp, aynı zamanda çekme dayanımı, elastisite modülü ve yorulma ömrü gibi

temel mekanik performans kriterlerinde dramatik düşüşlere neden olmaktadır.

Literatürde, poliamid esaslı parçaların tekrarlanabilir ve yüksek hassasiyetli mekanik özellikler sergileyebilmesi için, baskı öncesi kurutma parametrelerinin (sıcaklık ve süre) malzemenin moleküler ağırlığına ve tipine (PA6 vs PA12) göre optimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca üretim sürecinin; kapalı ve termal olarak izole edilmiş bir hacim içerisinde, düşük bağıl nem ve sabit sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmesi, inter-laminar adhezyon kalitesini ve nihai parça bütünlüğünü belirgin şekilde iyileştirmektedir. PA filamentlerin mühendislik potansiyelinin etkin şekilde değerlendirilmesi, bütüncül bir nem yönetimi ve hassas süreç kontrolü ile doğrudan ilişkilidir.

Kompozit Filamentler (Elyaf ve Parçacık Takviyeli Sistemler)

Kompozit filamentler; PLA, ABS, PETG veya poliamid (PA) gibi termoplastik matrislerin; karbon, cam veya aramid elyafları, metal/seramik partikülleri veya nano-ölçekli dolgu materyalleri ile takviye edilmesiyle elde edilen ileri düzey hibrit malzeme sistemleridir. Bu materyallerin geliştirilmesindeki temel motivasyon, saf polimerlerin yapısal kısıtlamalarını aşarak; elastisite modülü, çekme/basma mukavemeti gibi mekanik özelliklerin yanı sıra termal kararlılık, elektriksel iletkenlik ve aşınma direnci gibi fonksiyonel karakteristikleri iyileştirmektir. Bu gelişim, FDM (Eriyik Yığma Modelleme) teknolojisinin konsept modellemeden çıkarak havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren mühendislik alanlarına entegrasyonunu sağlamıştır.

Takviye mekanizması, elyaf formuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kısa elyaf takviyeli (SFRC) filamentlerde, takviye hacim oranı arttıkça rijitlik ve akma dayanımı belirgin şekilde yükselirken; süneklik ve kopma uzamasındaki düşüş malzemenin daha gevrek (brittle) bir kırılma karakteri sergilemesine neden olmaktadır.

Buna karşın, sürekli elyaf takviyeli (CFRC) sistemlerde, elyafların yük doğrultusuna paralel oryantasyonu sayesinde özgül dayanım ve rijitlik değerleri geleneksel metalik malzemelerle yarışabilecek seviyelere ulaşabilmektedir. Bu durum, baskı yolu (toolpath) planlamasının ve elyaf yöneliminin, parçanın mekanik performansını doğrudan kontrol eden en kritik tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır.

Metal veya seramik parçacık takviyeli hibrit sistemlerde; partikül boyutu, dağılım homojenliği ve matris-takviye ara yüzey etkileşimi, nihai parçanın hem mekanik hem de fonksiyonel davranışını belirlemektedir. Ancak takviye içeriğinin artması, eriyik viskozitesinde belirgin bir artışa yol açarak; nozül tıkanmaları, yüzey morfolojisinin bozulması ve donanım bileşenlerinde abrazif aşınma gibi proses kaynaklı sorunları tetiklemektedir.

Bu kısıtların aşılması amacıyla, kompozit filamentlerin işlenmesinde sertleştirilmiş çelik veya safir uçlu nozüllerin kullanımı, nozül çapının optimize edilmesi ve ekstrüzyon sıcaklıklarının reolojik verilere göre hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Kompozit materyallerin sunduğu üstün özelliklerin etkin kullanımı, malzeme bilimi ile ileri üretim teknolojilerinin bütünsel bir optimizasyonunu zorunlu kılmaktadır.

SONUÇLAR

Sonuç olarak, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) teknolojisi, eklemeli imalat ekosisteminde düşük maliyetli bir prototipleme aracı olmaktan çıkarak, yüksek performanslı mühendislik bileşenlerinin üretilebildiği stratejik bir imalat platformuna evrilmiştir. Bu çalışmada detaylandırıldığı üzere, FDM yönteminin başarısı yalnızca cihazın mekanik kabiliyetlerine değil, aynı zamanda kullanılan filamentin karakteristik özelliklerine ve proses parametrelerinin (katman kalınlığı, dolgu oranı, baskı sıcaklığı vb.) bu özelliklerle uyumuna doğrudan bağlıdır.

Filament teknolojisindeki yenilikler, FDM yönteminin uygulama sınırlarını belirleyen en temel unsurdur. PLA ve ABS gibi geleneksel polimerler kolay işlenebilirlikleriyle prototipleme aşamasında baskınlığını korurken; PETG, PC ve TPU gibi malzemeler endüstriyel dayanıklılık, kimyasal direnç ve esneklik gereksinimlerini karşılamaktadır. Özellikle karbon fiber veya cam fiber ile güçlendirilmiş kompozit filamentlerin literatüre girmesi, polimer yapıların mekanik mukavemetini ve boyutsal kararlılığını önemli ölçüde artırarak FDM'nin havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi kritik sektörlerde nihai parça üretimi için güvenilir bir alternatif olmasını sağlamıştır.

İleriye dönük olarak, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda biyobozunur ve geri dönüştürülmüş filamentlerin geliştirilmesi, sektörün çevresel etkisini minimize edecektir. Ayrıca, akıllı materyallerin (4D baskı) FDM süreçlerine entegrasyonu ve hibrit üretim tekniklerinin yaygınlaşması, bu teknolojinin Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm süreçlerindeki merkezi rolünü daha da pekiştirecektir. Nihayetinde, doğru malzeme seçimi ve optimize edilmiş baskı stratejileri, FDM yöntemini geleceğin yerelleştirilmiş ve kişiselleştirilmiş üretim modellerinin vazgeçilmez bir yapı taşı haline getirecektir.

REFERANSLAR

Agócs, C., Hanon, M. M., & Zsidai, L. (2024). A comprehensive review of fused deposition modeling (FDM) method using PLA, ABS, and PET-G polymers. *Gradus*, *11*(1), Article 007. https://doi.org/10.47833/2024.1.ENG.007

Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, *10*, 791–803. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079

Daminabo, S. C., Goel, S., Grammatikos, S. A., Nezhad, H. Y., & Thakur, V. K. (2020). Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): Techniques for polymer material systems. *Materials Today Chemistry*, *16*, Article 100248. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100248

Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, *20*, 44–67. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002

Enriconi, M., Rodriguez, R., Araújo, M., Rocha, J., García-Martín, R., Ribeiro, J., Pisonero, J., & Rodríguez-Martín, M. (2025). A comprehensive review of fused filament fabrication: Numerical modeling approaches and emerging trends. *Applied Sciences*, *15*(12), Article 6696. https://doi.org/10.3390/app15126696

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *107*, 367–392. https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012

Fico, D., Rizzo, D., Casciaro, R., & Esposito Corcione, C. (2022). A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): Focus on sustainability and recycled materials. *Polymers*, *14*(3), Article 465. https://doi.org/10.3390/polym14030465

Zhou, L., Liu, J., Li, Y., & Wang, Q. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, *24*(9), Article 2668. https://doi.org/10.3390/s24092668

Eklemeli İmalat Teknolojileri

Murad KHALIGOV [1]

Mustafa Özgür ÖTEYAKA[2]

1- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havaclık Bilimleri ve Teknolojileri. khaligovmurad97@gmail.com. ORCID No: 0009-0008-3119-7746
2- Prof. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Eskişehir Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Mekatronik Programı. moteyaka@gmail.com ORCID No: 0000-0002-1488-6098.

ÖZET

Eklemeli imalat, bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu tasarımların, malzemeyi katman katman üst üste ekleyerek fiziksel bir nesneye dönüştürüldüğü yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Geleneksel imalat yöntemlerinden olan ve malzemeyi eksilterek (kesme, delme, taşlama) şekil veren talaşlı imalatın aksine, bu yöntem "ekleyerek" ilerlediği için hammadde israfını en aza indirir. Süreç, karmaşık geometrilerin ve iç boşluklu yapıların üretilmesine imkan tanıyarak tasarımcılara sınırsız bir özgürlük sunar. Plastiklerin eritilmesiyle yapılan FDM, reçinelerin ışıkla sertleştirildiği SLA ve toz halindeki metallerin lazerle birleştirildiği SLM gibi farklı teknikler, teknolojinin kullanım alanını hobi projelerinden yüksek performanslı havacılık parçalarına kadar genişletir. Özellikle hızlı prototipleme ve kişiye özel medikal cihaz üretiminde devrim yaratan eklemeli imalat, günümüzde endüstriyel üretimin dijitalleşmesinde ve sürdürülebilir üretim modellerinin gelişmesinde kilit bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Eklemeli imalat, FDM, SLA, Prototipleme, Metal toz.

GİRİŞ

Günümüzde "üç boyutlu yazıcılar" olarak da adlandırılan eklemeli imalat (additive manufacturing) teknolojisi, ticari olarak ilk kez 1980'li yıllarda literatüre ve endüstriye girmiştir. Bu teknolojinin gelişim sürecinde çok sayıda şirketin stratejik yatırımları ve yoğun patent çalışmaları belirleyici bir rol oynamıştır (Sürmen, 2019). Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya imkansız olan karmaşık geometrili parçaların imalatını kolaylaştıran bu teknoloji, gelişimini günümüzde de hızla sürdürmektedir. Özellikle sunduğu yüksek mekanik performans ve tasarım esnekliği sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, tıp ve savunma sanayii gibi kritik sektörlerde öncelikli tercih haline gelmiştir (Çelik & Özkan, 2017). Teknolojinin sağladığı hammadde tasarrufu ve üretim sonrası atık miktarının minimum düzeyde kalması, sürdürülebilirlik açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca havacılık sektöründe, yüksek maliyetli parçaların yenisiyle değiştirilmesi yerine eklemeli imalat yöntemleriyle onarılması, operasyonel maliyetleri düşüren stratejik bir çözüm sunmaktadır (Poyraz & Kuşhan, 2018).

Eklemeli imalatı geleneksel yöntemlerden ayıran temel fark; parçadan malzeme eksilterek (talaşlı imalat) şekil vermek yerine, malzemeyi katmanlar halinde üst üste ekleyerek inşa etmesidir (Kruth ve diğerleri, 1998). Üretim süreci, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları veya gelişmiş tarama sistemleri (lazer, optik, MR) aracılığıyla dijital bir modelin oluşturulmasıyla başlar (Sürmen, 2019). Hazırlanan bu dijital model, STL dosya formatına dönüştürülerek üretim makinesine aktarılır. Bu aşamada tarama stratejisi, lazer gücü ve çalışma sıcaklığı gibi kritik parametreler optimize edilir (Yalçın & Ergene, 2017). İmalat süreci tamamlandıktan sonra parçanın nihai özelliklerini kazanması amacıyla; taşlama, cilalama, bilye püskürtme gibi yüzey işlemlerinin yanı sıra ısıl işlem ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi metalurjik iyileştirme yöntemleri uygulanır (Dedeakayaoğulları & Kaçal, 2020).

Eklemeli İmalat Yöntemleri

Günümüzde, literatürde çok sayıda eklemeli imalat yöntemi tanımlanmış olup bu süreçler çeşitli kriterlere göre kategorize edilmektedir. Sınıflandırmada temel olarak; kullanılan hammadde türü (polimer, seramik, metal), işleme prensibi (doğrudan veya dolaylı işlemler) ve hammaddenin fiziksel durumu (sıvı, toz veya katı tabaka) baz alınmaktadır (Çelik ve diğerleri, 2013) (Tablo 1).

Teknolojik mekanizmalar incelendiğinde; Seçici Lazer Eritme (SLM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM) gibi

toz veya tel bazlı yöntemler, malzemeyi termal enerji ile eritme veya yumuşatma prensibiyle katmanlaştırmaktadır. Buna karşın, sıvı bazlı bir yöntem olan Stereolitografi (SLA), oda sıcaklığında sıvı formda bulunan fotopolimer reçinenin ultraviyole (UV) lazer yardımıyla bölgesel olarak kürlenmesi (katılaştırılması) esasına dayanır. Her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte, üretimde kullanılacak hammadde seçimi (toz, polimer, reçine vb.) nihai parçanın özelliklerini doğrudan belirlemektedir.

Endüstriyel bir makine seçiminde; üretim hızı, birim prototip maliyeti, malzeme çeşitliliği ve renk kabiliyetleri en temel karar parametreleri olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda, eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğünden yararlanılarak, özellikle yüksek mukavemet gerektiren yapısal yük taşıyıcı bileşenlerin bu yöntemlerle üretilmesine yönelik güçlü bir eğilim oluşmuştur. Endüstride metalik yapıların inşasında; Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Eritme (SLM), Doğrudan Metal Biriktirme (DMD) ve Elektron Işın Eritme (EBM) gibi ileri teknolojiler sıklıkla tercih edilmektedir (Bikas ve diğerleri, 2015).

Tablo 1. Eklemeli İmalat Teknolojileri (Sürmen, 2019).

Eklemeli İmalat					
Tip	**Kategori**	**Yöntem**	**Teknoloji**	**Malzeme**	Güç **Kaynağı**
Sıvı	Eriyik	Malzeme ekstürzyonu	FDM	Termoplastik	Termal enerji
	Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SLA	Fotopolimer, Seramik	UV ışını
			DLP		
		Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	Projeksiyon
Katı	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM	Kâğıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer ışını
Toz	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek güçlü lazer ışını
			DMSL	Metal tozu, Seramik tozu	
			SLM		
			EBM		Elektron ışını
		Direk enerji depolama	LENS	Erimiş metal tozu	Lazer ışını
			EBAM		
	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik ve Metal tozları, Kum	Termal enerji

Havacılık Sektöründe Eklemeli İmalat Teknolojileri

Havacılık ve uzay sektöründe üretim süreçleri; fonksiyonel performans, teslimat sürelerinin optimizasyonu, hafifletme (weight reduction), yapısal karmaşıklık, maliyet yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi birbiriyle doğrudan etkileşim halinde olan çok boyutlu teknik ve ekonomik hedeflere tabidir. Bu hedefler arasındaki güçlü korelasyon, optimum tasarım çözümünün belirlenmesinde her bir faktörün eş zamanlı olarak değerlendirilmesini zorunlu kılar. Havacılık uygulamalarının spesifik gereksinimlerine göre bu hedeflerin öncelik sıralaması değişebilse de, temel parametreler literatürde şu şekilde tanımlanmaktadır (Blakey-Milner ve diğerleri, 2021):

- Fonksiyonel Performans: Parçanın ekstrem koşullardaki çalışma verimliliği.
- Hafifletme: Topoloji optimizasyonu ile yapısal ağırlığın minimize edilmesi.
- Maliyet Yönetimi: Üretim, malzeme ve operasyonel maliyetlerin dengelenmesi.
- Karmaşıklık: Geleneksel yöntemlerle imkansız olan iç kanallı veya kafes yapıların entegrasyonu.

Bu hedeflere ulaşmada, özellikle metalik malzemelerin üretiminde Seçici Lazer Eritme (SLM) yöntemi kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle paslanmaz çelik, titanyum ve alüminyum alaşımları gibi endüstriyel metaller için oldukça etkili bir yöntem olan SLM, ince bir toz tabakasının lazer ışını ile hassas bir şekilde taranarak şekillendirilmesi prensibine dayanır.

Nihai parçada düşük porozite, yüksek mukavemet ve sertlik gibi optimum mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için lazer gücü ve tarama hızı gibi proses parametrelerinin optimizasyonu hayati önem taşır. SLM teknolojisi, karmaşık geometrilerin üretiminde tasarımcıya geniş bir özgürlük tanısa da, destek yapılarının (support structures) kullanımı ve ısıl gerilmelere bağlı deformasyon riskleri halen önemli sınırlamalar arasında yer almaktadır. Bu kısıtlamalar, hem tasarım sürecini hem de toplam üretim maliyetini doğrudan etkilemektedir.

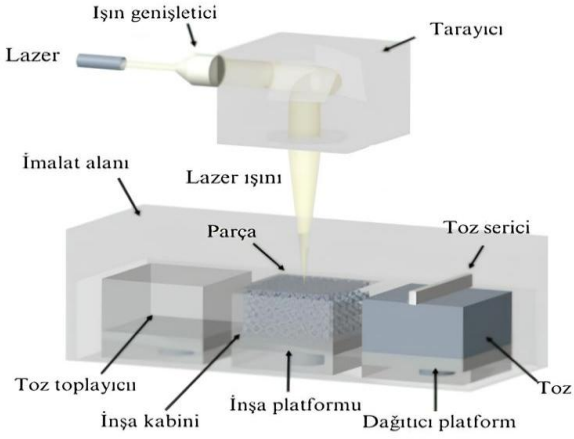
Mekanik açıdan incelendiğinde, SLM süreci Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ile benzer bir temel prensibe sahip olsa da, aralarında metalurjik açıdan önemli bir fark bulunmaktadır. SLS yönteminde toz parçacıkları genellikle sinterleme (kısmi erime veya ergime sıcaklığının altında birleşme) yoluyla bir araya getirilirken; SLM yönteminde yüksek enerjili lazer, malzemenin tamamen erimesini sağlayarak daha yoğun ve homojen bir yapı

oluşturur. Ayrıca, SLS genellikle polimer esaslı malzemelerin üretiminde baskınken, SLM metalik malzemelerin yüksek performanslı üretimi için çok daha elverişli bir mekanizmaya sahiptir (Karayel & Bozkurt, 2020).

Seçici Lazer Eritme (SLM) süreci, dijital bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinin oluşturulmasıyla başlar. Bu model, özel dilimleme yazılımları (slicing software) aracılığıyla iki boyutlu kesitlere ayrılır ve üretim verisi olarak makineye aktarılır. Prosesin temel mekanizması, yüksek enerjili bir lazer ışınının, bir tabla üzerine serilmiş ince toz tabakasını hassas bir şekilde tarayarak, alt katmanda hâlihazırda katılaşmış olan malzeme ile ergitip birleştirmesi esasına dayanır.

Şekillendirme işlemi, lazerin belirlenen tarama stratejisi doğrultusunda ilerlemesiyle gerçekleşir. Her bir kesit veya katman, erimiş tozun oluşturduğu mikroskobik hatlar (vektörler) ile doldurulur. Bu teknolojiyle üretilen parçanın yapısal bütünlüğü ve kalitesi, her bir vektörün ve katman arası bağın niteliğine doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, lazer gücü ve tarama hızı gibi proses parametrelerinin optimizasyonu hayati önem taşır; zira bu değişkenler parçanın mikroyapısı, gözenekliliği (porozite), sertliği ve genel mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. İstenen kalite standartlarına ve fonksiyonel özelliklere ulaşabilmek için bu parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir (Yadroitsev ve diğerleri, 2007).

SLM yönteminde kullanılan malzeme yelpazesi, uygulama alanına ve parçadan beklenen mekanik isterlere göre genişlik göstermektedir. Günümüzde uzay ve havacılık, savunma sanayii, biyomedikal ve otomotiv gibi kritik sektörlerde; yüksek mukavemet ve korozyon direnci sunan nikel alaşımları, titanyum, paslanmaz çelik, kobalt-krom ve alüminyum gibi çeşitli metal tozları başarıyla işlenmektedir (Poyraz & Kuşhan, 2018).



Şekil 1. Seçici Lazer Eritme Cihazı Görseli (Balasubramanian ve diğerleri, 2019).

Seçici Lazer Eritme (SLM) teknolojisi, endüstriyel üretimde sunduğu eşsiz imkanların yanı sıra teknik ve ekonomik bazı kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarını şu şekilde kategorize edebiliriz:

Avantajlar:

- Geometrik Serbestlik ve Karmaşıklık: Geleneksel yöntemlerle (frezeleme, döküm vb.) üretilmesi imkansız olan iç kanallar, kafes (lattice) yapılar ve topoloji optimizasyonu yapılmış hafif parçaların üretimine olanak tanır.

- Parça Konsolidasyonu: Çok sayıda parçadan oluşan montaj grupları, tek bir gövde halinde üretilebilir. Bu durum, birleştirme işlemlerini (kaynak, perçin) ortadan kaldırarak yapısal bütünlüğü artırır ve ağırlığı azaltır.

- Malzeme Verimliliği: Katmanlı üretim prensibi sayesinde sadece parçayı oluşturan bölgeye malzeme uygulanır. Talaşlı imalata kıyasla hammadde israfı (buy-to-fly ratio) oldukça düşüktür.

- Kişiselleştirme: Kalıp gerektirmediği için medikal (kişiye özel implantlar) ve dental alanlarda her hasta için spesifik üretim yapılmasına imkan tanır.

- Yüksek Mekanik Performans: Tam erime (full melting) prensibi sayesinde üretilen parçalar, döküm yöntemine kıyasla daha ince mikroyapıya ve yüksek yoğunluğa (>%99.5) sahiptir.

Dezavantajlar:

- Yüksek İlk Yatırım ve İşletme Maliyetleri: SLM makineleri, yüksek enerjili lazer sistemleri ve inert gaz kontrol üniteleri nedeniyle oldukça maliyetlidir. Ayrıca kullanılan küresel metal tozlarının birim fiyatı yüksektir.

- Artık Gerilmeler (Residual Stresses): Hızlı ısıtma ve soğuma döngüleri, parça içinde ciddi termal gerilmelere neden olur. Bu durum parçada çarpılmaya (warpage) veya çatlak oluşumuna yol açabilir.

- Destek Yapısı Gereksinimi: Havada asılı kalan (overhang) bölgelerin ve geniş yatay yüzeylerin çökmesini engellemek için destek yapılarına ihtiyaç duyulur. Bu yapılar hem malzeme tüketimini artırır hem de üretim sonrası manuel işçilik gerektirir.

- Yüzey Pürüzlülüğü: Tozların lazerle ergitilmesi sırasında oluşan "merdiven basamağı" etkisi ve yarı erimiş toz yapışmaları nedeniyle yüzey pürüzlülüğü yüksektir. Genellikle talaşlı imalat veya kumlama gibi ikincil işlemler gerektirir.

- Üretim Hızı ve Boyut Sınırı: Büyük parçaların üretimi uzun zaman alabilir (saatler hatta günler). Ayrıca yapı tablası boyutları (build envelope) genellikle sınırlıdır.

SONUÇ

Sonuç olarak eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerinin kısıtlamalarını ortadan kaldırarak sanayide tasarım odaklı yeni bir dönemi başlatmıştır. Malzeme verimliliği, karmaşık geometrilerin üretilebilmesi ve lojistik süreçlerini kısaltan yerinde üretim imkanı gibi avantajlar, bu teknolojiyi endüstri 4.0'ın vazgeçilmez bir parçası haline getirmektedir. Günümüzde prototipleme aşamasını çoktan aşarak nihai parça üretimine odaklanan bu yöntem; havacılıktan sağlığa kadar pek çok kritik sektörde sürdürülebilir, hızlı ve kişiselleştirilmiş çözümler sunmaya devam edecektir. Gelecekte malzeme çeşitliliğinin artması ve üretim hızlarının iyileşmesiyle birlikte, eklemeli imalatın küresel üretim ekosistemindeki stratejik rolünün daha da baskın hale gelmesi beklenmektedir.

REFERANSLAR

Balasubramanian, N., Zhiheng, H., Xu, S., Wei, Z., & Jun, W. (2019). Development of micro selective laser melting: The state of the art and future perspectives. Engineering, 5(4), 702–720. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.002

Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(1-4), 389–405. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2

Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., ... & du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. Materials & Design, 209, Article 110008. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M., & Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (31), 53–70.

Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 107–121. https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/27453/289155

Dedeakayaoğulları, H., & Kaçal, A. (2020). Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 1(1), 1–12.

Karayel, E., & Bozkurt, Y. (2020). Additive manufacturing method and different welding applications. Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 11424–11438. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.039

Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. CIRP Annals, 47(2), 525–540. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5

Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018a). Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. Mühendis ve Makina, 59(691), 59–69.

Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018b). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 729–742. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416479

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 373–392.

Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Parametric analysis of the selective laser melting process. Applied Surface Science, 253(19), 8064–8069. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.088

Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 9(3), 65–88.

Zn–Co Kaplamaların Elektrodepolama İle Üretimi ve Özellikleri

Salim GÜVEN[1]

Demet ZALAOĞLU[2]

1- Salim GÜVEN; Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Bölümü. salim144gvn@gmail.com ORCID No: 0009-0003-6418-0960

2- Dr. Öğr. Üyesi Demet ZALAOĞLU; Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Bölümü. demetkayretli@osmaniye.edu.tr RCID No:0000-0002-1116-6327

ÖZET

Zn esaslı elektrodepolama ile elde edilen kaplamalar, çelik malzemelerin korozyon korumasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak saf Zn kaplamaların sınırlı mekanik dayanımı ve uzun süreli kullanım performansı, elektrodepolama Zn ve alaşımlarına ait kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaları beraberinde getirmiştir. Bu amaçla Zn'nun Co ile alaşımlandırılması, daha ince taneli mikroyapı oluşumu, artan sertlik sonuçları ve iyileştirilmiş korozyon direnci sağlaması nedeniyle elektrodepolama ile kaplamada dikkat çeken bir alaşım olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, elektrodepolama yöntemiyle üretilen Zn–Co alaşım kaplamalara ilişkin literatür, işlem parametreleri, elektrokimyasal davranış ve mikroyapısal evrim bağlamında derlenmiştir. Akım yoğunluğu, pH, banyo sıcaklığı ve nano parçacık takviyesi gibi elektrodepolama parametrelerinin alaşım kompozisyonu, tane boyutu ve kaplama morfolojisi üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Sonuç olarak ise Zn–Co esaslı elektrodepolama kaplamaların performans belirleyici temel faktörlerini genel bir bakış açısıyla ortaya koyarak, bu alanda mevcut bilgi birikimini sistematik biçimde özetlemeyi ve gelecekteki araştırmalara katkı sağlayacak temel çalışmaları vermeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Zn-Co, Elektrodepolama, pH, Akım Yoğunluğu, Sıcaklık, Nanoparçacık

GİRİŞ

Endüstride birçok alanda metal yüzeylerinde, çalışma şartlarından dolayı zamanla aşınma ve korozyon gibi bozulmalar oluşmaktadır. Meydana gelen bozulmalar ise birçok endüstride agresif hasara ve tesis verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır (ASM, 2001; Shakoor dv., 2014). Bozulmaya maruz kalan yüzeylerin kütle özelliklerinin iyileştirilmesine göre daha verimli ve ekonomik bir yol olacağından dolayı yüzey özelliklerinin geliştirilmesi iyi bir tercih olmaktadır (Shakoor dv., 2014). Bu amaçla sertlik, aşınma ve korozyon gibi yüzey özellikleri iyileştirmek için karbürleme (Abdul Azis vd., 2012), nitrürleme (Shetty vd., 2009), karbo-nitrürleme (Li ve Han, 2008), elektrodepolama (Shakoor dv., 2014) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

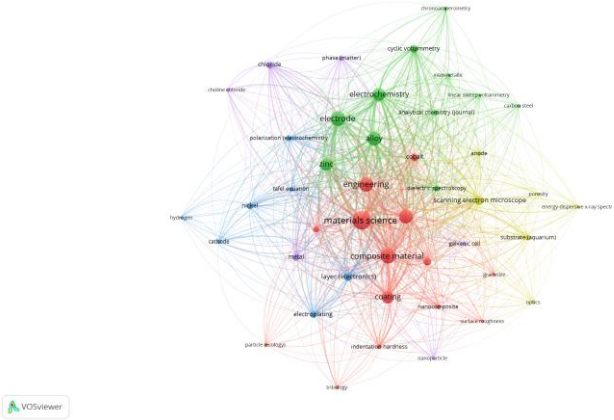
Günümüzde basitlik, ekonomiklik, yüksek biriktirme hızı, biriktirmenin homojenliği gibi avantajlarında dolayı elektrodepolama gibi sulu çözeltiler kullanılarak yapılan metal biriktirme yöntemleri ilgi görmektedir (Chen vd., 2010; Krishnaveni vd., 2006; Shakoor dv., 2014). Elektrodepolama ile elde edilen Zn kaplamalar ise kurban edilebilir

özellikleri ile çeliğe katodik koruma sağlayarak atmosferik ve özellikle deniz gibi korozif ortamlarda etkili bir koruyucu tabaka oluşturmaktadır (Maniam ve Paul, 2021; Thomas vd., 2012). Ancak Zn kaplamaların demir esaslı alt tabakaları korozyondan korumak için feda edilebilir bir tabaka görevi gördüğü kanıtlanmış olsa da Zn kaplamalarının nispeten düşük mekanik dayanım sergilemeleri ve uzun süreli korozyon performansları sınırlı olmaktadır. Bu nedenle özellikle korozif ortamlarda korozyon performansı gibi özellikleri artırmak amacıyla çinko, kobalt (Co), nikel (Ni), demir (Fe) gibi demir grubu metallerle alaşımlandırılması yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Maniam ve Paul, 2021).

Farklı Zn alaşımları arasında, düşük oranda Co (<%3) içeren Zn alaşımı, maliyet performansı ve geleneksel çinko sistemine göre daha iyi korozyon direnci sağlamsından dolayı uygun seçenektir (Garcia vd., 2016). Ayrıca Zn–Co alaşım kaplamalarının, saf Zn kaplamalara kıyasla daha ince taneli mikroyapı sergilediği, sertlik ve aşınma direncinin arttığı ve uygun alaşım oranlarında daha yüksek korozyon direncini gösterdiği belirtmiştir (Chen ve Sun, 2001; Gharahcheshmeh ve Sohi, 2009).

Zn–Co alaşım kaplamaların performansını daha da iyileştirmek amacıyla, karbon nanotüp (CNT) ve Al_2O_3 gibi seramik nanoparçacıkların elektrodepolama sırasında birlikte çökeltilmesiyle nanokompozit kaplamalar geliştirilmiştir (Popoola vd., 2016). Gerçekleştirilen uygun kaplama işlem parametreleri altında elde edilen kaplamanın hem mekanik özellikleri hem de korozyon davranışını olumlu yönde etkilediği bildirilmektedir (Diafi vd., 2020; Popoola vd., 2016).

Yapılan çalışmada, elektrodepolama yöntemiyle üretilen Zn–Co alaşımlı ve nanoparçacık takviyeli Zn–Co kaplamalara, kaplama parametreleri ve nanoparçacık takviye ilavesi gibi değişkenlerinin kaplama özelliklilerine etkileri incelenmiştir. Şekil 1'de bibliyometrik analiz verilmiştir. Bu analiz OpenAlex veri tabanından elde edilen yayınlar kullanılarak gerçekleştirilen anahtar kelime eş-oluşum haritalarıyla VOS-viewer kullanılarak oluşturulan ağ yapısıdır. Buna göre elde edilen şekil Zn ve Zn–Co elektrodepolama kaplamalara yönelik literatürün ağırlıklı olarak elektrokimyasal mekanizmalar, alaşımlandırma etkileri, mikroyapısal özellikler ve kaplama performansı ekseninde şekillendiğini ortaya konmaktadır. Bu doğrultuda, mevcut bölümde Zn–Co esaslı elektrodepolama ve nanokompozit kaplamalara ilişkin literatürde yapılan çalışmaların ortaya koyduğu genel eğilimlerin verilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1. Zn ve Zn–Co elektrodepolama kaplamalara yönelik bibliyometrik analiz

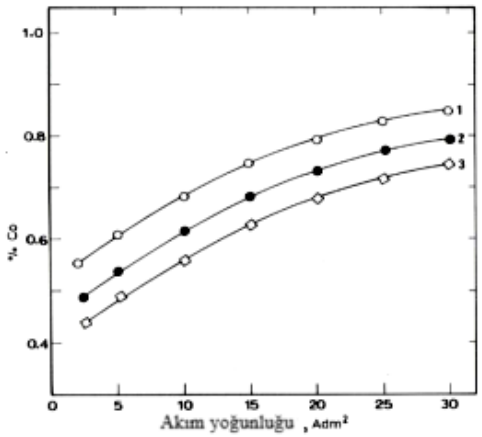
Zn–Co TABANLI KAPLAMALARDA İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Elektrodepolama yöntemiyle üretilen Zn–Co tabanlı kaplamaların yapısal, mikrosertlik, aşınma gibi mekanik özellikleri ve korozyon özellikleri kaplama parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Akım yoğunluğu, banyo bileşimi, nanoparçacık varlığı ve miktarı, pH ve sıcaklık gibi parametreler; alaşım bileşimi, tane boyutu, yüzey morfolojisi ve kaplama bütünlüğü üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde Zn–Co sistemlerine yönelik çalışmalar, bu parametrelerin kontrollü biçimde ayarlanmasının kaplama performansını önemli ölçüde etkilediğini ve kaplama yüzeyine ait özellikleri değiştirdiğini ortaya koymaktadır (Bajat vd. 2010; Boshkov vd., 2008; Diafi vd., 2020; Dindar-Safa vd., 2022, Falcon ve Aoki, 2024).

Akım Yoğunluğunun Zn–Co Tabanlı Kaplamalara Etkisi

Elektrodepolama sürecinin kinetiğini belirleyen en kritik parametreler arasında akım yoğunluğu yer almaktadır. Literatürde elektrodepolama Zn–Co alaşım kaplamalarda akım yoğunluğunun etkisinin araştırıldığı gözlemlenmiştir (Bajat vd., 2010; Dindar-Safa vd., 2022; Eliaze vd., 2010; Gharahcheshmeh ve Sohi, 2009; Gharahcheshmeh ve Sohi, 2012; Lima-Neto vd. 2007; Sajjadnejada vd., 2014; Sundaramali vd., 2023). Gharahcheshmeh ve Sohi, (2009) akım yoğunluğundaki artış ile Co içeriğinin arttığını belirtmişlerdir. Bu durumu ise hidrojen evrimi reaksiyonu sonucu arayüzeyde artan pH değeri ve sonrasında çinkonun indirgenmesini destekleyen hidroksit tabakasının tekrar oluşumuyla eş çökelmenin anormal hale gelmesi olarak ifade etmişlerdir. Sonuç olarak akım yoğunluğunun artırılmasıyla, daha kolay indirgenen Zn^{2+} iyonunun çökelmesinin

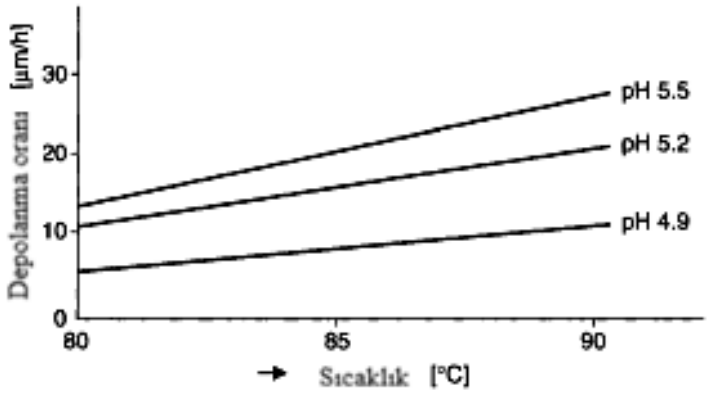
hızlandığını ve katotun yanındaki çözeltiden Zn^{2+} iyonlarının arındırılmasıyla daha fazla Co^{2+} iyonunun indirgenme fırsatı bulması ve indirgenme hızının artmasına neden olmasından dolayı kaplamanın kobalt içeriğinin arttığını söylemişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmada, Zn-Co alaşım kaplamalarında, akım yoğunluğunun 10'dan 15 $mAcm^{-2}$ değerlerine çıkmasıyla tane boyutunun azalmasına rağmen 15'ten 30 $mAcm^{-2}$ akım yoğunluğuna ve daha yüksek akım yoğunluklarına çıkılması ile ters etki yaparak irileşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde artan akım yoğunluğu ile Co miktarının arttığını ifade eden çalışmalar bulunmaktadır (Eliaze vd., 2010; Gharahcheshmeh ve Sohi, 2012). Ayrıca Dindar-Safa vd. (2022) yapmış olduğu çalışmalarında akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte kaplama içerisindeki Co oranının belirgin şekilde yükseldiği sonucuna ulaşmıştır. Selvaraju ve Thangaraj (2018) akım yoğunluğu ve dağılımının, Zn-Co birikiminde önemli bir rol oynadığını ve akım yoğunluğu değerinin artması ile birikintideki Co içeriğinin de arttığını belirtmiştir. Düşük akım yoğunluğu değerlerinde (1,0-3,0 $A.dm^{-2}$) gerçekleştirilen kaplama işlemlerinde, metal iyonlarının depolamada bulunan yüksek miktarda çinko nedeniyle alt tabakanın yüzeyinde beyaz-gri renkli metal olarak biriktiğini ifade ederlerken optimize edilmiş 4,0 $A.dm^{-2}$ akım yoğunluğunda gerçekleştirdikleri kaplama işleminde Zn-Co alaşımı ile depolanmış yüzeyin parlak olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun ise elektrodepolanmış Zn-Co alaşımında kobalt miktarının artmasından kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir. Narasimhamurthy ve Shivashankarappa (2021) yaptıkları çalışmalarında akım yoğunluğundaki artış ile kaplanan Zn-Co alaşımındaki % Co oranını arttırdığını (Şekil 2) ve bu durumun çinkonun kobalttan daha hızlı tükenmesi nedeniyle katot difüzyon tabakasında tercihli olarak birikmesine kısaca difüzyonun kontrollü olmasına dayanabileceğini söylemişlerdir.



Şekil 2. Akım yoğunluğuna bağlı olarak alaşımdaki %Co oranının değişimi (Narasimhamurthy ve Shivashankarappa 2021)

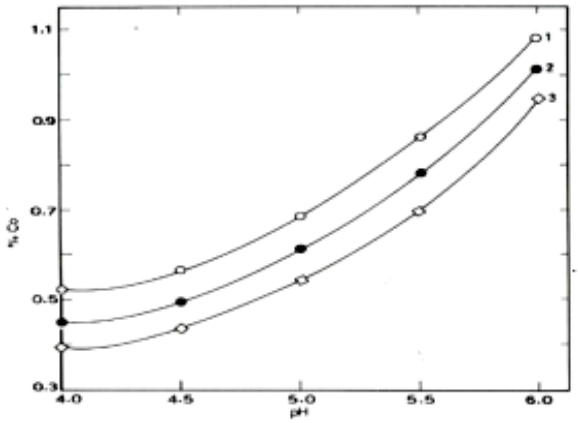
pH Değerinin Zn–Co Tabanlı Kaplamalara Etkisi

Metal depolamada elektrolitin pH değeri, çözeltinin elektriksel iletkenliği, çözeltiye daldırılmış alt tabakanın korozyon derecesi, biriktirme hızı, hidrojenin eşzamanlı evrimi gibi biriktirme özelliklerini etkileyeceği için çok önemlidir. Şekil 3, pH'ın akımsız nikel-fosfor sisteminde metal biriktirme hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu tür çözeltiler, açıklandığı gibi doğru pH değerini korumak için tamponlanır. Hafif pH değişiklikleri bile sadece biriktirme hızını değil, birikintide bulunan fosfor miktarını da etkileyebilir. Ayrıca, birikintinin mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kanani, 2004).



Şekil 3. pH'ın akımsız nikel-fosfor biriktirme hızına etkisi (Kanani, 2004).

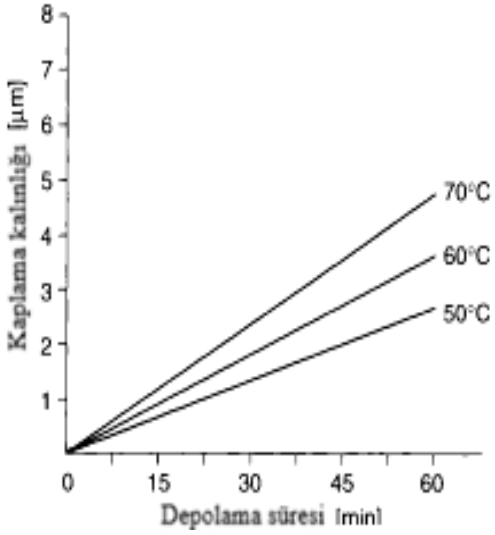
Elektrolitin pH değerinin artırılması, Zn'nin elektrodepolamaya ek olarak katottaki hidrojen iyonu konsantrasyonunu önemli ölçüde etkileyen iletkenliği belirler. pH değerinin düşürülmesi iletkenliğin artmasını sağlar ve iyi bir birikim sağlar. Ancak çözeltiyi belirli bir pH değerinin altında asitlendirir. Elektrolit çözeltisinin asitlenmesi katodun hidrojen iyonu konsantrasyonunu yükseltir ve sonuç olarak hidrojen evrim reaksiyonu Zn birikimini domine eder. Bu durum genel birikim sürecini ve Zn birikiminin korozyon direncini etkiler (Maniam ve Paul, 2021). Sonuç olarak ise Zn-Co elektrodepolamada farklı pH değerlerine sahip farklı çökelme ortamları ile önemli çalışmalar yapılmıştır (Boshkov vd. 2008; Diafi vd. 2017; Koleva vd. 2005; Narasimhamurthy ve Shivashankarappa, 2021; Sundaramali vd. 2023;). Narasimhamurthy ve Shivashankarappa (2021) yaptıkları çalışmalarında elde etkileri ve Şekil 4'te verilen sonuca göre banyo pH'ının artmasıyla alaşım birikimindeki kobalt yüzdesinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 4. Kaplama banyosunun pH'ına göre alaşımdaki %Co değişimi (Narasimhamurthy ve Shivashankarappa, 2021)

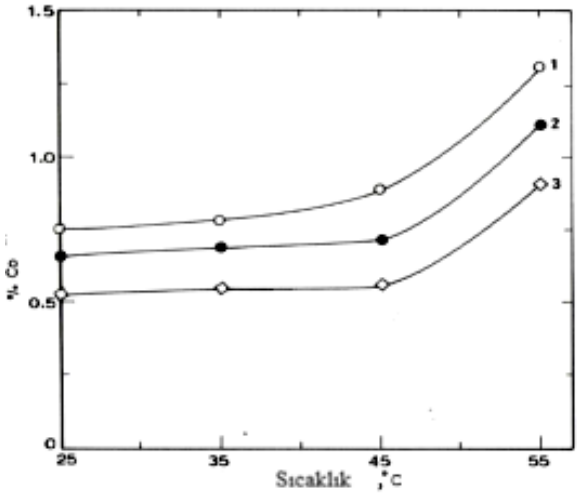
Banyo Sıcaklığının Zn–Co Tabanlı Kaplamalara Etkisi

Elektrolit sıcaklığı ve sıcaklığının sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, kimyasal biriktirme işlemlerinin yürütülmesinde en önemli kriterlerden biridir. Şekil 5'te gösterildiği gibi banyo sıcaklığı, biriktirme hızını ve banyo stabilitesini belirler. Sıcaklığın artması, elektrolitik iletkenliğin artmasına neden olur ve tüm reaksiyon hızları hızlandığından, çözeltideki katkı maddelerinin tüketim hızını artırır. Ancak yüksek sıcaklıklarda banyodaki kararlılığın bozulması ve istenmeyen yan reaksiyonların hızlanması söz konusu olabilmektedir (Kanani, 2004).



Şekil 5. Kimyasal paladyum birikimi için banyo sıcaklığının birikim kalınlığı üzerindeki etkisi (Kanani, 2004).

Narasimhamurthy ve Shivashankarappa 2021; sıcaklığın alaşım bileşimi üzerindeki etkisini incelemek için farklı sıcaklıklarda deneyler yapılmışlardır. Şekil 6'da alaşım bileşiminin kaplama banyosunun sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Şekle göre sıcaklığın artması ile Zn-Co alaşımı bileşimimdeki %Co oranını artırmıştır. Ancak Dindar-Safa vd. (2022) ise elde ettikleri sonuçlarda, 25 ve 60 °C'de sıcaklıklarda gerçekleştirdikleri elektrodepolama işlemlerinde elde edilen kaplamalarda kimyasal bileşimlerinin neredeyse benzer olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 6. Çalışma banyosunun sıcaklığı ile alaşımdaki %Co oranının değişimi (Narasimhamurthy ve Shivashankarappa, 2021)

Banyoda Nanoparçacıkların Varlığının Zn–Co Tabanlı Kaplamalara Etkisi

Elektrodepolama ile elde edilen kompozit kaplamalar, elektrolitik banyoya çözünmeyen katı parçacıklar eklenerek elde edilir. Bu çözünmez parçacıkların iyi kimyasal stabiliteye sahip olmaları elde edilen kaplamaların daha iyi mekanik özellikler sağlamaları ve yüksek sıcaklıkta iyi aşınma direnci ve korozyon direnci göstermelerini sağlar. Sağladıkları bu avantajlardan dolayı takviye elamanı olarak Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2, SiO_2, SiC gibi oksitler kullanılabilmektedir. ZnCo–Al_2O_3 ve ZnCo–SiC gibi kompozit kaplamalar, Zn-Co kaplamaları iyileştirmek için kullanılmıştır (Diafi vd. 2020).

Diafi vd. (2020) TiO_2 nanopartikül içeriğinin, Zn-Co kaplamasının yapısal, mikro sertlik ve korozyon direnci gibi özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. TiO_2 eklenmesi ve miktarının arttırılması ile daha küçük kristal

boyutu elde edilmesinin yanı sıra sertlik değeri ve korozyon dayanımının da arttığını belirlemişlerdir. Tulio ve Carlos (2009) ise SiC veya Al_2O_3 mikro boyutlu parçacıkların Zn-Co elektrodepolama işlemi sırasında elektrokimyasal süreçler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

SONUÇ

Elektrodepolama yöntemiyle üretilen Zn–Co kaplamalara ilişkin literatür, işlem parametreleri ve yapı–özellik ilişkileri çerçevesinde derlenmiştir. İncelenen çalışmalar sonucunda akım yoğunluğu, pH, sıcaklık ve nanoparçacık ilavesi gibi değişkenlerin kaplama üzerine belirleyici rol oynadığı gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında, Zn–Co kaplamalara ilişkin literatür, işlem parametreleri ve kaplama özellikleri genel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kaplama performansının tek bir değişkenden değil, işlem koşullarının bir bütün olarak değerlendirilerek iyileştirmelere bağlı olduğunu göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, çok parametreli optimizasyon yaklaşımlarına ve endüstriyel ölçekli uygulanabilirliğe odaklanması, Zn–Co tabanlı kaplama sistemlerinin kullanım alanlarını daha da genişletecektir.

REFERANSLAR

ASM. (2001). *Introduction to surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM.

Abdul Azis, S. A., Jauhari, I., ve Ahamad, N. W. (2012). Improving surface properties and wear behaviors of duplex stainless steel via pressure carburizing. *Surface and Coatings Technology*, 210, 142–150.

Bajat, J. B., Stanković, S., Jokić, B. M., ve Stevanović, S. I. (2010). Corrosion stability of Zn–Co alloys deposited from baths with high and low Co content: The influence of deposition current density. *Surface and Coatings Technology*, 204, 2745–2753.

Boshkov, N., Tsvetkova, N., Petrov, P., Koleva, D., Petrov, K., Avdeev, G., Tsvetanov, C., Raichevsky, G., ve Raicheff, R. (2008). Corrosion behavior and protective ability of Zn and Zn–Co electrodeposits with embedded polymeric nanoparticles. *Applied Surface Science*, 254, 5618–5625.

Chen, P. Y., ve Sun, I. W. (2001). Electrodeposition of cobalt and zinc cobalt alloys from a Lewis acidic zinc chloride–1-ethyl-3-methylimidazolium chloride molten salt. *Electrochimica Acta*, 46(8), 1169–1177.

Chen, W., Gao, W., ve He, Y. (2010). Electrodeposition of sol-enhanced nanostructured Ni–TiO_2 composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 204, 2487–2492.

Diafi, M., Aidi, A., ve Benhaoua, B. (2020). Study of Zn–Co alloy coatings modified by nano-TiO_2 particles incorporation. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 15(3), 621–628.

Dindar-Safa, B., Mahdavi, S., Etminanfar, M. R., ve Safavi, M. S. (2022). Corrosion behaviour of Zn–Co alloy and multilayered metallic coatings: A comparative insight. *Transactions of the IMF*, 100(2), 103–110.

Eliaz, N., Venkatakrishna, K., ve Chitharanjan Hegde, A. (2010). Electroplating and characterization of Zn–Ni, Zn–Co and Zn–Ni–Co alloys. *Surface and Coatings Technology*, 205, 1969–1978.

Falcon, J. M., ve Aoki, I. V. (2024). Electrodeposition of Zn–Co alloy coatings on carbon steel and their corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 481, 1–12.

Garcia, J. R., do Lago, D. C., Cesar, D. V., ve Senna, L. F. (2016). Pulsed cobalt-rich Zn–Co alloy coatings produced from citrate baths. *Surface and Coatings Technology*, 306, 462–472.

Gharahcheshmeh, M. H., ve Sohi, M. H. (2009). Study of the corrosion behavior of zinc and Zn–Co alloy electrodeposits obtained from alkaline bath using direct current. *Materials Chemistry and Physics*, 117(2–3), 414–421.

Gharahcheshmeh, M. H., ve Sohi, M. H. (2012). Pulse electrodeposition of Zn–Co alloy coatings obtained from an alkaline bath. *Materials Chemistry and Physics*, 133, 1146–1152.

Kanani, N. (2004). *Electroplating: Basic principles, processes and practice*. Elsevier Advanced Technology.

Koleva, D., Boshkov, N., Raichevski, G., ve Veleva, L. (2005). Electrochemical corrosion behaviour and surface morphology of electrodeposited zinc, zinc–cobalt and their composite coatings. *Applied Surface Science*, 83(4), 188–193.

Krishnaveni, K., Sankara Narayanan, T. S. N., ve Seshadri, S. K. (2006). Electrodeposited Ni–B coatings: Formation and evaluation of hardness and wear resistance. *Materials Chemistry and Physics*, 99, 300–308.

Li, X. M., ve Han, Y. (2008). Mechanical properties of Ti($C_{0.7}N_{0.3}$) film produced by plasma electrolytic carbonitriding of Ti6Al4V alloy. *Applied Surface Science*, 254, 6350–6357.

Lima-Neto, P. D., Correia, A. N., Colares, R. P., ve Araujo, W. S. (2007). Corrosion study of electrodeposited Zn and Zn–Co coatings in chloride medium. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(6), 1164–1175.

Maniam, K. K., ve Paul, S. (2021). Corrosion performance of electrodeposited zinc and zinc-alloy coatings in marine environment. *Corrosion and Materials Degradation*, 2(2), 163–189.

Narasimhamurthy, V., ve Shivashankarappa, L. H. (2021). Electrodeposition of Zn–Co alloy from an acid sulphate bath containing triethanolamine and thiamine hydrochloride. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 698–701.

Popoola, A. P. I., Malatji, N., ve Fayomi, O. S. I. (2016). Fabrication and investigation of thermal and wear properties of zinc novel coatings reinforced with nano-Al_2O_3 and Cr_2O_3 particles. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61(3), 1671–1676.

Sajjadnejada, M., Mozafari, A., Omidvar, H., ve Javanbakht, M. (2014). Preparation and corrosion resistance of pulse electrodeposited Zn and Zn–SiC nanocomposite coatings. *Applied Surface Science*, 300, 1–7.

Selvaraju, V., ve Thangaraj, V. (2018). Corrosion properties of mild steel surface modified by bright Zn–Co alloy electrodeposit from acetate electrolytic bath. *Materials Research Express*, 6(2), 026501.

Shakoor, R. A., Kahraman, R., Waware, U. S., Wang, Y., ve Gao, W. (2014). Synthesis and properties of electrodeposited Ni–B–CeO_2 composite coatings. *Materials & Design*, 59, 421–429.

Shetty, K. S., Kumar, P., ve Raghothama, R. (2009). Effect of ion nitriding on the microstructure and properties of maraging steel (250 grade). *Surface and Coatings Technology*, 203, 1530–1536.

Sundaramali, G., Aiyasamy, J. P., Karthikeyan, S., Kandavel, T. K., Arulmurugan, A., Rajkumar, S., Sharma, S., Li, C., Dwivedi, S. P., Kumar, A., Singh, R., ve Eldin, S. M. (2023). Experimental investigations of electrodeposited Zn–Ni, Zn–Co, and Ni–Cr–Co-based novel coatings on AA7075 substrate. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1), 1–19.

Thomas, S., Birbilis, N., Venkatraman, M. S., ve Cole, I. S. (2012). Corrosion of zinc as a function of pH. *Corrosion: The Journal of Science and Engineering*, 68(1), 015009-1.

Tulio, P. C., ve Carlos, I. A. (2009). Effect of SiC and Al_2O_3 particles on the electrodeposition of Zn, Co and ZnCo: II. Electrodeposition in the presence of SiC and Al_2O_3 and production of ZnCo–SiC and ZnCo–Al_2O_3 coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39(8), 1305–1311.

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Kullanılarak Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Seçimi İçin Bir Uygulama

Furkan ZAMAN[1]

Tülay KORKUSUZ POLAT[2]

1- Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü ORCID No: 0000-0001-5854-8827
2- Doç. Dr. Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, korkusuz@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6693-7873

ÖZET

Bu çalışmada elektrikli araç şarj istasyonu kurulacak yerin seçimi, kuracak firmanın seçimi ve simülasyon ile kapasitesinin belirlenmesi uygulaması yapılmıştır. Elektrikli araçlara geçiş sürecinde bazı eksikliklerle karşı karşıyayız. Bunlardan en önemlileri sınırlı menzil ve şarj istasyonlarının altyapı yetersizliği. Bu durumlar dikkate alındığında istasyonun kurulacağı yer çok önemlidir. Bu çalışmada yer seçimiyle ilgili en önemli sayılabilecek kriterler göze alınmış ve bu kriterler SWARA yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Altyapı uygunluğu en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Ardından Sakarya'nın çeşitli 5 ilçesi göz önünde bulundurularak başlangıç matrisindeki değerler ve kriterlerin ağırlıklarına göre EDAS yöntemiyle seçim yapılmıştır. Sonuç olarak Serdivan ilçesinin en uygun olduğu görülmüştür. Firma seçiminde ise yine en önemli sayılabilecek kriterler seçilip bu kriterler de SWARA yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır.4 adet firmayı ele alıp başlangıç değerlerini matrise girdiğimizde VİKOR yöntemiyle firma seçimi yapılıp D firmasının seçilmesi sonucuna varılmıştır. Simülasyon ile kapasitenin belirlenmesi ise 2 ve 3 istasyon kurulması durumu olarak 2 farklı şekilde ele alınmıştır. Rassal şekilde gelen müşteriler ve rassal işlem süreleri varsayılarak performans kriterleri hesaplanmış ve 2 istasyon kurulmasına karar verilmiştir. Tüm bu çözümlerdeki amaç müşterilerin ihtiyacını karşılama, talebi doğru tahmin etme ve müşteriyi ön planda tutup memnuniyetini artırmaktır.

Anahtar Kelimeler – Çok kriterli Karar Verme, Yer Seçimi, Elektrik Şarj İstasyonu, Simülasyon

GİRİŞ

Son yıllarda insan nüfusunun artması ve sanayileşmeyle birlikte gelişme hayatımıza birçok fayda getirirken içten yanmalı motorların kullanımı sırasında açığa çıkan gazlar dünyaya zarar vermektedir. Bu araçlara bağlılığın azalması için elektrikli araçların üretilmesi iyi bir alternatif olarak görülebilir. Elektrikli araçların kullanımının artırılması sadece fosil yakıt tüketimini azaltmaz, aynı zamanda sıfır egzoz gazı emisyonu ile daha temiz bir çevre oluşturur. Elektrikli araçların pazarda daha çok yer edinmesini sınırlayan en önemli etkenlerden biri yeterli şarj altyapısının olmamasıdır. Günümüzde menzillerin gün geçtikçe artırıldığı ve bu konuda çalışmaların devam ettiği düşünülse bile daha çok yaygınlaşma için en uygun yerlere şarj istasyonlarının konumlandırılması gerekmektedir.

Ayrıca kurulan tesislerin hangi kapasitede olacağının da doğru saptanması gerekmektedir.

Petrolün yükselen fiyatı ve çevre sorunları ilerleyen yıllarda Elektrikli araçlara yeniden ilgiye sebep oldu. Bu süre zarfında bazı markalar popüler modellerinden bazılarını elektrikliye çevirdiler. En iyi bilinen elektrikli otomobillerden biri General Motors'un EVI'siydi. Bu araç daha sonradan yüksek üretim maliyetleri nedeniyle üretimden kalktı. (SHOUSHTARI vd.,2024)

Elektrikli araçların kullanım oranı ve talep yoğunluğuna göre şarj istasyonlarının yeri belirlenmelidir. Bu yerler belirlenirken çeşitli kriterler göz önünde bulundurularak ve optimizasyon sistemleri kullanarak nihai sonuca ulaşılmalıdır. (CHUNG vd., 2015)

Şarj olma süreleri hafta içi ve hafta sonu oluşan talep bunların zaman dilimleri dikkate alınarak şarj cihazlarının kapasitesinin simülasyon yöntemiyle ayarlanması sağlanmıştır. Veriler Finlandiya'daki bir bölgeden alınıp sonuçların %95 güven aralığında olduğu kanıtlandı. (KOCAMAN, 2017)

Şarj talebi, yol yapısı, kurulum ve işletme maliyetleri gibi birçok kriter dikkate alınarak toplam maliyeti minimize etmek için istasyon sayısı konumu ve kapasitesini belirleyen bir model oluşturulmuştur. Ve İsviçre'nin bir şehrinde uygulamışlardır (KOCAMAN ,2017)

Şarj istasyonları belirli sertifikalara ve yasalara uygun olmalı. Bu yüzden sektörde kendini kanıtlamış firmalardan biri tercih edilmelidir. Bu konu üzerinde firma seçimi için nelere dikkat edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir.

Kapasite planlaması yapılırken cihazların enerji ihtiyacı da göz önünde bulundurulmalıdır. Araçlar büyük miktarda elektrik çeker ve bu istasyonların verimliliği ve dengesi çok önemlidir. Bu çalışmada istasyonların enerji yönetimi ve kapasite planlaması için optimizasyon sistemleri ele alınmıştır.;

Çok kriterli karar verme yöntemleri literatürde farklı problemlerin çözümlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerdir (YILMAZ YALÇINER ve ÇAYLAK, 2020; ÖVER ÖZÇELİK vd., 2025; ÇLİK ve ARSLANKAYA, 2023)

SWARA, karmaşık problemlerde, çok sayıda kriteri dikkate alarak sistematik bir şekilde karar almamızı sağlayan etkili bir yöntemdir. Bu yöntem yer seçiminde ve istasyonu kuracak firma seçiminde kriterlerin ağırlıklandırılmasında kullanılacaktır. Önce kriterlerin uzman görüşüyle önem sırasına koyulması istenir. Formüllerden önem vektörleri hesaplanıp nihai ağırlıklar bulunur. (STANUJKIĆ vd., 2021)

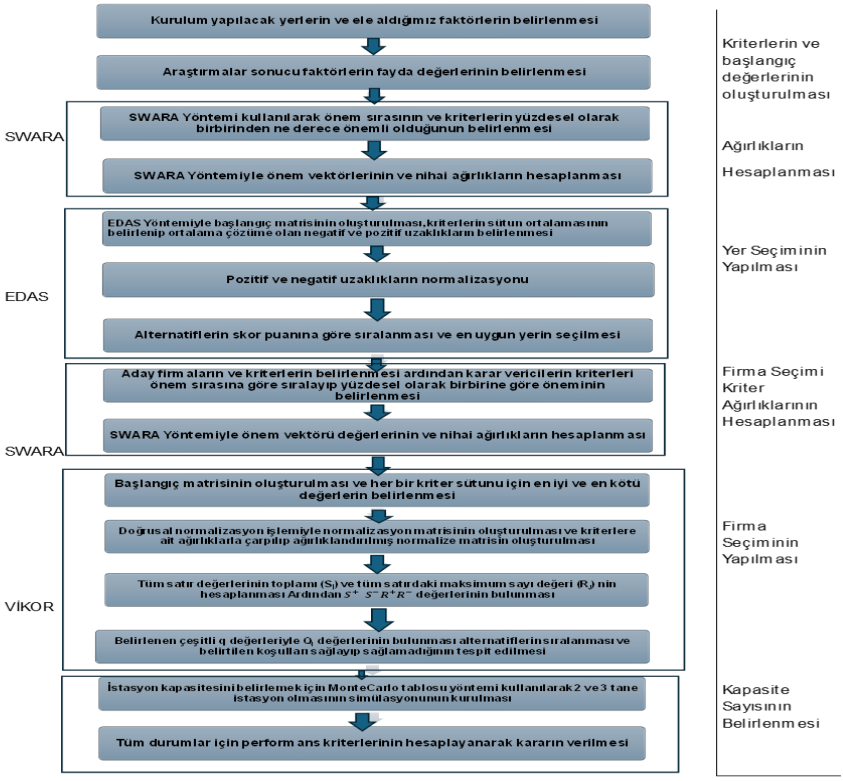
EDAS, karar vericilerin alternatifleri değerlendirmesinde ve her alternatifin ne kadar iyi olduğunu belirlemede kullanılan çok kriterli karar verme yöntemdir. EDAS, karar verme sürecinde alternatiflerin ortalama çözüme olan uzaklıklarına göre sıralama yapar. Bu yöntem SWARA ile

ağırlıklandırılmış kriterlerin gerekli hesaplamalar ve formüllerden sonra tercih sırasına göre dizilmesini sağlar ve skoru en yüksek olan bizim için en iyi alternatif olacaktır. (ÖZBEK vd., 2018)

VIKOR YÖNTEMİ: Karmaşık sistemlerde yani birbiriyle çelişebilen kriterlerden oluşan problemlerde çok kriterli bir karar verme yöntemi olarak Opricovic tarafından bulunmuştur. Yöntemin temelinde uzlaşık çözümün tespit edilmesi vardır. Bu uzlaşık çözüm ideale en yakın tercih olarak kabul edilebilir. (ÖZDEN vd., 2012)

UYGULAMA

Bu çalışmada ele alınan problem Sakarya ilinde bir ilçeye kurulacak olan elektrikli araç istasyonu için en uygun yerin seçimi, istasyonun kurulum ve işletme maliyetini minimize edecek şekilde hangi firmanın hangi kapasitede istasyon kuracağının belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu problemin çözümünde izlenecek adımlar aşağıdaki Şekil 1'deki iş akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 1. İş Akış Şeması

Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yer Seçimi

Şarj istasyonlarının yer seçimi altyapının verimli çalışması için önem arz etmektedir. Uygun yer belirlenir ve bu sayede vatandaşlara verilen hizmet kalitesi artar. Bu çalışmada yer seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır.

-Altyapı uygunluğu

-Kurulum Maliyeti

-Başka bir istasyona olan uzaklık

-İleriki zamanlarda genişleme potansiyeli

-Hedef Pazar yoğunluğu (Nüfus)

Yer seçiminde ise kriterlerin ağırlıklandırılması SWARA yöntemiyle belirlenip bu alternatiflerin değerlendirilmesinde EDAS yöntemi kullanılacaktır.

SWARA yöntemi

SWARA yöntemi kullanılarak uzmanların görüşüyle kriterlerin önem sırasına koyulması ve bir üstteki kriterin bir alttaki kriterden yüzdesel olarak ne kadar önemli olduğunun belirlenmesi (Sj değeri) Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Karar Vericilerin Kriter Önem Sıralaması ve Önem Yüzdelerini Belirlemesi

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Altyapı uygunluğu	1	-			
K2-Hedef Pazar yoğunluğu	2	0,15			
K3-Başka istasyona olan uzaklık	3	0,05			
K4-Kurulum maliyeti	4	0,3			
K5-ilerki zamanlarda genişleme potansiyeli	5	0,1			

Bu aşamada karar vericilerin kendi görüşleri esas alınarak kriterler önem sırasına koyulur. Buradaki Sj değerleri üstteki kriterin alttaki kriterden yüzdesel olarak ne kadar önemli olduğunu belirtir. Bu kararları da uzmanlar vermektedir. Örneğin K2 kriteri K3 kriterinden %15 daha önemlidir.

kj değeri : Sj + 1

qj değeri : önem vektörü ağırlıkları

kj ve qj değerleri eşitlik (1) ve eşitlik (2) deki formüllere göre hesaplanmaktadır. Bu sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. (KORKUSUZ POLAT ve PAMUK CANDAN, 2024)

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$q_j = \begin{cases} 1, j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Tablo 2. Önem Vektörü Değerleri

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Altyapı uygunluğu	1	-	1	1	
K2-Hedef Pazar yoğunluğu	2	0,15	1,15	0,87	
K3-Başka istasyona olan uzaklık	3	0,05	1,05	0,828	
K4-Kurulum maliyeti	4	0,3	1,3	0,636	
K5-ilerki zamanlarda genişleme potansiyeli	5	0,1	1,1	0,578	

Bu kısımda sj değerlerine +1 eklenerek kj değerleri bulunmuştur. Ardından formüllerle önem vektörü değerleri hesaplanmıştır.

wj: Kriterlerin nihai ağırlıkları

wj değeri eşitlik (3) teki formül kullanılarak hesaplanmış bu sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir.(KORKUSUZ POLAT ve PAMUK CANDAN, 2024)

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^{n} q_k} \quad (3)$$

Tablo 3. Nihai ağırlıkların Değeri

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Altyapı uygunluğu	1	-	1	1	0,255
K2-Hedef Pazar yoğunluğu	2	0,15	1,15	0,87	0,223
K3-Başka istasyona olan uzaklık	3	0,05	1,05	0,828	0,212
K4-Kurulum maliyeti	4	0,3	1,3	0,636	0,163
K5-ilerki zamanlarda genişleme potansiyeli	5	0,1	1,1	0,578	0,147

Bu aşama SWARA'nın son aşaması olup kriterlerin nihai ağırlıkları belirlenmiştir. Örneğin K1 kriterinin ağırlığı=0,255.

EDAS Yöntemi

Karar matrisinin oluşturulması ve her bir karar değişkeni sütununun ortalamasının alınması Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Başlangıç Matrisi ve Kriterler İçin Ortalama Çözüm Değerleri

	max	max	max	min	max
Yerler / Kriterler	K1 (0,255)	K2 (0,223)	K3 (0,212)	K4 (0,163)	K5 (0,147)
SAPANCA	70	55	30	32000	6
SERDİVAN	90	120	70	20000	8
ARİFİYE	55	65	45	40000	3
KARASU	60	90	50	35000	5
ADAPAZARI	80	280	15	30000	7
ORTALAMA DEĞERLER	71	122	42	31400	6

Bu aşamada başlangıç değerleri girilerek karar matrisinin değerleri oluşturulmuştur. SWARA yönteminden bulunan ağırlık değerleri de parantez içinde belirtilmiştir. K4 kriteri maliyet yönlü olduğu için minimum olması, diğer kriterler fayda yönlü olduğu için maksimum olması amaçlanmaktadır. Bunlar en üst satırda min, max kısaltmalarıyla gösterilmiştir. Ayrıca tüm kriter sütunlarının ayrı ayrı ortalaması alınmıştır.

PDA: Alternatiflerin ortalama çözüme olan pozitif uzaklıkları

SP: Pozitif uzaklıkların kriter ağırlıklarıyla çarpıldıktan sonraki tüm satır değerlerinin toplanması

PDA değeri kriterlerin maksimum ya da minimum olmasına göre eşitlik (4) ve eşitlik (5) teki formüllere göre hesaplanmıştır. Ve ardından SP değeri eşitlik (6) daki formül kullanılarak bulunmuştur. Tüm bu elde edilen değerler Tablo 5'te gösterilmiştir. (STANUJKIĆ vd., 2021)

$$PDA_{ij} = \frac{\max\left[0,(X_{ij} - ORT_j)\right)}{ORT_j} \qquad \text{max} \qquad (4)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max\left[0,(ORT_j - X_{ij})\right)}{ORT_j} \qquad \text{min} \qquad (5)$$

$$SP_i = \sum_{j=1}^{m} w_j . PDA_{ij} \qquad (6)$$

Tablo 5. Ortalamadan Pozitif Uzaklık Matrisi

	max	max	max	min	max	
Yerler / Kriterler ⇩ ⇨	K1 (0,255)	K2 (0,223)	K3 (0,212)	K4 (0,163)	K5 (0,147)	SP
SAPANCA	0	0	0	0	0,16	0,023
SERDİVAN	0,267	0	0,66	0,363	0,33	0,315
ARİFİYE	0	0	0,07	0	0	0,014
KARASU	0	0	0,19	0	0	0,04
ADAPAZARI	0,126	1,295	0	0,044	0,16	0,35

Bu aşamada alternatiflerin ortalama çözüme pozitif uzaklıkları formülle bulunup ilgili satır ve sütuna yazıldıktan sonra her bir kriterin ağırlıklarıyla çarpılıp matrise yazılmıştır. İ ve j değerleri matristeki satır ve sütunu belirtir. Ayrıca kriterlerin maksimum veya minimum olması ayrı ayrı formüllerde gösterilmiştir. Ağırlıklarla çarpıldıktan sonra her bir satırdaki değerlerin toplamı (SP) değeri olarak belirtilmiştir.

NDA: Alternatiflerin ortalama çözüme olan negatif uzaklıkları

SN: Negatif uzaklıkların kriter ağırlıklarıyla çarpıldıktan sonraki tüm satır değerlerinin toplanması

NDA değeri kriterlerin maksimum veya minimum olma durumuna göre eşitlik (7) ve eşitlik (8) deki formüllerle hesaplanmıştır. Ve ardından (SN) değeri eşitlik (9) daki formülü kullanarak bulunmuştur. Tüm bu aşamaların sonuçları Tablo 6'da gösterilmiştir. (STANUJKIĆ vd., 2021)

$$NDA_{ij} = \frac{\max\left[0,(X_{ij} - ORT_j)\right)}{ORT_j} \qquad \text{min} \qquad (7)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max\left[0,(ORT_j - X_{ij})\right)}{ORT_j} \qquad \text{max} \qquad (8)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^{m} w_j . NDA_{ij} \qquad (9)$$

Tablo 6. Ortalamadan Negatif Uzaklık Matrisi

	max	max	max	min	max	
Yerler / Kriterler ⇩ ⇨	K1 (0,255)	K2 (0,223)	K3 (0,212)	K4 (0,163)	K5 (0,147)	SN
SAPANCA	0,014	0,55	0,285	0,019	0	0,188
SERDİVAN	0	0,016	0	0	0	0,003
ARİFİYE	0,225	0,467	0	0,273	0,5	0,278
KARASU	0,155	0,262	0	0,114	0,166	0,139
ADAPAZARI	0	0		0	0	0,136

Bu aşamada alternatiflerin ortalama çözüme negatif uzaklıkları formülle bulunup ilgili satır ve sütuna yazıldıktan sonra her bir kriterin ağırlıklarıyla çarpılıp matrise yazılmıştır. İ ve j değerleri matristeki satır ve sütunu belirtir. Ayrıca kriterlerin maksimum veya minimum olması ayrı ayrı formüllerde gösterilmiştir. Ağırlıklarla çarpıldıktan sonra her bir satırdaki değerlerin toplamı (SN) değeri olarak belirtilmiştir.

NSP: Normalize edilmiş pozitif ağırlıklar toplamı

NSN: Normalize edilmiş negatif ağırlıklar toplamı

NSP ve NSN değerleri eşitlik (10) ve eşitlik (11) deki formüller kullanarak bulunmuştur ve Tablo 7'de gösterilmiştir. (STANUJKIĆ vd., 2021)

$$NSP_i = \frac{SP_i}{max_i(SP_i)} \quad (10)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{max_i(SN_i)} \quad (11)$$

TABLO 7. Normalize Edilmiş Ağırlıklı Toplam Değerleri

	SP	NSP		SN	NSN
	0,023	0,065		0,188	0,323
	0,315	0,9		0,003	0,989
	0,014	0,04		0,278	0
	0,04	0,114		0,139	0,5
	0,35	1		0,136	0,51
MAX DEĞER	0,35		MAX DEĞER	0,278	

Bu kısımda SP satırlarının max değeri her bir satırdaki SP değerlerine göre bölünerek ağırlıklı toplam değerleri normalize hale gelmiştir.

Değerlendirme Skoru: NSP ve NSN değerlerinin ortalaması

Her bir kriter için eşitlik (12) deki formül kullanılarak değerlendirme skoru hesaplanmıştır ve alternatiflerin sıralanması Tablo 8'de gösterilmiştir. (STANUJKIĆ vd., 2021)

$$\frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \qquad (12)$$

Tablo 8. Alternatiflerin Değerlendirme Skoru

	Değerlendirme Skoru (NSP+NSN\2)	Sıralama
SAPANCA	0,194	4
SERDİVAN	0,9445	1
ARİFİYE	0,02	5
KARASU	0,307	3
ADAPAZARI	0,755	2

Bu kısımda skor puanları hesaplanmış olup en yüksek skor puanı olan en iyi alternatif olacak şekilde sıralama yapılmıştır.

Firma Seçimi

Doğru firma seçimi, altyapının kurulup düzgün bir biçimde işletilmesi için önem arz eder. Bu firmalar hem kaliteyi hem de hizmet sürekliliğini sağlayacaktır. Herhangi bir problemde en kısa zamanda destek ekibiyle sorunun çözülmesi hedeflenir. Firma seçiminde dikkate alacağımız kriterler de aşağıdaki gibidir.

-Fiyat

-Güvenilirlik ve İtibar

-İletişim ve Destek

-Teknik Yetenek ve Yenilikçilik

-Kalite

Firma seçiminde ise kriterlerin ağırlıklandırılması için SWARA yöntemi kullanılacaktır. Bu ağırlıklandırılmış kriter ve alternatifler arasından yapılacak seçimde VIKOR yöntemi kullanılacaktır.

Bu sayede verilen kararın en uygun alternatif olacağı beklenir.

SWARA Yöntemi

SWARA yöntemi kullanılarak uzmanların görüşüyle kriterlerin önem sırasına koyulması ve bir üstteki kriterin bir alttaki kriterden yüzdesel olarak ne kadar önemli olduğunun belirlenmesi (Sj değeri) Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Karar Vericilerin Kriter Önem Sıralaması ve Önem Yüzdelerini Belirlemesi

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Fiyat	1	-			
K2-Kalite	2	0,25			
K3-Güvenilirlik ve itibar	3	0,3			
K4-İletişim ve destek	4	0,2			
K5-Teknik yetenek ve yenilikçilik	5	0,05			

Bu aşamada karar vericilerin kendi görüşleri esas alınarak kriterler önem sırasına koyulur. Buradaki Sj değerleri üstteki kriterin alttaki kriterden yüzdesel olarak ne kadar önemli olduğunu belirtir. Bu kararları da uzmanlar vermektedir. Örneğin K3 kriteri K4 kriterinden %30 daha önemlidir.

kj değeri : sj + 1

qj değeri : önem vektörü ağırlıkları

kj ve qj değerleri eşitlik (13) ve eşitlik (14) teki formüllere göre hesaplanmaktadır. Bu sonuçlar Tablo 10'da gösterilmiştir. (KORKUSUZ POLAT ve PAMUK CANDAN, 2024)

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$q_j = \begin{cases} 1, j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, j > 1 \end{cases} \quad (14)$$

Tablo 10. Önem Vektörü Ağırlıklarının Hesaplanması

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Fiyat	1	-	1	1	
K2-Kalite	2	0,25	1,25	0,8	
K3-Güvenilirlik ve itibar	3	0,3	1,3	0,615	
K4-İletişim ve destek	4	0,2	1,2	0,512	
K5-Teknik yetenek ve yenilikçilik	5	0,05	1,05	0,487	

Bu kısımda sj değerlerine +1 eklenerek kj değerleri bulunmuştur. Ardından formüllerle önem vektörü değerleri hesaplanmıştır.

wj : Kriterlerin nihai ağırlıkları

wj değeri eşitlik (15) teki formül kullanılarak hesaplanmış bu sonuçlar Tablo 11'de gösterilmiştir. (KORKUSUZ POLAT ve PAMUK CANDAN, 2024)

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^{n} q_k} \quad (15)$$

Tablo 11. Nihai Ağırlıklar Tablosu

Kriterler	Önem sırası	s_j	k_j	q_j	w_j
K1-Fiyat	1	-	1	1	0,29
K2-Kalite	2	0,25	1,25	0,8	0,24
K3-Güvenilirlik ve itibar	3	0,3	1,3	0,615	0,18
K4-İletişim ve destek	4	0,2	1,2	0,512	0,15
K5-Teknik yetenek ve yenilikçilik	5	0,05	1,05	0,487	0,14

Bu aşama SWARA' nın son aşaması olup kriterlerin nihai ağırlıkları belirlenmiştir. Örneğin K2 Kriterinin ağırlığı 0,24.

VIKOR Yöntemi

(X_j^+): O sütundaki en iyi değerimiz

(X_j^-): O sütundaki en kötü değerimiz

Belirlediğimiz değerlerin matrise yerleştirilmesi yapılmıştır ve her bir kriter sütunu için en iyi (X_j^+) en kötü (X_j^-) değerleri belirlenip bu işlemler Tablo 12'de gösterilmiştir.

Tablo 12. Başlangıç Değerleri ve En İyi En Kötü Değerler

	min	max	max	max	max
Firmalar / Kriterler ⇩ ⇨	K1 (0,29)	K2 (0,24)	K3 (0,18)	K4 (0,15)	K5 (0,14)
A FİRMASI	20000	60	4	400	20
B FİRMASI	30000	70	5	200	15
C FİRMASI	25000	50	8	300	30
D FİRMASI	15000	90	7	700	5
EN İYİ DEĞER (X_j^+)	15000	90	8	700	30
EN KÖTÜ DEĞER (X_j^-)	30000	50	4	200	5

Bu aşamada kriterlerin değerleri matrise yazılmıştır. K1 kriteri maliyet yönlü olduğu için minimum olması amaçlanırken diğer kriterler fayda yönlü olduğu için maksimum olması amaçlanmıştır. Ardından her sütun için en iyi değer ve en kötü değer bulunup tabloya eklenmiştir.

Rij: Normalizasyon yapılan satır ve sütun indis değeri

Doğrusal normalizasyon işlemiyle eşitlik (16) ve eşitlik (17) deki formüller kullanılarak normalizasyon matrisinin oluşturulması Tablo 13'te gösterilmiştir. (ÖZDEN vd., 2012)

$$r_{ij} = \frac{(x_{i_j} - x_j^-)}{(x_j^+ - x_j^-)} \qquad \max \qquad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{(x_j^+ - x_{i_j})}{(x_j^+ - x_j^-)} \qquad \min \qquad (17)$$

Tablo 13. Doğrusal Normalizasyon Matrisi

	min	max	max	max	max
Firmalar / Kriterler ⇩ ⇨	K1 (0,29)	K2 (0,24)	K3 (0,18)	K4 (0,15)	K5 (0,14)
A FİRMASI	0,33	0,75	1	0,6	0,4
B FİRMASI	1	0,5	0,75	1	0,6
C FİRMASI	0,66	1	0	0,8	0
D FİRMASI	0	0	0,25	0	1

Bu aşamada r değeri normalize matrisi ifade eder. Xij değerleri ise ilgili satır ve sütunun değerini belirtir. Kriterlerin maksimum veya minimum yönlü olmasına göre formüller farklılık göstermiştir.

Sİ: Tüm satırların toplam değeri

Ri: O satırda bulunan değerlerin maksimum olan değeri

Bu oluşturduğumuz normalize matris eşitlik (18) deki formülle tekrar doldurulup yeni ağırlıklandırılmış normalize matrisin oluşturulmuştur ve (Si) değeri eşitlik (19) daki formülle bulundu. (Ri) değeri ise eşitlik (20) deki formülle bulunup bu işlemler Tablo 14'te gösterilmiştir. (ÖZDEN vd., 2012)

$$V_{ij} = r_{ij} \cdot w_j \tag{18}$$

$$S_i = \sum_{j}^{\Pi} \frac{w_j\left(x_j^+ - x_{ij}\right)}{\left(x_j^+ - x_j^-\right)} \tag{19}$$

$$R_j = max_j \left[\frac{w_j\left(x_j^+ - x_{ij}\right)}{\left(x_j^+ - x_j^-\right)}\right] \tag{20}$$

Tablo 14. Ağırlıklandırılmış Doğrusal Normalizasyon Matrisi

	min	max	max	max	max		
Firmalar / Kriterler ⇒ / ⇓	K1 (0,29)	K2 (0,24)	K3 (0,18)	K4 (0,15)	K5 (0,14)	S_i	R_j
A FİRMASI	0,095	0,18	0,18	0,09	0,056	0,6	0,18
B FİRMASI	0,29	0,12	0,135	0,15	0,08	0,77	0,29
C FİRMASI	0,191	0,24	0	0,12	0	0,55	0,24
D FİRMASI	0	0	0,045	0	0,14	0,18	0,14

Bu kısımda daha önceki normalizasyon matrisimiz kriterlerin ağırlıklarıyla çarpılıp ağırlıklandırılmış normalize matris oluşturulmuştur. Ve bu satırdaki değerlerin toplamı Si o satırdaki değerlerin maksimumu (Rj) değerleri bulunup matrise yazılmıştır.

S^+\ : Si sütunundaki en minimum değer

S^-: Si sütunundaki en maksimum değer

R^+: Rj sütunundaki en minimum değer

R^-: Rj sütunundaki en maksimum değer

Bu kısımda S^+ ve\ R^+ değerleri sırasıyla eşitlik (21) ve eşitlik (22) deki formüllerle bulunmuştur. (S^+) (R^+) $(S^-)(R^-)$ değerleri de sırasıyla eşitlik (23) ve eşitlik (24) teki formüllerle bulunup bu değerler Tablo 15'te gösterilmiştir. (ÖZDEN vd., 2012)

$$S^+ = min(S_i) \quad (21)$$

$$R^+ = min(R_i) \quad (22)$$

$$S^- = max(S_i) \quad (23)$$

$$R^- = max(R_i) \quad (24)$$

Tablo 15. S_i R_j Değerleriyle (S^+) (R^+) $(S^-)(R^-)$ Değerlerinin Bulunması

	S_i	R_j	
	0,6	0,18	
	0,77	0,29	
	0,55	0,24	
	0,18	0,14	
S*(min değer)	0,18	0,14	R*(min değer)
S- (maks değer)	0,77	0,29	R-(maks değer)

q: Grup faydasını maksimum yapan strateji ağırlığı

Çeşitli q değerleri seçerek eşitlik (25) deki formülle (Q_i)değerlerinin hesaplanması Tablo 16'da gösterilmiştir. (ÖZDEN vd., 2012)

$$Q_i = q\frac{(S_i - S^+)}{S^- - S^+} + \frac{(1-q)(R_i - R^+)}{R^- - R^+} \quad (25)$$

Tablo 16. Qi Değerlerinin Hesaplanması

	S_i	R_j	q=0 için Q_i	q=0.5 için Q_i	q=1 için Q_i
A FİRMASI	0,6	0,18	0,26	0,49	0,71
B FİRMASI	0,77	0,29	1	1	1
C FİRMASI	0,55	0,24	0,66	0,65	0,62
D FİRMASI	0,18	0,14	0	0	0

Bu aşamada grup faydasını maksimum yapan strateji için ağırlığı ifade eden "q" ve karşıt görüştekilerin minimum pişmanlığının ağırlığını ifade eden "1-q" uzlaşma değerleri kullanılmaktadır. Burada q değeri kriterlerin

çoğunluğunun ağırlığını (maksimum grup faydasını) göstermektedir. Başka bir deyişle q değeri maksimum grup faydasını sağlayan strateji için ağırlığı ifade ederken, (1-q) karşıt görüştekilerin minimum pişmanlığının ağırlığını ifade etmektedir uzlaşma, "çoğunluk oyu" (q > 0,5) ile, "konsensus" (q = 0,5) ile veya "veto" (q < 0,5) ile sağlanabilir. Burada q için sırasıyla (0-0.5-1) değerleri seçilip Q değerleri hesaplanmıştır.

DQ: Toplam alternatif sayısının 1 eksiğinin 1'e bölünmesi

Q(A2): İlgili Q değerinde alternatiflerin sıralanmasındaki 2.değer

Q(A1): İlgili Q değerinde alternatiflerin sıralanmasındaki 1.değer

Çeşitli q değerlerine sahip sütunlar en küçük en iyi olacak şekilde sıralanmış olup koşul 1 eşitlik (26) daki formüle göre sağlanıp sağlanmadığı, koşul 2'nin de eşitlik (27) deki açıklamaya uyup uymadığı değerlendirilerek hesaplanması adet koşul sağlanıp sağlanmadığının denetlenmiştir. Ayrıca DQ değeri eşitlik (28) daki formülle bulunmuştur. Bu değerler Tablo 17'de gösterilmiştir. (ÖZDEN vd., 2012)

$$Q(A2)-Q(A1)>=DQ \quad (26)$$

En iyi Q değerine sahip alternatif S ve R değerinin en az 1 tanesinde en iyi sonucu gerçekleştirmiş olmalıdır. (27)

$$DQ=1/\ (\text{alternatif sayısı}-1) \quad (28)$$

Tablo 17. Alternatiflerin Sıralanması ve Koşulların Denetlenmesi

S_i	R_i	Alternatifler	Q_i (q=0)		Q_i (q=0.5)		Q_i (q=1)	
0,6	0,18	A FİRMASI	2	0,26	2	0,49	3	0,71
0,77	0,29	B FİRMASI	4	1	4	1	4	1
0,55	0,24	C FİRMASI	3	0,66	3	0,65	2	0,62
0,18	0,14	D FİRMASI	1	0	1	0	1	0
		KOŞUL 1	SAĞLAMADI		SAĞLADI		SAĞLADI	
		KOŞUL 2	SAĞLADI		SAĞLADI		SAĞLADI	

Q değerlerine göre alternatifler en küçük en iyi olacak şekilde sıralanmıştır. Örneğin D firması tüm Q ilerde 0 değerini alarak 1.seçenek olmuştur. Yukarıdaki formüllere göre koşul 1 ve koşul 2'nin sağlanıp sağlanmadığı tabloda gösterilmiştir. Buradaki D firması q=0 ve q=0.5 değerleri için karar vericiler için en uygun seçenek olmuştur.

İstasyonların Kapasitesinin Belirlenmesi

Şarj istasyonlarının kapasitesinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Aynı anda kaç aracın şarj olabileceği ve müşterilerin talep yoğunluğu, gelişler arası süre, kuyrukta bekleme süreleri, gibi faktörlerden dolayı tesisin maksimum verimde çalışması gerekmektedir. Kapasite belirlemede ise SİMÜLASYON yönteminden yararlanılacaktır. Bu sayede müşterilerin kuyrukta bekleme süresi, tesisin doluluk oranı gibi performans kriterleri belirlenip buna göre seçim yapılacaktır.

Bu kısımda 2 adet istasyonun kurulması Monte Carlo tablosu kullanılarak simüle edilmiş olup Ek 1'deki fotoğrafta gösterilmiştir. 15 kişi için çalıştırılan sistemde müşteri gelişler arası süre ve kullanılan rassal sayılar Tablo 17'de gösterilmiştir. İşlem süreleri 30-60 dk arasında normal dağılıp eşitlik (29) daki formülle hesaplanmıştır. Kullanılan işlem süreleri ve rassal değerler Tablo 18'de gösterilmiştir. (ŞAHİN, 2007)

Tablo 17. Gelişler Arası Süreler Tablosu

GELİŞLER ARASI SÜRE					
	10dk	20dk	30dk	40dk	
	25%	35%	20%	20%	
Kullanılan Rassal Sayılar	0,22	0,13	0,5	0,32	0,57
	0,83	0,78	0,1	0,43	0,65
	0,91	0,72	0,55	0,86	0,62

Tablo 18. Müşteri İşlem Süreleri Tablosu

Kullanılan Rassal Sayılar	0,92	0,37	0,64	0,14	0,47
	0,56	0,95	0,68	0,25	0,72
	0,76	0,57	0,15	0,22	0,32
İşlem Süreleri	58dk	41dk	49dk	34dk	44dk
	47dk	59dk	51dk	38dk	52dk
	53dk	47dk	35dk	37dk	40dk

$$X= a+(b-a)RS \quad (29)$$

Ek.1 2 İstasyonlu Monte Carlo Simülasyon Tablosu

Zaman	Gelen	Biten	Bekleyen	1.istasyon işlem gören	1.istasyon bitiş	2.istasyon işlem gören	2.istasyon işlem bitiş	1.istasyon boşta kalma süresi	2.istasyon boşta kalma süresi	kuyruk uzunluğu	Müşteri bekleme süresi
08:00	1	.	.	1	08:58	.	.	.	.	.	.
08:10	2	.	.	1	08:58	2	08:51	.	10dk	.	.
08:20	3	.	3	1	08:58	2	08:51	.	.	1	.
08:40	4	.	3,4	1	08:58	2	08:51	.	.	2	3(20dk)
08:51	.	2	4	1	08:58	3	09:40	.	.	1	3(11dk),4(11dk)
08:58	.	1	.	4	09:32	3	09:40	.	.	.	4(7dk)
09:00	5	.	5	4	09:32	3	09:40	.	.	1	.
09:32	.	4	.	5	10:16	3	09:40	.	.	.	5(32dk)
09:40	6	3	.	5	10:16	6	10:27	.	.	.	.
10:10	7	.	7	5	10:16	6	10:27	.	.	1	.
10:16	.	5	.	7	11:15	6	10:27	.	.	.	7(6dk)
10:20	8	.	8	7	11:15	6	10:27	.	.	1	
10:27	.	6	.	7	11:15	8	11:18	.	.	.	8(7dk)
10:40	9	.	9	7	11:15	8	11:18	.	.	1	
11:10	10	.	9ve10	7	11:15	8	11:18	.	.	2	9(30dk)
11:15	.	7	10	9	11:53	8	11:18	.	.	1	9(5dk),10(5dk)
11:18	.	8	.	9	11:53	10	12:10	.	.	.	10(3dk)
11:50	11	.	11	9	11:53	10	12:10	.	.	1	.
11:53	.	9	.	11	12:46	10	12:10	.	.	.	11(3dk)
12:10	.	10	.	11	12:46	.	.	.	.	.	.
12:20	12	.	.	11	12:46	12	13:07		10dk	.	.
12:40	13	.	13	11	12:46	12	13:07	.	.	1	
12:46	.	11	.	13	13:21	12	13:07	.	.	.	13(6dk)
13:07	.	12	.	13	13:21	.	.	.	.	.	.
13:20	14	.	.	13	13:21	14	13:57	.	13dk	.	.
13:21	.	13	.	.	.	14	13:57	.	.	.	.
13:50	15	.	.	15	14:30	14	13:57	29dk	.	.	.
13:57	.	14	.	15	14:30	.	.	.	.	.	.
14:30	.	15	.	.	.	.	.	.	33dk	.	.

Burada Tablo 17 ve Tablo 18'de verilen müşterilerin geliş süresi ve işlem süreleri dikkate alınarak sistem simüle edilmiştir. Başlangıç saati 08.00 alınmıştır. Tablo 17 ve Tablo 18'deki bilgiler kullanılarak bu sefer sistemde 3 istasyon olduğu varsayılmış olup Ek 2'deki fotoğrafta gösterilmiştir. Performans kriterleri buna göre de hesaplanacaktır.

Ek 2. 3 İstasyonlu Monte Carlo Simülasyon Tablosu

Zaman	Gelen	Biten	Bekleyen	1.İstasyon işlem gören	1.istasyon işlem bitiş	2.İstasyon işlem gören	2.İstasyon işlem bitiş	3.İstasyon işlem gören	3.istasyon işlem bitiş	1.istasyon boşta kalma süresi	2.istasyon boşta kalma süresi	3.istasyon boşta kalma süresi	kuyruk uzunluğu	Müşteri bekleme süresi
08:00	1	.	.	1	08:58	.	.	.	.	.	.	.	.	.
08:10	2	.	.	1	08:58	2	08:51	.	.	.	10dk	10dk	.	.
08:20	3	.	.	1	08:58	2	08:51	3	09:09	.	.	10dk	.	.
08:40	4	.	4	1	08:58	2	08:51	3	09:09	.	.	.	1	.
08:51	.	2	.	1	08:58	4	09:25	3	09:09	.	.	.	.	4(11dk)
08:58	.	1	.	.	.	4	09:25	3	09:09	.	.	.	.	.
09:00	5	.	.	5	09:44	4	09:25	3	09:09	2dk	.	.	.	.
09:09	.	3	.	5	09:44	4	09:25	.	.	.	.	.	.	.
09:25	.	4	.	5	09:44	.	.	.	.	.	.	16dk	.	.
09:40	6	.	.	5	09:44	6	10:27	.	.	.	15dk	15dk	.	.
09:44	.	5	.	.	.	6	10:27	.	.	.	.	4dk	.	.
10:10	7	.	.	7	11:09	6	10:27	.	.	26dk		26dk	.	.
10:20	8	.	.	7	11:09	6	10:27	8	11:11	.	.	10dk	.	.
10:27	.	6	.	7	11:09	.	.	8	11:11	.	.	.	.	.
10:40	9	.	.	7	11:09	9	11:18	8	11:11	.	13dk	.	.	.
11:09	.	7	.	.	.	9	11:18	8	11:11	.	.	.	.	.
11:10	10	.	.	10	12:02	9	11:18	8	11:11	1dk	.	...	.	.
11:11	.	8	.	10	12:02	9	11:18	.	.	.	.	.	.	.
11:18	.	9	.	10	12:02	.	.	.	.	.	.	7dk	.	.
11:50	11	.	.	10	12:02	11	12:43	.	.	.	32dk	32dk	.	.
12:02	.	10	.	.	.	11	12:43	.	.	.	.	12dk		
12:20	12	.	.	12	13:07	11	12:43	.	.	18dk	.	18dk		
12:40	13	.	.	12	13:07	11	12:43	13	13:15	.	.	20dk		
12:43	.	11	.	12	13:07	.	.	13	13:15	.	.	.	.	.
13:07	.	12	.	.	.	.	.	13	13:15	.	24dk	.	.	.
13:15	.	13	.	.	.	.	.	.	.	8dk	8dk	.	.	.
13:20	14	.	.	14	13:57	.	.	.	.	5dk	5dk	5dk	.	.
13:50	15	.	.	14	13:57	15	14:30	.	.	.	30dk	30dk	.	.
13:57	.	14	.	.	.	15	14:30	.	.	.	.	7dk		
14:30	.	15	.	.	.	.	.	.	.	33dk	.	33dk	.	.

Burada da aynı geliş süreleri ve işlem süreleri kullanılarak 3 istasyon olduğundaki veriler bulunmuş ve performans kriterleri buna göre hesaplanacaktır.

Sistemlerin performans kriterleri ve karşılaştırmaları hesaplanmıştır. Ortalama bekleme süresi eşitlik (30), ortalama kuyruk uzunluğu eşitlik (31), istasyon kullanım oranı eşitlik (32) deki formüller kullanılarak bulunmuş olup bu değerler Tablo 19 da gösterilmiştir. (ŞAHİN, 2007)

Kullanım Oranı = Servisin Dolu Olduğu Süre / Toplam Süre (30)

Ortalama Müşteri Bekleme Süresi = Toplam Beklenen Süre / Toplam Müşteri Sayısı (31)

Ortalama Kuyruk Uzunluğu = Toplam Kuyruk Uzunluk Sayısı / Toplam Satır Sayısı (32)

Tablo 19. Performans Kriterleri Tablosu

2 İstasyonlu Performans Kriterleri		3 İstasyonlu Performans Kriterleri	
1.İstasyon Kullanim Orani	0,92	1.İstasyon Kullanim Orani	0,76
2.İstasyon Kullanim Orani	0,83	2.İstasyon Kullanim Orani	0,64
Ortalama Müşteri Bekleme Süresi	9,73dk	3.İstasyon Kullanim Orani	0,34
Ortalama Kuyruk Uzunluğu	0,44 Kişi	Ortalama Müşteri Bekleme Süresi	0,73dk
		Ortalama Kuyruk Uzunluğu	0,03kişi

SONUÇ

Belirsizliğin olduğu, birden fazla kriterli ve bu kriterlerin birbirleriyle çeliştiği durumlarda çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden SWARA, EDAS, VİKOR Yöntemleri kullanılmıştır.

Kurulacak İstasyon Seçiminde kriterlerin ağırlıklandırılması SWARA yöntemiyle yapılıp en önemli kriter Altyapı uygunluğu, en önemsiz kriter İleriki zamanlarda genişleme potansiyeli çıkmıştır. Sakarya ilinin ilçelerine yapılan bu çalışmada daha sonra bu ağırlıklar göz önüne alınarak İstasyon Yer Seçimi yapılmış olup tesis kurulması en uygun olan yer Serdivan, en uygun olmayan yer ise Arifiye olarak belirlenmiştir.

İstasyonu kuracak firma seçiminde kriterlerin ağırlıklandırılmasında SWAR Yöntemi kullanılıp en önemli kriter Fiyat, en önemsiz kriter ise teknik yetenek ve yenilikçilik olarak belirlenmiştir. Bu ağırlıklandırılmış kriterler 4 firmaya göre fayda değerleri bulunup VİKOR yöntemiyle karar verilmiştir. En uygun firma D firması çıkmıştır.

Kapasite belirlenmesinde simülasyon yöntemi kullanılmış istasyon sayısının 2 ve 3 olma durumu göz önüne alınarak performans kriterleri hesaplanmış ve en uygun seçeneğin 2 istasyon kurulması olduğu görülmüştür.

Bu tür araştırmalarda, kullanılan kriterler ve fayda değerleri artırıldığında/azaltıldığında veya değiştirildiğinde araştırma sonuçlarının değişebileceği unutulmamalıdır. Bunun yanı sıra kriterlerinin ağırlıkları uzman karar vericilerin önceliklerine göre belirlenmiş olup farklı uzmanlar ve zamanlarda bu sıralamanın değişmesi muhtemeldir.

Bundan sonraki çalışmalarda farklı Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılması konuya katkı sağlayacaktır. Ayrıca yıllar itibari ile değişen koşullar nedeniyle bu tür çalışmaların yapılması, yani sektörlerdeki şirketlerin performanslarının sistematik olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi, karar vericilerin önlemler alması konusunda yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] CHUNG, Sung Hoon; KWON, Changhyun. Multi-period planning for electric car charging station locations: A case of Korean Expressways. European Journal of Operational Research, 2015, 242.2: 677-687.

[2] YILMAZ YALÇINER A., ÇAYLAK İ (2020), Türkiye'de Dijital Dönüşüme Başlangıç için AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Sektörel Sıralama. Academic Platform Journal of Engineering and Science 8-2, 258-265, 2020 https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1013376

[3] ÖVER ÖZÇELIK, T., YILMAZ YALCINER, A., CETINKAYA, M., AKER, A. (2025). Risk assessment with the fuzzy Fine–Kinney method in a business operating in the metal industry. International Journal of

Occupational Safety and Ergonomics, 31(1), 308–317. https://doi.org/10.1080/10803548.2024.2438562

[4] ÇELİK M.T., ARSLANKAYA S. (2023). Analysis of quality control criteria in an business with the fuzzy DEMATEL method: Glass business example, Journal of Engineering Research, Volume 11, Issue 2, 100039, ISSN 2307-1877, https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100039.

[5] STANUJKIĆ, D., KARABAŠEVIĆ, D., POPOVIĆ, G., PAMUČAR, D., STEVIĆ, Ž., ZAVADSKAS, E. K., & SMARANDACHE, F. (2021). A Single-Valued Neutrosophic Extension of the EDAS Method. Axioms, 10(4), 245. https://doi.org/10.3390/axioms10040245

[6] KOCAMAN, Hatice. Locating electric vehicle charging stations in Istanbul with AHP-TOPSIS based mathematical modelling. 2017. Master's Thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.

[7] KORKUSUZ POLAT, Tülay; PAMUK CANDAN, Işılay. Risk Prioritizing with Weighted Failure Mode and Effects Analysis and Fuzzy Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis: An Application Software Service Provider Company in the Defense Industry. Applied Sciences, 2024, 14.24: 11573.

[8] ÖZBEK, Aşır; ENGÜR, Merve. EDAS yöntemi ile lojistik firma web sitelerinin değerlendirilmesi. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi, 2018, 21.2: 417-429.

[9] ÖZDEN, Ünal H.; BAŞAR, Özlem Deniz; KALKAN, Seda Bağdatlı. Imkb'de Işlem Gören Çimento Sektöründeki Şirketlerin Finansal Performanslarinin Vikor Yöntemi Ile Siralanmasi. Istanbul University Econometrics and Statistics e-Journal, 2012, 17: 23-44.

[10] SHOUSHTARI, Farzaneh; TALEBI, Mohammadamin; REZVANJOU, Seyedkian. Electric Vehicle Charging Station Location by Applying Optimization Approach. International journal of industrial engineering and operational research, 2024, 6.1: 1-15.

Üretim Hatlarının Yalın Üretim Teknikleri ile İyileştirilmesi

Seher POLAT[1]

1- Associate Professor Dr. Sakarya University Engineering Faculty Industrial Engineering Department aseher@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6023-2901

ÖZET

Günümüzde küresel ölçekte yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler ve artan rekabet koşulları, işletmeleri üretim süreçlerini sürekli olarak iyileştirmeye zorlamaktadır. Günümüzde üretimin kesintisiz devam ettiği bir ortamda, firmaların rekabet avantajı elde edebilmesi; düşük maliyetle, yüksek kalitede ve müşteri beklentilerini karşılayan ürünleri zamanında sunabilme yeteneklerine bağlıdır. Bu doğrultuda, üretim sistemlerinde kaynakların etkin kullanımı, israfların ortadan kaldırılması ve iş gücü verimliliğinin artırılması kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

Bu çalışmada, üretim süreçlerinin daha etkin ve verimli hale getirilmesi amacıyla üretim hatlarının yalın üretim yaklaşımı doğrultusunda iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Katma değerli ve katma değersiz faaliyetler ayrıştırılarak, işletmenin düşük maliyet, yüksek kalite ve müşteri memnuniyeti odaklı hedeflerine katkı sağlayacak bir yapı oluşturulmuştur. Bu kapsamda, mevcut durumun analiz edilmesi amacıyla Değer Akış Haritalama (Value Stream Mapping – VSM) yöntemi kullanılmış ve iyileştirme gerektiren alanlar belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, yalın üretim araçlarından PUKÖ (Planla–Uygula–Kontrol Et–Önlem Al) döngüsü ve Pareto analizi uygulanarak Kaizen temelli sürekli iyileştirme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kusurlu ürün oranı azaltılmış, zaman ve malzeme kayıplarının önüne geçilmiştir. Ayrıca, 5S uygulamaları ile üretim alanlarında gereksiz faaliyetler ortadan kaldırılmış; iş güvenliği artırılmış, daha düzenli ve verimli bir çalışma ortamı oluşturulmuştur. Son aşamada ise iyileştirilmiş süreçler doğrultusunda gelecek durum değer akış haritası oluşturularak sistemin genel performansı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler – alın üretim, üretim hattı, süreç iyileştirme, değer akış haritalama, Kaizen, 5S, verimlilik, sürekli iyileştirme, yalın düşünce, endüstriyel verimlilik

GİRİŞ

Firmalar, günümüzün yoğun rekabet ortamında varlıklarını sürdürebilmek ve pazarda kalıcı bir konum elde edebilmek için çeşitli stratejiler geliştirmek zorundadır. Bu stratejilerin temelinde; düşük maliyetle

üretim yapabilme, yüksek kalite standartlarını yakalayabilme ve müşteri beklentilerine hızlı şekilde yanıt verebilme yer almaktadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için üretim süreçlerinde katma değer yaratan ve yaratmayan faaliyetlerin doğru biçimde analiz edilmesi ve katma değer yaratmayan unsurların ortadan kaldırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca müşterinin algıladığı değerin doğru tanımlanması, yalın düşüncenin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmektedir (Womack & Jones, 1996).

Bu doğrultuda firmalar, süreçlerini daha verimli hâle getirmek amacıyla sürekli iyileştirme temelli yaklaşımları benimsemektedir. Bu tasarım çalışmasında, kompozit otomotiv parçaları üreten bir işletmede gereksiz maliyetleri azaltmak ve üretim süreçlerini optimize etmek amacıyla yalın üretim teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları ele alınmıştır.

Yalın üretim; üretim sistemlerinde israfı ortadan kaldırmayı, süreçleri yalınlaştırmayı ve müşteri odaklı değer yaratmayı amaçlayan bütüncül bir yönetim yaklaşımıdır. Hatalı ürünler, aşırı stok, gereksiz hareket, bekleme süreleri, fazla iş gücü kullanımı ve müşteri memnuniyetsizliği başlıca israf türleri arasında yer almaktadır (Ohno, 1988). Yalın üretim anlayışı; sıfır hata, sürekli iyileştirme, çok fonksiyonlu ekipler ve yalın organizasyon yapısı gibi temel ilkeler üzerine inşa edilmiştir (Liker, 2004).

Bu çalışmada kullanılan yalın üretim teknikleri arasında değer akış haritalama, Kaizen, 5S, PUKÖ döngüsü ve Pareto analizi yer almaktadır. Değer akış haritalama yöntemi, üretim sürecinde malzeme ve bilgi akışının bütüncül olarak analiz edilmesine olanak tanımakta; mevcut durumun ortaya konulması ve gelecekteki ideal sürecin tasarlanmasını sağlamaktadır (Rother & Shook, 2003). Bu yöntem sayesinde üretim süreçlerinde verimlilik artırılmış, israflar azaltılmış ve daha sürdürülebilir bir üretim yapısı oluşturulmuştur.

1.1. Konunun Önemi

Günümüz rekabetçi üretim ortamında işletmeler, artan maliyet baskıları, değişken müşteri talepleri ve küresel rekabet koşulları nedeniyle üretim süreçlerini daha verimli ve esnek hâle getirmek zorundadır. Üretim sistemlerinde yaşanan zaman kayıpları, gereksiz faaliyetler ve kaynak israfı, işletmelerin rekabet gücünü doğrudan olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle

üretim süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, sürdürülebilirlik ve müşteri memnuniyeti açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir.

Yalın üretim yaklaşımı, işletmelerin bu gereksinimlerine yanıt veren önemli bir yönetim felsefesi olarak öne çıkmaktadır. Katma değer yaratmayan faaliyetlerin ortadan kaldırılması, süreçlerin sadeleştirilmesi ve sürekli iyileştirme anlayışının benimsenmesi sayesinde işletmeler hem maliyet avantajı sağlamakta hem de operasyonel performanslarını artırabilmektedir.

1.2. Literatürdeki Yeri

Literatürde yalın üretim; verimlilik artışı, kalite iyileştirme, maliyet azaltma ve müşteri memnuniyetinin artırılması açısından etkili bir yaklaşım olarak ele alınmaktadır. Yapılan çalışmalarda yalın üretim uygulamalarının özellikle üretim hatlarında çevrim sürelerini azalttığı, israfları minimize ettiği ve süreç akışını iyileştirdiği vurgulanmaktadır. Değer akış haritalama, Kaizen, 5S ve PUKÖ döngüsü gibi yöntemler, yalın üretim uygulamalarının temel araçları arasında yer almakta ve birçok sektörde başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, yalın üretim uygulamalarının sektörel bazda farklılıklar gösterdiği ve her işletmenin kendi yapısına özgü çözümler geliştirmesi gerektiği görülmektedir. Bu durum, uygulamaya dayalı çalışmaların önemini artırmaktadır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, kompozit otomotiv parçaları üreten bir işletmede yalın üretim tekniklerinin uygulanabilirliğini incelemek ve üretim süreçlerinde yaşanan verimsizliklerin giderilmesine yönelik çözüm önerileri geliştirmektir. Bu kapsamda, mevcut üretim sistemi analiz edilerek katma değerli ve katma değersiz faaliyetler belirlenmiş; değer akış haritalama, Kaizen, 5S, PUKÖ döngüsü ve Pareto analizi gibi yalın üretim araçları kullanılarak iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen bulguların hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de benzer üretim yapısına sahip işletmelere yol gösterici nitelik taşıması amaçlanmaktadır.

2. PROBLEMİN TANIMI

Kompozit otomotiv parçaları üreten işletmelerde üretim süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, rekabet gücünün korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak incelenen işletmede, üretim hatlarında yeterli esnekliğin sağlanamaması nedeniyle çeşitli operasyonel problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle üretim akış sürelerinin uzun olması, üretim hattının verimli çalışmasını engellemekte ve işletmenin kaynaklarını etkin kullanamamasına neden olmaktadır.

Üretim sürecinde gözlemlenen gereksiz faaliyetler; operatör yokluğu, taşıma araçlarının beklenmesi, üretim dışı işçi hareketleri ve plansız süreç akışları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür faaliyetler zaman kayıplarına yol açmakta ve üretim verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, yüksek stok seviyeleri ve üretim sürecinde meydana gelen hatalı ürünler, işletme açısından önemli maliyet unsurları oluşturmaktadır. Bu durum hem doğrudan üretim maliyetlerini artırmakta hem de kaynak kullanımında verimsizliğe neden olmaktadır.

Söz konusu sorunlar yalnızca mali kayıplarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda müşteri memnuniyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüz rekabet ortamında müşteri beklentilerine hızlı ve doğru şekilde yanıt verebilmek, işletmeler için stratejik bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu nedenle müşterinin algıladığı değere odaklanan, esnek ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin kurulması büyük önem taşımaktadır. Mevcut sorunların devam etmesi, işletmenin pazardaki rekabet gücünü ve kurumsal itibarını zayıflatma riski taşımaktadır.

Bu bağlamda, üretim hatlarında yaşanan verimsizliklerin giderilmesi, israfların azaltılması ve süreç performansının iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ele alınan problem, yalın üretim yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilerek, işletmenin üretim sisteminin daha etkin, esnek ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşturulmasını amaçlamaktadır.

3 – PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu bölümde, kompozit otomotiv parçaları üreten bir işletmede karşılaşılan üretim problemlerinin çözümüne yönelik olarak izlenen metodolojik yaklaşım açıklanmaktadır. Çalışmada, yalın üretim felsefesi

temel alınarak üretim süreçlerinin sistematik biçimde analiz edilmesi, verimsizliklerin belirlenmesi ve iyileştirme çalışmalarının yapılandırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, üretim hattında gözlemlenen sorunların giderilmesi için aşamalı bir yöntem izlenmiş ve süreç boyunca nicel ve nitel verilerden yararlanılmıştır.

Çözüm süreci dört temel aşamada ele alınmıştır. Bu aşamalar; mevcut sistemin incelenmesi, iyileştirme gerektiren alanların belirlenmesi, çözüm uygulamalarının gerçekleştirilmesi ve iyileştirilmiş sistemin değerlendirilmesi şeklinde yapılandırılmıştır. Uygulanan yöntemler ve kullanılan araçlar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Problem Çözüm Aşamaları

Aşama	Yapılan İş	Kullanılan Yöntem / Teknik
1	Mevcut sistemin incelenmesi	İş akış şeması
2	İyileştirme yapılması gereken alanların belirlenmesi	Değer akış haritalama
3	Problemin çözümü ve sonuçların değerlendirilmesi	Değer akış haritalama, Kaizen, 5S, PUKÖ döngüsü, Pareto analizi
4	İyileştirilmiş sistemin incelenmesi ve karşılaştırılması	Değer akış haritalama

3.1. Mevcut Sistemin İncelenmesi (İş Akış Şeması)

İlk aşamada, işletmede bir ürünün tedarik sürecinden başlayarak nihai ürün hâline gelinceye kadar geçen tüm üretim faaliyetleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda, üretim süreçleri iş akış şemaları aracılığıyla görselleştirilmiştir. Böylece üretim hattındaki işlem sıraları, iş istasyonları ve süreç akışları net bir şekilde ortaya konulmuştur.

İş akış şemaları sayesinde katma değer yaratan ve katma değer yaratmayan faaliyetler ayırt edilmiş, üretim sürecinde zaman kaybına neden olan darboğazlar belirlenmiştir. Ayrıca, ürünün hammadde hâlinden mamul ürüne dönüşüm sürecinde geçtiği tüm aşamalar detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu analiz, ilerleyen aşamalarda yapılacak iyileştirme çalışmalarına temel oluşturmuştur.

3.2. İyileştirme Yapılması Gereken Alanların Belirlenmesi (Değer Akış Haritalama)

Mevcut sistem analizinin ardından, üretim süreçlerine ilişkin veriler toplanarak değer akış haritalama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda

hazırlık süreleri, işlem süreleri, vardiya sayıları, üretim miktarları, stok seviyeleri, bekleme süreleri ve çalışılmayan zamanlar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Toplanan veriler doğrultusunda mevcut durum değer akış haritası oluşturulmuş ve süreç boyunca katma değerli ile katma değersiz faaliyetler açık bir şekilde ortaya konmuştur. Bu analiz sayesinde, iyileştirme gerektiren alanlar belirlenmiş ve üretim hattındaki verimsizliklerin temel nedenleri tespit edilmiştir.

3.3. Problemin Çözümü ve Uygulanan Yöntemler

Belirlenen problem alanlarına yönelik olarak çeşitli yalın üretim teknikleri uygulanmıştır. Bu kapsamda Kaizen yaklaşımı ile sürekli iyileştirme faaliyetleri yürütülmüş, çalışan katılımı teşvik edilerek süreçlerde küçük ancak etkili iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. 5S yöntemi kullanılarak çalışma alanları düzenlenmiş, iş güvenliği artırılmış ve gereksiz hareketler azaltılmıştır.

Ayrıca PUKÖ (Planla–Uygula–Kontrol Et–Önlem Al) döngüsü ile iyileştirme süreci sistematik hâle getirilmiş, yapılan uygulamaların etkinliği düzenli olarak izlenmiştir. Pareto analizi kullanılarak sorunların öncelik sırası belirlenmiş ve en fazla etkiye sahip problemlere odaklanılmıştır. Bu sayede kaynakların daha etkin kullanılması sağlanmıştır.

3.4. İyileştirilmiş Sistemin Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

Son aşamada, uygulanan iyileştirme çalışmalarının ardından oluşturulan gelecek durum değer akış haritası incelenmiştir. Mevcut durum ile karşılaştırma yapılarak elde edilen kazanımlar analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda üretim süresinde azalma, verimlilikte artış ve kaynak kullanımında iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, yalın üretim tekniklerinin üretim süreçlerinin etkinliğini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Böylece işletmenin daha esnek, verimli ve sürdürülebilir bir üretim yapısına ulaşması sağlanmıştır.

4 – METODOLOJİ

Bu bölümde, çalışmanın yürütülmesinde izlenen yöntemsel yaklaşım, veri toplama süreci ve kullanılan yalın üretim teknikleri ayrıntılı olarak

açıklanmaktadır. Çalışmada, üretim hattında karşılaşılan problemlerin sistematik biçimde analiz edilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla yapılandırılmış bir metodoloji benimsenmiştir. Uygulanan yöntemler, üretim süreçlerinin daha verimli, esnek ve sürdürülebilir hâle getirilmesini hedeflemektedir.

4.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, uygulamaya dayalı bir durum çalışması (case study) niteliğindedir. Araştırma kapsamında kompozit otomotiv parçaları üreten bir işletmenin üretim hattı incelenmiş ve mevcut süreçler detaylı biçimde analiz edilmiştir. Çalışma sürecinde nitel ve nicel veriler birlikte kullanılarak mevcut durum ortaya konmuş, ardından iyileştirme odaklı bir yaklaşım benimsenmiştir.

Araştırma tasarımı, yalın üretim felsefesi çerçevesinde yapılandırılmış olup, problem tanımı, mevcut durum analizi, iyileştirme uygulamaları ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Bu yapı, hem sistematik hem de tekrarlanabilir bir analiz süreci sunmaktadır.

4.2. Veri Toplama Süreci

Araştırmada kullanılan veriler, doğrudan saha gözlemleri, işletme kayıtları ve üretim sürecine ilişkin ölçümler yoluyla elde edilmiştir. Bu kapsamda; üretim akış süreleri, çevrim süreleri, vardiya bilgileri, stok seviyeleri, bekleme süreleri ve iş gücü kullanımına ilişkin veriler toplanmıştır. Ayrıca üretim hattında görev alan personelle yapılan gözlemler, süreçlerin daha doğru analiz edilmesine katkı sağlamıştır.

Toplanan veriler, mevcut sistemin performansını ortaya koymak ve iyileştirme alanlarını belirlemek amacıyla analiz edilmiştir. Bu süreçte özellikle katma değerli ve katma değersiz faaliyetlerin ayrıştırılmasına odaklanılmıştır.

4.3. Kullanılan Yalın Üretim Teknikleri

Çalışmada, yalın üretim yaklaşımı kapsamında çeşitli yöntem ve araçlardan yararlanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda özetlenmiştir:

4.3.1. Değer Akış Haritalama (Value Stream Mapping – VSM)

Değer akış haritalama yöntemi, ürünün hammadde girişinden nihai müşteriye ulaşmasına kadar geçen tüm süreçlerin görsel olarak analiz

edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle mevcut durum haritası oluşturulmuş, süreçlerdeki israflar belirlenmiş ve iyileştirme potansiyeli olan alanlar tespit edilmiştir.

4.3.2. Kaizen (Sürekli İyileştirme)

Kaizen yaklaşımı, küçük ama sürekli iyileştirmeler yoluyla süreç performansının artırılmasını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, çalışan katılımı sağlanarak süreçlerdeki aksaklıklar giderilmiş ve operasyonel verimlilik artırılmıştır.

4.3.3. 5S Yöntemi

5S yöntemi ile çalışma alanlarında düzen, temizlik ve standartlaşma sağlanmıştır. Bu sayede hem iş güvenliği artırılmış hem de gereksiz zaman ve hareket kayıpları azaltılmıştır.

4.3.4. PUKÖ Döngüsü (Planla–Uygula–Kontrol Et–Önlem Al)

PUKÖ döngüsü, iyileştirme faaliyetlerinin sistematik bir şekilde yürütülmesini sağlamıştır. Yapılan uygulamalar belirli periyotlarla değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre gerekli düzeltici önlemler alınmıştır.

4.3.5. Pareto Analizi

Pareto analizi, üretim sürecinde en fazla probleme yol açan faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu analiz sayesinde kaynakların, en yüksek etkiyi sağlayacak alanlara yönlendirilmesi mümkün olmuştur.

4.4. Değerlendirme Yaklaşımı

Uygulama sürecinin sonunda, elde edilen veriler mevcut durum ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Üretim süreleri, verimlilik oranları, hata oranları ve iş gücü kullanımı gibi göstergeler dikkate alınarak iyileştirme düzeyi analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma sayesinde uygulanan yalın üretim tekniklerinin etkinliği somut verilerle ortaya konulmuştur.

4.5. Metodolojinin Genel Akışı

Bu çalışmada izlenen metodolojik süreç aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. Mevcut üretim sisteminin analiz edilmesi
2. Problem alanlarının belirlenmesi
3. Yalın üretim tekniklerinin seçilmesi
4. İyileştirme uygulamalarının gerçekleştirilmesi
5. Sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılması

Bu sistematik yaklaşım, çalışmanın bilimsel geçerliliğini artırmakta ve elde edilen sonuçların farklı üretim ortamlarına uyarlanabilmesine olanak tanımaktadır.

5. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

İşletmenin karşı karşıya olduğu üretim hattı verimsizliği, yüksek maliyetler ve kusurlu ürün oranları; üretim süreçlerinin etkinliğini azaltan temel problemler arasında yer almaktadır. Bu kapsamda, söz konusu sorunların azaltılması ve mümkün olduğunca ortadan kaldırılması amacıyla yalın üretim yaklaşımı temel alınarak iyileştirme çalışmaları yürütülmüştür. Çalışma sürecinde, mevcut üretim sisteminin ayrıntılı biçimde analiz edilmesiyle başlanmış, iyileştirme gerektiren alanlar belirlenmiş ve uygun yöntemler kullanılarak çözüm önerileri geliştirilmiştir. Uygulama sonrasında ise mevcut sistem ile iyileştirilmiş sistem karşılaştırılarak elde edilen kazanımlar değerlendirilmiştir.

4.1. Mevcut Sistemin İncelenmesi

İncelenen işletmede üretim süreci, tedarikçi firmalardan temin edilen hammadde ve yardımcı malzemelerin depoya kabul edilmesiyle başlamaktadır. Giriş kontrolünden geçirilen malzemeler, üretimde kullanılmak üzere ilgili üretim alanına sevk edilmektedir. Üretim sürecinin ilk aşamasında, parçalar kalıplama işlemlerinden geçirilmekte; bu aşamayı takiben yüzey düzeltme ve şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Devam eden süreçte ürünler, montaj ve yüzey işlem aşamalarından geçerek nihai formuna ulaşmaktadır. Üretimi tamamlanan parçalar, kalite kontrol aşamasında değerlendirilmekte ve uygun bulunan ürünler sevkiyat öncesi geçici depolama alanına alınmaktadır. Son olarak, planlanan sevkiyat programı doğrultusunda ürünler taşıma araçlarına yüklenerek müşterilere gönderilmektedir.

Ayrıca, fabrikanın genel üretim akışı ve ürünün kapıdan kapıya izlediği yol Şekil 1'da gösterilmektedir. Bu aşamadan sonra, her bir üretim istasyonunda gerçekleştirilen işlemler detaylı olarak ele alınmış ve mevcut durum haritasının oluşturulmasına temel teşkil etmiştir. Böylece, üretim sürecindeki darboğazların, gereksiz beklemelerin ve katma değer yaratmayan faaliyetlerin belirlenmesi mümkün hâle gelmiştir.



Şekil 1. Üretim sürecinin aşamalara göre sınıflandırılmış genel akış diyagramı

Şekil 1'te, incelenen işletmede hammadde girişinden başlayarak nihai ürünün sevkiyatına kadar uzanan üretim sürecinin genel akış yapısı gösterilmektedir. Süreç, üç temel aşama altında sınıflandırılmış olup; girdi süreci, üretim süreci ve son kontrol–sevkiyat aşamalarından oluşmaktadır. Bu yapı, üretim faaliyetlerinin bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

İlk aşamada, tedarikçilerden temin edilen hammaddeler işletmeye kabul edilmekte, gerekli kontrollerin ardından depolama alanına alınmaktadır. Bu aşama, üretim sürecinin sürekliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ardından malzemeler kalite kontrol sürecinden geçirilerek üretim hattına yönlendirilmektedir.

Üretim süreci aşamasında, kalıplama, yüzey işlemleri ve montaj faaliyetleri sırasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu aşama, katma değerin doğrudan üretildiği süreçleri içermekte olup üretim verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Süreç boyunca ürün, farklı istasyonlarda işlem görerek nihai formuna ulaşmaktadır.

Son aşamada ise ürünler son kalite kontrollerden geçirilmekte, uygun bulunan ürünler ambalajlanarak sevkiyata hazır hâle getirilmektedir. Bu

aşama, müşteri memnuniyetinin sağlanması ve ürün kalitesinin güvence altına alınması açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 5'te sunulan bu akış diyagramı, üretim sürecindeki tüm aşamaların birbiriyle olan ilişkisini açık biçimde ortaya koymakta ve süreç içerisindeki olası iyileştirme alanlarının belirlenmesine zemin hazırlamaktadır. Bu kapsamda, şekil çalışmanın ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilen analiz ve iyileştirme faaliyetleri için temel bir referans niteliği taşımaktadır.

İşletmede karşılaşılan üretim hattı verimsizliği, yüksek maliyetler ve kusurlu ürün oranlarının azaltılması amacıyla yalın üretim yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda, üretim sürecinin mevcut durumu detaylı biçimde analiz edilmiş, iyileştirme gerektiren alanlar belirlenmiş ve uygun yöntemler kullanılarak çözüm önerileri geliştirilmiştir. Uygulama sürecinin sonunda, elde edilen sonuçlar mevcut durum ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

4.1. Mevcut Sistemin İncelenmesi

Şekil 1'te, incelenen üretim sisteminin genel akış yapısı gösterilmektedir. Üretim süreci, hammadde ve yardımcı malzemelerin tedarik edilmesiyle başlamakta ve nihai ürünün sevkiyatına kadar devam etmektedir. Süreç, girdi, üretim ve çıkış olmak üzere üç temel aşamada ele alınmaktadır.

İlk aşamada, tedarikçilerden temin edilen hammadde ve yardımcı malzemeler işletmeye kabul edilmekte ve geçici olarak depolanmaktadır. Bu aşamada kalite kontrolleri gerçekleştirilerek üretimde kullanılmaya uygun olmayan malzemeler ayrıştırılmaktadır. Kalite kontrolü geçen malzemeler, üretimin ilk aşaması olan kalıplama sürecine yönlendirilmektedir.

Üretim süreci; kalıplama, yüzey işleme (trimleme), yapıştırma ve boyama aşamalarından oluşmaktadır. Kalıplama işleminden sonra ürünler trim istasyonuna aktarılmakta ve burada yüzey düzeltme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ardından ürünler yapıştırma sürecine alınmakta ve montaj bütünlüğü sağlanmaktadır. Son olarak, boyahane aşamasında yüzey kaplama işlemleri gerçekleştirilerek ürün nihai formuna ulaştırılmaktadır.

Üretimi tamamlanan parçalar, son kalite kontrol aşamasına tabi tutulmakta ve uygun bulunan ürünler geçici depolama alanına alınmaktadır.

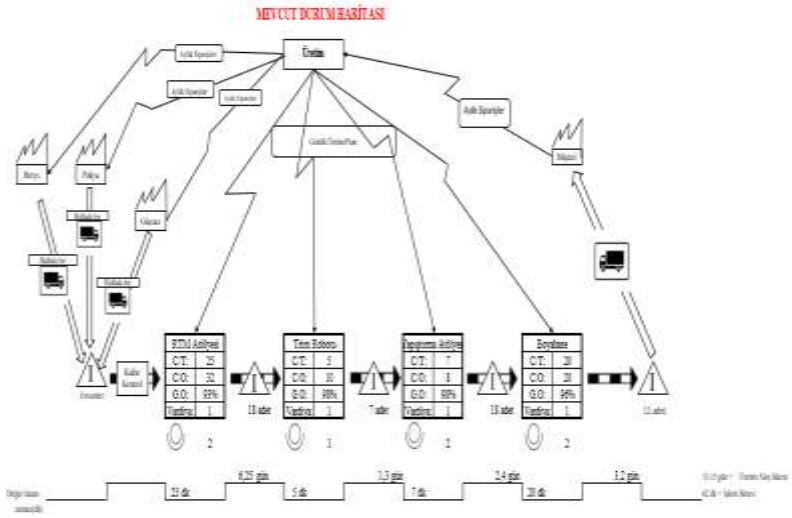
Sevkiyat planına uygun olarak ürünler taşıma araçlarına yüklenmekte ve müşterilere gönderilmektedir. Bu süreçlerin tamamı Şekil 5'te görsel olarak sunulmuştur.

4.2. İyileştirme Yapılması Gereken Alanların Belirlenmesi

Mevcut durum analizinde, üretim hattında çeşitli verimsizlikler tespit edilmiştir. Özellikle bazı proseslerde çevrim sürelerinin uzun olması, ara stok miktarlarının gereğinden fazla olması ve bazı istasyonlarda iş yükü dengesizliği dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, hatalı ürün oranının yüksekliği de önemli bir problem alanı olarak öne çıkmaktadır.

Mevcut durum haritasının oluşturulabilmesi için; çevrim süreleri, kalıp değiştirme süreleri, makine güvenilirlik oranları, çalışma süreleri, vardiya bilgileri ve stok seviyeleri detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu analizlerde, operasyon dışı faaliyetler (bekleme, taşıma, bakım, idari müdahaleler vb.) de dikkate alınarak gerçek işlem süreleri hesaplanmıştır.

Şekil 2'de sunulan mevcut durum haritası incelendiğinde, özellikle kalıplama ve boyahane süreçlerinde işlem sürelerinin yüksek olduğu ve ara stokların gereğinden fazla tutulduğu görülmektedir. Ayrıca, hammadde stok seviyelerinin de üretim ihtiyacının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, yalın üretim uygulamalarıyla iyileştirilmesi gereken alanlar olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Mevcut durum haritası

4.3. Problemin Çözümü ve Elde Edilen Sonuçlar

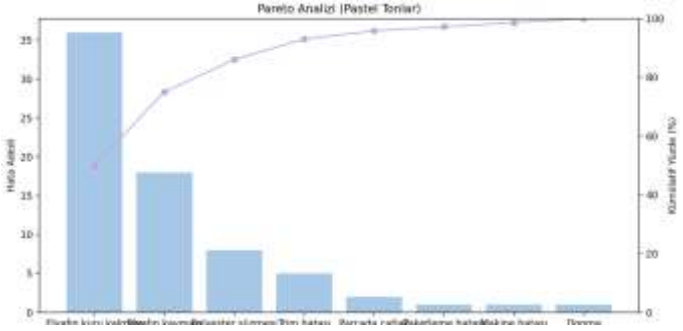
Belirlenen problem alanlarına yönelik olarak yalın üretim teknikleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, kusurlu ürünlerin azaltılması amacıyla Kaizen yaklaşımı benimsenmiş, süreç iyileştirmeleri PUKÖ döngüsü çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Pareto analizi kullanılarak hataların temel nedenleri belirlenmiş ve öncelikli iyileştirme alanları tespit edilmiştir.

Pareto analizine göre, hataların büyük bir kısmının elyafın kuru kalması, elyaf kayması ve reçine yetersizliği gibi nedenlerden kaynaklandığı görülmüştür. Bu doğrultuda, operatörlere yönelik bilgilendirme çalışmaları yapılmış, görsel talimatlar hazırlanmış ve süreç standartları netleştirilmiştir. Ayrıca kalıplama sırasında kullanılan ekipmanların ayarları gözden geçirilmiş ve standartlaştırılmıştır.

Uygulanan iyileştirme faaliyetleri sonucunda, hatalı ürün oranlarında belirgin bir azalma sağlanmış; üretim süreleri kısalmış ve kaynak kullanımı daha etkin hâle gelmiştir. Bu iyileştirmeler sayesinde üretim hattının genel performansı artırılmış ve sürdürülebilir bir üretim yapısına katkı sağlanmıştır.

Tablo 2. Hata Türleri ve Pareto Analizi Sonuçları

Hata Nedeni	Hata Adedi	Hata Yüzdesi (%)	Kümülatif Hata (%)
Elyafın kuru kalması	33	50,0	50,0
Elyaf kayması	18	25,0	75,0
Polyester süzmesi	11	11,0	86,0
Trim hatası	5	7,0	93,0
Parçada çatlağı	2	2,8	95,8
Donma	1	1,4	97,2
Makine durması	1	1,4	98,6
Paketleme hatası	1	1,4	100,0
Toplam	**72**	**100**	—



Şekil 3 Pareto analizi grafiği

Pareto analizine göre, üretim sürecinde ortaya çıkan hataların yaklaşık %80'i, nedenlerin yalnızca %20'sinden kaynaklanmaktadır. Tablo 4 incelendiğinde, elyafın kuru kalması, elyafın kayması ve polyester süzmesi hatalarının toplam hata oranının %80'inden fazlasını oluşturduğu görülmektedir. Bu bulgu, iyileştirme çalışmalarının öncelikle söz konusu üç temel hata nedenine odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Belirlenen bu kritik hata türlerinin azaltılabilmesi amacıyla, üretim alanlarında görsel destekli bilgilendirme panolarının oluşturulması önerilmektedir. Böylece operatörlerin hata nedenleri konusunda farkındalığı artırılacak ve standart uygulamaların sürekliliği sağlanacaktır. Ayrıca, özellikle elyaf kaymasını önlemek amacıyla kalıp kapatma işlemlerine yönelik ayrıntılı talimat kılavuzları hazırlanmalı ve bu talimatlar tüm çalışanlar tarafından erişilebilir hâle getirilmelidir. Kalıp kapama sırasında tüm yüzeylerin dikkatle kontrol edilmesi, hatalı üretim riskini önemli ölçüde azaltacaktır.

Elyafın kuru kalmasının önlenmesi için ise reçine miktarlarının doğru şekilde hesaplanması ve kullanılan pompa ayarlarının proses gerekliliklerine uygun biçimde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin sürekliliğinin sağlanabilmesi amacıyla operatörlerin düzenli olarak bilgilendirilmesi ve süreçlerin periyodik olarak denetlenmesi önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, belirlenen hata nedenlerine yönelik uygulanacak bu iyileştirme faaliyetlerinin, üretim sürecinde kaliteyi artıracağı, hatalı ürün oranlarını azaltacağı ve süreç verimliliğine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

5S Yöntemi ile İyileştirme Çalışmaları

Bu çalışmada, üretim sürecinde gözlemlenen düzensizliklerin, zaman kayıplarının ve verimsizliklerin azaltılması amacıyla 5S yöntemi uygulanmıştır. 5S yaklaşımı; çalışma ortamının düzenlenmesi, standartlaştırılması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması yoluyla üretim verimliliğini artırmayı hedefleyen yalın üretim araçlarından biridir. Uygulama kapsamında, üretim alanında düzen, temizlik ve disiplin sağlanarak hataların önlenmesi amaçlanmıştır.

Seiri (Ayıklama): İlk aşamada üretim alanında bulunan tüm ekipman, araç-gereç ve malzemeler gözden geçirilmiş; üretim sürecinde aktif

olarak kullanılmayan unsurlar ortamdan uzaklaştırılmıştır. Gereksiz malzeme ve ekipmanların ayıklanmasıyla birlikte, çalışma alanında hareket kabiliyeti artırılmış ve gereksiz karmaşa ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede, operatörlerin iş süreçlerine daha hızlı ve kontrollü şekilde odaklanmaları sağlanmıştır.

Seiton (Düzenleme): Ayıklama işleminin ardından, üretimde kullanılan ekipman ve malzemeler kullanım sıklığına göre düzenlenmiştir. Her bir ekipman için belirli bir yer tanımlanmış, görsel işaretlemelerle konumlar netleştirilmiştir. Bu uygulama sayesinde arama süreleri azaltılmış, üretim sürecindeki gereksiz zaman kayıpları minimize edilmiştir.

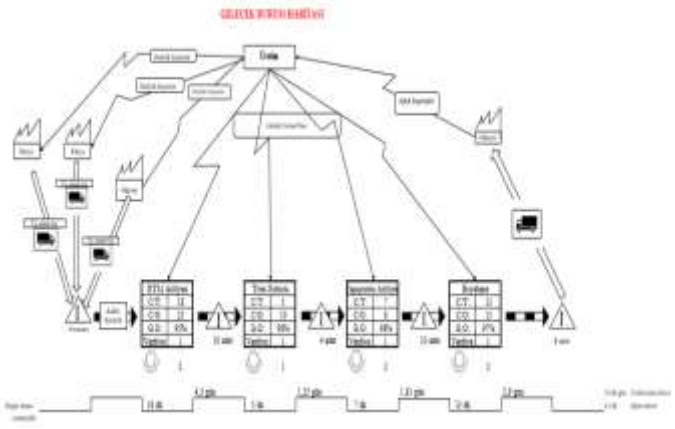
Seiso (Temizlik): Üretim alanlarında düzenli temizlik faaliyetleri gerçekleştirilmiş, özellikle toz, reçine kalıntıları ve üretim atıkları sistematik biçimde temizlenmiştir. Bu sayede hem ürün kalitesi artırılmış hem de olası iş kazalarının önüne geçilmiştir. Temizlik faaliyetleri aynı zamanda ekipmanların daha uzun ömürlü kullanılmasına katkı sağlamıştır.

Seiketsu (Standartlaştırma): Elde edilen düzenin sürdürülebilirliği amacıyla standart çalışma talimatları hazırlanmıştır. Temizlik, düzen ve kontrol faaliyetleri belirli periyotlara bağlanmış; görsel kontrol panoları ile standartlar desteklenmiştir. Böylece süreçlerin tüm çalışanlar tarafından aynı şekilde uygulanması sağlanmıştır.

Shitsuke (Disiplin / Süreklilik): Son aşamada, 5S uygulamalarının sürekliliğini sağlamak amacıyla çalışanlara düzenli bilgilendirme ve eğitimler verilmiştir. Uygulamaların sürekliliği denetimlerle desteklenmiş, çalışanlarda kalite bilinci ve sorumluluk duygusu güçlendirilmiştir. Bu sayede 5S kültürü işletme genelinde kalıcı hâle getirilmiştir.

4.4. Genel Değerlendirme

Gerçekleştirilen uygulamalar, yalın üretim yaklaşımının üretim süreçlerinde etkin bir iyileştirme aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle süreç bazlı analizlerin ve sistematik iyileştirme çalışmalarının hem kalite hem de verimlilik açısından önemli kazanımlar sağladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, benzer üretim yapısına sahip işletmeler için yol gösterici niteliktedir.



Şekil 4 Gelecek durum haritası

Tablo 3 Eski sistem ve yeni sistemin karşılaştırılması

	Mevcut durum				Gelecekteki durum			
	RTM	Trim	Yapıştırma	Boyahane	RTM	Trim	Yapıştırma	Boyahane
Temizlik süreleri	6 dk	3 dk	5 dk	4 dk	6 dk	3 dk	5 dk	4 dk
Faaliyet dışı işçi hareketleri	12 dk	5 dk	5 dk	7 dk	8 dk	3 dk	3 dk	5 dk
Bakım	8 dk	7 dk	4 dk	4 dk	8 dk	7 dk	4 dk	4 dk
İdari müdahale	8 dk	5 dk	8 dk	6 dk	8 dk	5 dk	8 dk	6 dk
Taşıma	10 dk	7 dk	5 dk	10 dk	6 dk	4 dk	4 dk	6 dk
Çevrim süresi	25 dk	5 dk	7 dk	20 dk	18 dk	5 dk	7 dk	13 dk
Kalıp değiştirme süresi	32 dk	10 dk	8 dk	20 dk	25 dk	10 dk	8 dk	15 dk
Makine güvenirlik oranı	%93	%98	%98	%96	%95	%98	%98	%97
Çalışma süresi	540	540	540	540	540	540	540	540
Vardiya	1	1	1	1	1	1	1	1
Stok	18	7	18	11	10	4	10	8

Tablo 3'de, yalın üretim uygulamaları öncesi ve sonrası üretim sistemine ait temel performans göstergeleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Karşılaştırma; temizlik süreleri, faaliyet dışı işçi hareketleri, bakım süreleri, idari müdahaleler, taşıma süreleri, çevrim süreleri, kalıp değiştirme süreleri, makine güvenilirlik oranları, çalışma süreleri ve stok miktarları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen bulgular incelendiğinde, yeni sistemde özellikle faaliyet dışı işçi hareketleri, taşıma süreleri ve stok miktarlarında belirgin iyileşmeler sağlandığı görülmektedir. Özellikle RTM ve boyahane süreçlerinde faaliyet dışı hareket sürelerinin azalması, iş gücünün daha etkin kullanılmasına olanak tanımıştır. Benzer şekilde, taşıma sürelerinde gözlenen düşüşler, üretim akışının daha dengeli ve akıcı hâle geldiğini göstermektedir.

Çevrim süreleri açısından değerlendirildiğinde, RTM ve boyahane süreçlerinde anlamlı azalmalar sağlanmıştır. Bu durum, üretim hızının artmasına ve toplam üretim süresinin kısalmasına katkı sağlamıştır. Kalıp değiştirme sürelerinde de belirgin bir iyileşme elde edilmiş olup, bu gelişme esnek üretim kabiliyetini artırmıştır.

Makine güvenilirlik oranlarında ise tüm istasyonlarda artış gözlemlenmiştir. Bu durum, bakım faaliyetlerinin daha planlı yürütüldüğünü ve ekipmanların daha kararlı çalıştığını göstermektedir. Ayrıca stok seviyelerinde meydana gelen düşüş, gereksiz envanter bulundurmanın önüne geçildiğini ve yalın üretim prensiplerine uygun bir yapı oluşturulduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, yapılan iyileştirme çalışmaları sayesinde üretim süreçleri daha dengeli, verimli ve sürdürülebilir hâle gelmiştir. Elde edilen bu kazanımlar, yalın üretim tekniklerinin işletme performansını artırmada etkili bir araç olduğunu açıkça göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, kompozit otomotiv parçaları üreten bir işletmede karşılaşılan üretim verimsizliklerinin giderilmesi amacıyla yalın üretim yaklaşımı temel alınarak kapsamlı bir iyileştirme süreci gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle mevcut üretim sistemi analiz edilmiş, süreçlerdeki darboğazlar, gereksiz faaliyetler ve verim kaybına neden olan unsurlar ayrıntılı biçimde ortaya konulmuştur. Ardından değer akış

haritalama, 5S, Kaizen, PUKÖ döngüsü ve Pareto analizi gibi yalın üretim araçları kullanılarak sistematik bir iyileştirme süreci yürütülmüştür.

Elde edilen bulgular, özellikle üretim sürecinde katma değer yaratmayan faaliyetlerin önemli ölçüde azaltıldığını göstermektedir. Çevrim süreleri, taşıma süreleri ve stok miktarlarında belirgin düşüşler sağlanırken; makine güvenilirlik oranlarında ve süreç sürekliliğinde artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, üretim hattında ortaya çıkan hataların büyük bölümünün sınırlı sayıda nedene bağlı olduğu tespit edilmiş ve bu doğrultuda geliştirilen iyileştirme faaliyetleri sayesinde hatalı ürün oranlarında anlamlı bir azalma elde edilmiştir.

5S uygulamaları ile çalışma alanlarında düzen, temizlik ve standartlaşma sağlanmış; bu durum hem iş güvenliğini artırmış hem de operatör performansını olumlu yönde etkilemiştir. Ayrıca, oluşturulan standart çalışma talimatları ve görsel yönetim uygulamaları sayesinde süreçlerin sürdürülebilirliği desteklenmiştir. Bu gelişmeler, işletmenin yalın düşünce kültürünü benimsemesine ve sürekli iyileştirme anlayışının yerleşmesine katkı sağlamıştır.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen bu çalışma; yalın üretim tekniklerinin, üretim süreçlerinde verimlilik artışı, maliyetlerin azaltılması ve kalite seviyesinin yükseltilmesi açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, benzer üretim yapısına sahip işletmeler için yol gösterici nitelikte olup, gelecekte yapılacak çalışmalarda dijitalleşme, otomasyon ve veri temelli karar destek sistemleri ile desteklenerek daha ileri seviyelere taşınabilir.

REFERANSLAR

Ahmad, S., & Schroeder, R. G. (2003). The impact of human resource management practices on operational performance: Recognizing country and industry differences. Journal of Operations Management, 21(1), 19–43. https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00056-6

Antony, J. (2014). Readiness factors for the Lean Six Sigma journey in the higher education sector. International Journal of Productivity and Performance Management, 63(2), 257–264. https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2013-0077

Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: Literature review and research issues. International Journal of Operations & Production Management, 34(7), 876–940. https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315

Dennis, P. (2016). Lean production simplified: A plain-language guide to the world's most powerful production system (3rd ed.). CRC Press.

Greasley, A. (2018). Operations management (4th ed.). Wiley.

Liker, J. K. (2004). The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer. McGraw-Hill.
Ohno, T. (1988). Toyota production system: Beyond large-scale production. Productivity Press.
Rother, M., & Shook, J. (2003). Learning to see: Value stream mapping to create value and eliminate muda. Lean Enterprise Institute.
Shingo, S. (1989). A study of the Toyota production system: From an industrial engineering viewpoint. Productivity Press.
Singh, B., Garg, S. K., & Sharma, S. K. (2010). Scope for lean implementation: A survey of 127 Indian industries. International Journal of Rapid Manufacturing, 1(3), 323–333. https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2010.033927
Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. Simon & Schuster.
Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The machine that changed the world. Rawson Associates.

Salça Üretimi

Petek ÇETİN[1*]

Tülay DURAN[2]

Hamza BOZKIR[2]

[1]Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye,
[2]Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Pamukova Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Sakarya Türkiye petekcetin11@gmail.com

ÖZET

Domates globalde fazlaca geniş bir kapsamda yetiştirilen ve hem taze hem de işlem görerek tüketilen ekonomik olarak değerli olan bir tarım ürünüdür. Domatesin işlenmesiyle ortaya çıkan besinler arasında yer alan domates salçası, uzun raf ömrü, yoğun lezzeti ve kapsamlı kullanım alanı nedeniyle gıda sektöründe öne çıkmaktadır. Salça, geleneksel ev üretiminden endüstriyel ölçekli üretime uzanan yapısıyla, tarım ve gıda sanayisi arasındaki etkileşimi açık biçimde yansıtan ürünlerden biridir. Salça üretimi, domatesin muhafaza edilmesi ve yıl boyunca tüketilebilir hale getirilmesi gereksinimi doğrultusunda gelişmiş; zamanla teknolojik ilerlemelerle birlikte modern üretim süreçlerine entegre edilmiştir. Hammadde özellikleri, uygulanan konsantrasyon teknikleri ve depolama koşulları, salçanın fiziki, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerinde belirleyicidir. Bu durum, salça üretiminin gıda teknolojisi, kalite kontrol ve gıda güvenliği bakımından bilimsel olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır. Türkiye, uygun iklim koşulları ve sanayi tipi domates üretiminin yaygınlığı sayesinde domates salçası üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Sözleşmeli üretim uygulamaları ve modern tesislerin yaygınlaşmasıyla birlikte, Türkiye'de üretilen salçaların kalite özellikleri, besin içeriği ve standartlara uygunluğu akademik araştırmalarda ele alınmıştır. Bu çalışmalar, üretim teknolojilerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini ortaya koyarak sektörel ilerlemeye katkı sağlamaktadır. Bu araştırmanın amacı, domates salçası hakkında yapılmış ulusal ve uluslararası akademik araştırmaları sistemli bir şekilde araştırarak; salçanın üretim süreçleri, kalite özellikleri ve kullanım alanlarına ilişkin mevcut bilgi birikimini değerlendirmektir.

Anahtar Kelimeler – Salça, domates salçası, biber salçası, üretim, kalite

I. GİRİŞ

Salça, domatesin işlenmesiyle elde edilen ve globalde yaygın olarak kullanılan temel gıda ürünlerinden biridir. Yoğun lezzet profili, uzun raf ömrü ve farklı yemek türlerinde kullanım kolaylığı sayesinde salça hem geleneksel mutfak kültürlerinde hem de endüstriyel gıda için önemli bir yere sahiptir. Domatesin katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürülmesi, salçayı tarımsal üretim ile gıda sanayisi arasında stratejik bir konuma taşımaktadır. Salça üretimi, domatesin muhafaza edilmesi ve yıl boyunca tüketilebilir hale getirilmesi gereksinimi doğrultusunda gelişmiş; zamanla geleneksel yöntemlerden modern endüstriyel üretim süreçlerine evrilmiştir. Günümüzde salça üretiminde kullanılan hammadde özellikleri, uygulanan konsantrasyon teknikleri ve depolama koşulları ürünün fiziki, kimyevi ve mikrobiyolojik özellikleri üzerinde belirleyici olmaktadır (Uylaşer ve Başoğlu, 1997; Duman ve Şen 2019).

Bu nedenle salça, gıda teknolojisi, kalite kontrol ve gıda güvenliği açısından çok sayıda akademik çalışmaya konu olmaktadır. Türkiye, sanayi tipi domates üretimindeki kapasitesi ve gelişmiş işleme altyapısı sayesinde salça üretiminde ve ihracatında elzem ülkeler arasında yer almaktadır. Özellikle Ege ve Marmara bölgelerinde yoğunlaşan salça üretim tesisleri hem iç salça sektörüne hem de dış salça sektörlerine yönelik üretim gerçekleştirmektedir. Salça, Türkiye açısından yalnızca yaygın tüketilen bir gıda ürünü değil, aynı zamanda tarım ve gıda sanayisine önemli düzeyde ekonomik katkı sağlayan bir ihracat ürünü niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda salça üretimi, çiftçiler için sürdürülebilir bir gelir kaynağı oluştururken; gıda sanayisi aracılığıyla ülke ekonomisine katkı sağlayan önemli bir işlenmiş tarım ürünü olarak değerlendirilmektedir (Duman ve Şen 2019).

Salça, domatesin işlenmesiyle oluşan ve globalde yaygın biçimde kullanılan temel bir gıda ürünüdür. Yoğun lezzet profili, uzun raf ömrü ve farklı yemek türlerinde kullanım kolaylığı, salçayı hem geleneksel mutfaklarda hem de endüstriyel üretimde önemli kılmaktadır. Domatesin katma değeri yüksek ürüne dönüştürülmesi, salçayı tarımsal üretim ile gıda sanayisi arasında stratejik bir konuma taşımaktadır.

Salça üretimi, domatesin muhafaza edilmesi ve yıl boyunca tüketilebilir hale getirilmesi ihtiyacına yanıt olarak gelişmiştir ve geleneksel yöntemlerden modern endüstriyel proseslere evrilmiştir (Kaya ve ark., 2013). Günümüzde salça üretiminde kullanılan hammadde kalitesi, konsantrasyon teknikleri ve depolama koşulları ürünün fiziki, kimyevi ve mikrobiyolojik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bundan dolayı, salça gıda teknolojisi alanında çok sayıda akademik çalışmalarda bulunmuştur.

Türkiye, sanayi tipi domates üretiminde yüksek kapasiteye ve gelişmiş işleme altyapısına sahip olup, salça üretiminde iç ve dış pazarlara yönelik teşkilatlanmış tesislere sahiptir (Égei ark., 2022; Eslami ve ark., 2023). Salça, Türkiye açısından yalnızca yaygın tüketilen bir gıda ürünü olmayıp aynı zamanda tarım ve gıda sanayisine önemli ekonomik katkı sağlayan bir ihracat ürünüdür. Bu bağlamda salça üretimi, çiftçiler için ileriye dönük bir gelir kaynağı oluştururken, ülke pazarına katkı sağlayan önemli bir işlemden geçirilmiş bir tarım ürünü olarak değerlendirilmektedir (Soares et al., 2019; Wu, 2022).

SALÇANIN TARİHİ

Domates *(Lycopersicon esculentum, Mill) Solanaceae* familyasına ait olup, globalde hem taze hem de işlenmiş besinler aracılığıyla yaygın biçimde tüketilen önemli bir tarımsal üründür. Türün kökeninin Güney Amerika'da, özellikle Peru ve Meksika bölgelerinde olduğu kabul edilmektedir. Domatesin Kuzey Amerika'ya yayılımı Meksika üzerinden gerçekleşmiş, fazlaca bir süre boyunca tüketilen bir besin olarak değil, süs bitkisi olarak değerlendirilmiştir. İlk dönemlerde zehirli olduğuna dair yaygın inanışlar nedeniyle tüketimi sınırlı kalan domates, 20. yüzyılın başlarından itibaren besin değeri ve

teknolojik işlenebilirliğinin anlaşılmasıyla birlikte hızla yaygınlaşmış ve küresel ölçekte temel besinlerden biri haline gelmiştir (Güley, 2006; Özdoğan 2006).

Domatese ilişkin ilk standart tanımlamalardan biri, 1822 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Sabine tarafından yayımlanan çalışmada kendine yer bulmuştur. 19. yüzyılın ilk zamanlarında ticari açıdan sınırlı bir ilgi gören domates, 1847 yılında Pensilvanya'da Harrison Woodhull Crosby ve çalışma arkadaşlarının dünyanın bilinen ilk domates konservesini üretmeleriyle sanayi açısından değer kazanmaya başlamıştır. Bu gelişimin ardından, 1860 yılında Ohio eyaletinde ilk domates konservesi fabrikası açılmış; 1912 yılından itibaren ise hem evsel hem de fabrikasyon olarak domatesin işlenmesi ve tüketimi yaygınlık kazanmıştır (Doğan ve Bağcı 2018).

SALÇANIN ÜRETİMİ

Salça üretimi, hammaddenin yetiştirilmesinden depolamaya kadar pek çok değişken tarafından şekillenen çok aşamalı bir süreçtir ve üretimde kullanılan domatesin kimyasal içeriği, uygulanan işleme teknikleri ve kalite kontrol kriterleri ürünün nihai niteliğini belirleyen başlıca unsurlardır (Kaya ve ark., 2013; Eslami ve ark., 2023). Türkiye, domates üretim kapasitesi, endüstriyel altyapısı ve modern tesisleriyle domates salçası alanında hem sınır içi tüketimde hem de sınırdışı ülkelere satışta önemli bir rol oynamaktadır. Salçanın Türkiye'de beslenme üzerindeki önemi, likopen ve diğer fitokimyasalların biyoyararlanımının artırılmasıyla birlikte daha da artmaktadır (Soares ve ark., 2019; Wu, 2022).

Ayrıca salça, farklı mutfak kültürlerinde yaygın olarak kullanılmakta, lezzet ve renk katkısı sağlamanın yanı sıra çeşitli sos ve yemeklerin temel bileşenlerinden biri olarak yer almaktadır. Bu noktada salça üretiminin sürdürülebilirlik açısından geliştirilmesi, ekonomik verimliliğin artırılması ve gıda güvenliği standartlarının korunması, sektörün gelecekte sürdürülebilir büyümesi için anahtar unsurlardır.

Salça, açık tarla koşullarında, bol güneş ışığı altında ve uygun hasat döneminde yetiştirilen sanayi tipi domateslerin, gıda sanayisinde modern teknolojiler kullanılarak işlenmesi sonucu elde edilen bir üründür. Üretimde kullanılan domateslerin tazeliği ve kısa sürede işlenmesi, ürün kalitesinin korunması açısından temel bir özellik olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda, fabrikaya kabul edilen domatesler genellikle en geç 24 saat içerisinde üretim sürecine alınmaktadır (Cemeroğlu, 2011).

Modern salça üretim süreci; domateslerin hijyenik koşullar altında yıkanması ve ayıklanması ile başlamakta, ardından parçalama ve ön ısıtma işlemleri uygulanmaktadır. Bu aşamaları, elekten geçirme işlemi izlemekte ve kabuk, çekirdek ile lifli kısımlar ayrılarak domates suyu elde edilmektedir. Elde edilen domates suyu, vakum altında konsantre edilerek salça formuna dönüştürülmektedir. Bu yöntemin tercih edilmesi, ürünün doğal renk, aroma ve besin bileşenlerinin korunmasına olanak sağlamaktadır. Salça üretiminde,

Türk Gıda Kodeksi “Salça ve Püre Tebliği” esas alınmakta olup, ürünün herhangi bir kimyasal katkı maddesi içermeden yalnızca fiziksel işlemlerle pastörize veya sterilize edilmesi öngörülmektedir. Tebliğe göre salçanın suda çözünebilen doğal kuru madde miktarının (°Brix) en az %28 olması gerekmektedir. Bu değerin sağlanması; kullanılan domatesin kuru madde içeriği, yetiştirildiği dönemin ekolojik koşulları, hasat zamanının üretim sezonu içindeki yeri ve fabrikanın teknolojik temeli gibi özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genellikle 6.3–7.0 kg taze domatesten yaklaşık 1 kg %28–30°Brix değerine sahip salça elde edilmektedir. Sağlıklı ve kaliteli bir salça; mevzuata uygun domateslerden üretilmiş, vakum altında modern yöntemlerle işlenmiş, fiziksel yollarla muhafaza edilmiş ve hermetik ambalajlar içerisinde piyasaya sunulmuş ürün olarak tanımlanmaktadır. Üretim sonrası uygun koşullarda depolanan salça, ambalaj bütünlüğü korunarak pazarlanmakta ve tüketiciye güvenli şekilde ulaştırılmaktadır (Anonim 2008; Cemeroğlu, 2011; Doğan ve Bağcı, 2018).

Nitelikli bir salça; domatesin kendine özgü doğal tadını ve aromasını yansıtmalı, parlak kırmızı renge sahip olmalı ve yabancı maddeler içermemelidir. Kabuk, çekirdek, lif parçaları, kum veya siyah lekeler gibi istenmeyen unsurların bulunmaması kalite göstergesi olarak kabul edilmektedir. Ayrıca ambalajın hermetik ve vakumlu olması, tüketicinin ürünün kalitesini duyusal olarak değerlendirmesinde temel kriterler arasında yer almaktadır (Cemeroğlu, 2011; Doğan ve Bağcı, 2018).

SALÇA ÇEŞİTLERİ

DOMATES SALÇASI: Türkiye’de domates üretimi, tarımsal faaliyetler içerisinde hem miktar hem de piyasa açısından önemlidir. Üretilen domatesin yaklaşık dörtte birinin işlenerek gıda sanayinde değerlendirildiği, bu işlenen miktarın ise büyük ölçüde salça üretiminde kullanıldığı bildirilmektedir. İşlenen domateslerin yaklaşık %80’inin salça üretimine ayrılması, salçayı Türkiye’de domates işleme sanayisinin temel ürünü haline getirmektedir (Ertürk ve Çirka, 2015). Konserve domates üretimi işlenen domateslerin yaklaşık %15’ini oluştururken, geri kalan kısmı ketçap, domates suyu ve bu türevde ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (TÜİK, 2023). Türkiye’de sanayi tipi domates işleme faaliyetleri 1950’li yıllarda başlayıp, ilk domates salçası üretim fabrikası 1955 yılında Bursa ilinde kurulmuştur. Günümüzde salça pazarında faaliyet gösteren işletmelerin büyük çoğunluğu özel sektöre ait olduğundan, modern üretim teknolojileriyle iç pazarın yanı sıra dış pazara yönelik üretim de gerçekleştirmektedir. Türkiye, hem domates hem de salça üretim miktarı bakımından globalde ilk sıralarda yer alan ülkeler arasında yer almakta ve salça ihracatı ülke gelirine önemli katkılar sağlamaktadır (FAO, 2022). Sebze üretimi, Türkiye tarımı açısından yalnızca iç tüketimi karşılamakla sınırlı kalmayıp aynı zamanda gıda sanayine hammadde temin etmesi ve ihracata katkı sağlaması bakımından stratejik olarak önemlidir. Türkiye’de yıllık sebze ve meyve üretimi yaklaşık 43–45 milyon ton

seviyesinde olup, bu üretimin önemli bir bölümünü domates oluşturmaktadır. Türkiye'nin dünya toplam sebze ve meyve üretimindeki payının yaklaşık %4 düzeyinde olduğu belirtilmektedir (FAO, 2022).

Domatesin gerek sanayi hammaddesi gerekse sofralık tüketimde yaygın olarak kullanılması, bu ürünün tarımsal üretimdeki önemini artırmaktadır. Türkiye'de sebze üretiminin yaklaşık %40'ının domatesten oluşması, salça sektörünün gelişimini doğrudan destekleyen temel faktörlerden biridir (TÜİK, 2023). Domates üretimindeki bu yaygınlık, salçanın hem iç pazarda yoğun biçimde tüketilmesine hem de uluslararası ticarette önemli bir işlenmiş ürün olarak öne çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle salça sektörü, domates üretimiyle paralel gelişen ve Türkiye tarım ekonomisi açısından katma değer yaratan önemli bir sanayi kolu niteliğindedir. Salçanın kalite değerlendirmesinde duyusal özellikler ve ambalaj bütünlüğü temel kriterler arasında yer almaktadır. Ürünün tat ve kokusunun domatese özgü karakteristik özellikleri taşıması, yabancı koku veya yanık tat içermemesi gerekmektedir. Renk ve görünüş açısından salça, üretim tipine uygun, homojen yapıda ve kırmızı renkte olmalıdır. Ambalaj materyallerinde ise bombaj, paslanma, sızıntı veya kenetleme hatası bulunmaması; cam kavanoz ve metal kutuların fiziksel formunun bozulmamış olması beklenmektedir. Bu özellikler, salçanın hem tüketici sağlığı hem de ürün güvenliği açısından uygunluğunu belirleyen önemli kalite göstergeleri olarak kabul edilmektedir.

Domates salçasının kimyasal kalite kriterleri, Türk Gıda Kodeksi Salça ve Püre Tebliği kapsamında belirlenen sınır değerler doğrultusunda değerlendirilmektedir. Buna göre salçada kalay miktarının en fazla 200 mg/kg olması gerekmektedir. Toplam asitlik değeri, susuz sitrik asit cinsinden ve toplam kuru madde üzerinden hesaplandığında %10'u aşmamalıdır. Üründe %10'luk hidroklorik asitte çözünmeyen kül miktarının toplam kuru madde üzerinden en fazla %0.3 olması, saflık ve yabancı madde içeriğinin kontrolü açısından önem taşımaktadır. Toplam kuru madde üzerinden hesaplanan invert şeker miktarının ise en az %40 düzeyinde olması beklenmektedir. Salçada koruyucu amaçlı kullanılan sorbik asit ve benzoik asidin kullanılmasına izin verilmemektedir. Ayrıca tuz oranının toplam kuru madde üzerinden en fazla %5 olması ve ürün pH değerinin 3.9–4.6 aralığında yer alması gerekmektedir. Bu parametreler, salçanın güvenli, kaliteli ve mevzuata uygun bir ürün olarak piyasaya sunulabilmesi açısından temel ölçütler olarak kabul edilmektedir (Anonim 2008; Cemeroğlu, 2011; Anonim, 2022a).

BİBER SALÇASI

Kapya biber salçası, genellikle olgunlaşmış kırmızı kapya biberlerinin sap ve çekirdek kısımlarının uzaklaştırılmasının ardından yıkanması, parçalanması ve ısı uygulanarak konsantre edilmesiyle elde edilen geleneksel ve endüstriyel bir üründür. Geleneksel üretimde güneş altında yoğunlaştırma yöntemi yaygın olarak kullanılırken, endüstriyel üretimde vakum altında

konsantrasyon tercih edilmektedir (Cemeroğlu, 2011; Anonim, 2022a). Yalman ve Yalman ve Özdikmenli Tepeli (2025) tarafından yapılan çalışmada, ev yapımı kapya biber salçası örneklerinin fiziki, kimyasal ve mikrobiyolojik profilleri incelikli olarak incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre salça örneklerinin suda çözünebilir kuru madde (°Brix) değerleri %8.75 ile %31.24 arasında değişmekte olup, bu farklılığın üretim tekniği ve yoğunlaştırma süresiyle ilişkili olduğu belirtilmiştir. Toplam asitlik faktörlerinin Türk Gıda Kodeksi'nde belirtilen sınırların altında kaldığı, pH değerlerinin ise 3.60–4.96 aralığında olduğu saptanmıştır. Tuz oranı %0.93–%3.34 arasında değişmiş ve kül içeriğinin çoğu örnekte %0.3'ün altında olduğu bildirilmiştir. Kimyasal bileşimin yanı sıra mikrobiyolojik açıdan da değerlendirme yapılan araştırmada, bazı örneklerde maya ve küf varlığı tespit edilmiş; bu durumun hijyen koşulları, kurutma süresi ve depolama şartlarıyla ilişkili olabileceği ifade edilmiştir. Araştırmada ayrıca, biber salçasının kendine özgün renk, tat ve aroma özelliklerinin üretim sürecinde uygulanan ısıl işlemler ve hammaddenin kalitesiyle doğrudan bağlantılı olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, kapya biber salçasının kalite özelliklerinin üretim yöntemi ve hammadde özelliklerine ilişkin olarak önemli boyutta değişiklik gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

COĞRAFİ İŞARETLİ SALÇALAR

Coğrafi işaretler, bir ürünün çıktığı bölgenin özgün niteliklerini, üretim sürecini ve ününü yansıtan kavramlardır; Türkiye'de menşe adı ve mahreç işareti şeklinde iki ana türde tescil sistemi uygulanmaktadır.

- Antep Biber Salçası / Gaziantep Biber Salçası

Antep Biber Salçası, Gaziantep iline özgü yetişen kırmızıbiberlerden yapılmış ve coğrafi işaret (mahreç işareti) ile tescillenmiş bir ürün olarak kabul edilmektedir. Bu salça, üretiminde kullanılan biberlerin yetiştiği yöresel ekolojik koşullar ve geleneksel üretim biçimleri ile Gaziantep mutfağının karakterini taşımaktadır. Coğrafi işaret koruması ile ürünün kimyasal ve duyusal özellikleri, yetiştirilme bölgesi ve geleneksel üretim metotlarıyla ilişkilendirilerek güvence altına alınmıştır (Anonim, 2022b).

- Hatay Biber Salçası

Hatay Biber Salçası, Hatay ili sınırlarında yetişen özgün kapya biber türünden üretilen salça olarak Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından coğrafi işaret (mahreç işareti) ile tescillenmiştir. Bu ürünün karakteristik özellikleri yetiştiği bölgedeki iklim ve üretim teknikleriyle ilişkilendirilmekte, böylece özgün bir lezzet ve kalite profili güvence altına alınmaktadır (Anonim, 2024).

SONUÇ

Bu çalışmada, domates salçasının tarihsel gelişimi, üretim süreçleri, kalite kriterleri, çeşitleri, kullanım bölgeleri ve beslenme açısından önemi Türkçe akademik kaynaklar ışığında ele alınmıştır. İncelenen çalışmalar, salçanın yalnızca geleneksel mutfak kültürünün bir ürünü olmadığını; ekstra olarak tarım, gıda sanayisi ve dış piyasası açısından stratejik bir ürün niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu iklimsel avantajlar, sanayi tipi domates üretim kapasitesi ve gelişmiş işleme altyapısı, salça üretiminde ülkenin uluslararası düzeyde rekabet gücünü artırmaktadır. Bununla birlikte, besin kalitesinin korunması ve sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için mevzuata uygun üretim, hijyenik koşullar, standartlaşma ve coğrafi işaret uygulamalarının önemi vurgulanmaktadır. Salça üzerine yapılacak gelecekteki çalışmaların; sürdürülebilir üretim modelleri, besin bileşenlerinin korunması ve katma değerli ürün geliştirme konularına odaklanmasının literatüre ve sektöre fazlaca katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abushita, A. A., et al. (2000). Color and antioxidant content of tomatoes. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48(5), 2075–2079.

Anonim (2022a). Türk Gıda Kodeksi. Salça ve püre tebliği. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.

Anonim (2022b). Türk Patent ve Marka Kurumu. Gaziantep biber salçası coğrafi işaret tescili.

Anonim (2024). Türk Patent ve Marka Kurumu Hatay biber salçası coğrafi işaret tescili.

Anonim, (2008). TS 1466 Domates Salçası ve Püresi Standardı. https://intweb.tse.org.tr/TSEIntWeb/Standard/Standard.

Cemeroğlu B., (2011). Meyve ve Sebze İ leme Teknolojisi 2. Cilt, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danımanlık Tic. Ltd. ti. Yayınları, No:191, 636 s, Ankara.

Doğan, H., & Bağcı, İ. (2018). Domates ve ürünlerinin tarihsel gelişimi. Akademik Gıda, 16(2), 123–132.

Duman, M., & Şen, F. (2019). Türkiye'de salça sektörünün yapısal analizi. Gıda ve Yem Bilimi-Teknolojisi Dergisi, 22(1), 45–56.

Égei, M., et al. (2022). Prediction of lycopene content. Frontiers in Nutrition, 9, 845317.

Ertürk, Y., & Çirka, M. (2015). Türkiye'de sanayi tipi domates üretimi. Tarım Ekonomisi Dergisi, 21(1), 67–78.

Eslami, E., Ferrari, G., & Pataro, G. (2023). Sustainability in tomato processing. Journal of Cleaner Production, 425, 138996.

FAO. (2022). FAOSTAT: Tomato production statistics.

Gärtner, C., Stahl, W., & Sies, H. (1997). Lycopene bioavailability from tomato products. American Journal of Clinical Nutrition, 66(1), 116–122.

Güley, G., 2006. Sanayi Domatesi Alanlarında Erken Uyarıya Dayalı Ipm Nitelikli İlaçlama Programlarının Geç Yanıklık Hastalığının (Phytophthora İnfestans (Mont.) De Bary) Kontrolündeki Etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bornova, İzmir.

Kaya, C., Kirkin, F., & Esin, Y. (2013). Ticari Domates Salçalarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri. Akademik Gıda, 11(2), 37-44.

Özdoğan, F., 2006. Domates Reçel Ürünlerinin Geli tirilmesi ve Değerlendirilmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale.

Rao, A. V., & Agarwal, S. (1998). Role of lycopene in human health. Journal of Nutrition, 128(4), 563–569.

Riccardo, A., & Smith, J. (2005). Antioxidant properties of tomato products. European Journal of Clinical Nutrition, 59(9), 1126–1133.

Soares, N. C. P., et al. (2019). Lycopene content and bioaccessibility. Food Chemistry, 275, 157–163.

Story, E. N., et al. (2010). Health benefits of tomatoes. Annual Review of Food Science and Technology, 1, 189–210.

TÜİK. (2023). Bitkisel üretim istatistikleri.

Uylaşer, V., & Başoğlu, F. (1997). Salça Üretim Aşamalarına Göre Bakteri ve Maya Florasındaki Değişim ve Bozulmadaki Etkileri Üzerinde Araştırmalar. Gıda, 22(1).

Wu, X. (2022). Nutritional value of processed tomato products. Advances in Nutrition, 13(4), 1201–1210.

Yalman, M., & Özdikmenli Tepeli, S. (2025). Ev yapımı kapya biber salçalarının kalite özellikleri. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 55–70.

Bursa'daki Alüvyon Zeminlerde Şev Stabilitesine Etki Eden Parametrelerin Karşılaştırılmalı Analizi

Mertcan Onuk[1*]

Kurban Öntürk[2 *]

[1]*İnşaat Mühendisliği / Lisansüstü Eğitim Enstitü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye*
[*]*(24500705023@subu.edu.tr)* [*]*(onturk@subu.edu.tr)*

ÖZET

Bu çalışma, Bursa bölgesindeki alüvyon zeminlerin heterojen yapısı ve yüksek değişkenliği nedeniyle şev stabilitesi analizlerinde ortaya çıkan belirsizlikleri ve güvenlik risklerini ele almaktadır. Araştırmanın temel amacı, şev güvenlik faktörünü (FS) etkileyen jeoteknik ve hidrolik parametrelerin hassasiyet düzeylerini belirleyerek, mühendislik tasarımlarında risk yönetim stratejilerine veri odaklı bir temel oluşturmaktır. Metodoloji kapsamında, Bursa alüvyonlarını temsil eden dört farklı tipik zemin profili üzerinde, 6 metre yükseklik ve 2Y:1D eğim geometrisine sahip idealize edilmiş şev modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde 'Limit Denge Analizi' (Bishop Metodu) kullanılarak; içsel sürtünme açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve yeraltı su seviyesi (yass) parametrelerinin etkileri kontrollü simülasyonlarla test edilmiştir.

Araştırma sonucunda, incelenen tüm değişkenler arasında yeraltı su seviyesindeki yükselmenin stabiliteyi en kritik düzeyde etkilediği ve güvenlik faktörünü ortalama %25 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Zemin mukavemet parametreleri arasında kohezyonun (C_u), içsel sürtünme açısına göre güvenlik faktörü üzerinde daha belirleyici bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Özellikle Siltli Kum profilinde elde edilen FS=0.86 değeri, hidrolik yüklerin stabiliteyi doğrudan tehdit ettiğini kanıtlamaktadır. Bu bulgular, Bursa alüvyon sahalarındaki şev tasarımlarında, zemin iyileştirme çalışmalarından önce efektif drenaj sistemlerinin ve yeraltı su seviyesi kontrolünün önceliklendirilmesi gerektiğini bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Yer Altı Su Seviyesi, Şev Stabilitesi, Alüvyon, Limit Denge, Güvenlik Faktörü (FS)

I. GİRİŞ

Şev stabilitesi, inşaat mühendisliği ve jeoteknik uygulamaların temel taşlarından biri olup, doğal ve yapay şevlerin göçme potansiyelini değerlendirerek can ve mal güvenliğini sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde, şev stabilitesini etkileyen temel parametreler; zemin mukavemetini (Φ \ Cu), geometrisini (yükseklik, eğim) ve hidrolojik koşulları (yeraltı su seviyesi, gözenek suyu basıncı) kapsayan geniş bir yelpazede incelenmiştir. Özellikle alüvyon zeminler, yüksek heterojenlikleri, değişim gösteren kohezyon ve sürtünme açıları ile mevsimsel yeraltı suyu seviyesi dalgalanmalarına karşı hassasiyetleri nedeniyle mühendislik tasarımında önemli belirsizlik kaynakları teşkil etmektedir. Bu belirsizlik, geleneksel deterministik analizlerin, güvenlik faktörü (FS) üzerindeki parametre etkileşimlerini yeterince açıklayamamasına yol açmıştır. Dolayısıyla, hangi jeoteknik parametrenin FS değerine en hassas etkiyi yaptığının belirlenmesi hem güvenli hem de ekonomik tasarımın temelini oluşturur.

Şev stabilitesi analizlerinde belirsizliklerin yönetimi ve parametrik etkilerin değerlendirilmesi üzerine literatürde yer alan temel çalışmalar, mühendislik yaklaşımlarının teknik evrimini ortaya koymaktadır. Zemin mekaniği ilkelerini ve limit denge prensiplerini kullanarak şevlerin stabilitesini değerlendirmek için sistematik bir çerçeve geliştiren Bromhead, özellikle şev geometrisi ve zemin mukavemeti arasındaki teorik bağın temellerini atmıştır [1]. Geleneksel deterministik yöntemlere alternatif olarak Christian ve arkadaşları, şev stabilitesi analizlerine güvenilirlik teorisini ve olasılıksal yaklaşımları uygulayarak, parametrelerdeki belirsizliklerin güvenlik faktörü üzerindeki etkisini sayısal olarak ispatlamıştır [2]. Arazi uygulamalarında karşılaşılan heyelan vakalarını yerinde inceleme ve geriye dönük analiz yöntemleriyle ele alan Cornforth, zemin araştırmalarının doğruluğunun iyileştirme projelerinin başarısı üzerindeki kritik rolünü vurgulamıştır [3]. Zemin mukavemeti ile şev stabilitesi arasındaki ilişkiyi farklı drenaj koşulları altında analiz eden Duncan ve Wright, toplam ve efektif gerilme analizlerinin tasarım güvenliği için önemini net bir şekilde tanımlamıştır [4]. Heyelan risk yönetimi stratejileri üzerinde çalışan Fell ve arkadaşları, jeoteknik verilerdeki değişkenliğin sistematik olarak sınıflandırılması gerektiğini ve riskin sadece fiziksel değil, istatistiksel bir temelde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymuştur [5]. Fredlund ve Krahn tarafından yürütülen çalışmada, literatürdeki yaygın limit denge metotları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve yöntemlerin varsayımlarındaki farklılıkların güvenlik faktörü sonuçlarında %5-10 arasında sapmalara yol açabileceği saptanmıştır [6]. Sonlu elemanlar yöntemi ile olasılıksal analizleri entegre eden Griffiths ve Fenton, zemin özelliklerindeki mekansal rastgeleliğin şevlerin göçme mekanizmasını nasıl değiştirdiğini gelişmiş sayısal modellerle kanıtlamıştır [7]. Limit denge analizlerinin fiziksel sınırlarını ve çözüm algoritmalarının matematiksel kısıtlarını inceleyen Krahn, bu yöntemlerin özellikle karmaşık geometrilerdeki hassasiyet sınırlarını belirlemiştir [8]. Doğal zeminlerin heterojen yapısını istatistiksel metotlarla inceleyen Lumb, zemin parametrelerindeki doğal değişkenliğin olasılık dağılım fonksiyonları ile ifade edilebileceğini ve tasarımda bu varyasyonun mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermiştir [9]. Kuvvet ve moment dengesini birlikte sağlayan genel bir sınır denge yöntemi geliştiren Morgenstern ve Price, karmaşık kayma yüzeylerine sahip şevlerin analizinde diğer yöntemlere göre daha tutarlı ve hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır [10]. Jeoteknik verilerin mekansal değişkenliğini karakterize etmek için istatistiksel bir çerçeve sunan Phoon ve Kulhawy, zemin etütlerinden elde edilen verilerin güvenilirlik indekslerine dönüştürülmesine olanak tanımıştır [11]. Suyun şev stabilitesi üzerindeki dramatik etkisini genel bir bakışla inceleyen Poulos, yeraltı su seviyesindeki değişimlerin ve boşluk suyu basıncının stabiliteyi düşüren en temel bozucu faktör olduğunu genel bir mühendislik perspektifiyle sunmuştur [12]. Heyelan başlangıcında dinamik hidrolojik süreçlerin kontrolünü analiz eden Sidle ve Bogaard, özellikle ani yağışlar ve yeraltı suyu hareketlerinin şev

stabilitesini dakikalar içerisinde kritik seviyenin altına indirebileceğini saptamıştır [13]. Kil içerikli zeminlerde uzun dönemli stabiliteyi "artık mukavemet" kavramı üzerinden inceleyen Skempton, drenajlı koşullarda zemin mukavemetinin zamanla azalarak heyelanlara yol açtığını ispatlamıştır [14]. Son olarak Terzaghi, heyelanların oluşumundaki temel fiziksel mekanizmaları ve efektif gerilme ilkesini açıklayarak, modern şev mühendisliğinin bilimsel ve kuramsal dayanağını oluşturmuş, suyun stabilite üzerindeki yıkıcı etkisini teknik olarak tanımlamıştır [15].

Çalışmamız, mevcut literatürdeki genel teorik modellere ek olarak, Bursa bölgesinin spesifik zemin ve hidrolojik koşullarını dikkate alarak parametrelerin etkileşimini analiz etmesiyle öne çıkmaktadır. Bu bölgesel odaklanma, genel alüvyon çalışmalarıyla karşılaştırıldığında, yerel mühendislik uygulamalarına doğrudan uygulanabilir, veri odaklı ve bölgesel risk yönetimi stratejilerine temel oluşturması açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Problemin Tanımlanması

Bu çalışmanın temel problemi, Bursa alüvyon zeminlerinin tipik jeoteknik koşulları altında tasarlanan şevlerin stabilitesini kontrol eden temel parametrelerin etkisini belirlemektir. Bursa ovası ve çevresindeki alüvyon birikintileri, mühendislik açısından yüksek su içeriği, düşük sıkışma ve önemli derecede heterojenlik gösterir. Bu durum, karayolu, köprü yaklaşımları ve yapı temelleri gibi altyapı projelerinde şev göçmesi riskini artırmaktadır.

Problemin çözümü için, dört farklı tipik alüvyon zemin profilini temsil eden idealize edilmiş bir şev modeli oluşturulmuştur. Bu model, (Sabit Şev Yüksekliği ve Eğimi H=6 m yükseklik ve 2Y:1D eğim) geometrisine sahiptir.

Analizler, bu şev geometrisinde, güvenlik faktörünü (FS) etkileyen dört ana parametreye odaklanmıştır: Zemin Mukavemeti: İçsel Sürtünme Açısı (Φ) ve Kohezyon (Cu) Yük: Zeminin Doygun Birim Hacim Ağırlığı (γsat) Hidrolik Koşul: Yeraltı Su Seviyesi (YASS). Çalışmada, zemin mukavemet parametreleri ve birim hacim ağırlık, Bursa alüvyonlarında sıkça karşılaşılan aralıklar göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Problemin çözüm metodu olarak, bu parametrelerin her birinin ayrı ayrı ve kontrollü olarak değiştirildiği parametrik simülasyonlar serisi tanımlanmıştır. Amaç, her bir parametredeki %'lik bir değişimin, şevin kritik kayma yüzeyindeki FS değeri üzerindeki etkisini nicel olarak karşılaştırmaktır.

A. Yapılan Analizler ve Şekilleri

Bu çalışmada kullanılan geoteknik parametrelerin elde edilme yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

Yeraltı Su Seviyesi (YASS):

Yeraltı su seviyesi, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sırasında açılan araştırma sondajlarında gözlemlenmiştir. Sondaj kuyularında yapılan ölçümler, sondaj süresince ve sonrasında su seviyesinin stabilize olduğu durumlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışma alanı ve yakın çevresinde bulunan mevcut su kuyularından elde edilen bilgiler, ölçülen YASS değerlerinin doğrulanmasında yardımcı veri olarak kullanılmıştır.

İçsel Sürtünme Açısı (φ) ve Kohezyon (c):

Arazi çalışmaları kapsamında açılan temel araştırma sondajlarından Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sırasında örselenmiş zemin numuneleri alınmıştır. Bu numuneler üzerinde, zemin tabakalarının mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tane boyu dağılımı (elek analizi), doğal su muhtevası, Atterberg limitleri, üç eksenli basınç, kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, zeminlerin dayanım parametreleri olan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, doğrudan kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlar esas alınarak belirlenmiştir. Kesme kutusu deneyinin, özellikle yatay düzlemde kayma davranışını temsil etmesi nedeniyle, elde edilen parametrelerin analizlerde daha uygun olduğu kabul edilmiştir.

Zeminin Doygun Birim Hacim Ağırlığı (γ_sat):

Zeminin doygun birim hacim ağırlığı, ilgili derinlikten alınan bozulmamış zemin numuneleri kullanılarak laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Bu amaçla, Shelby tüpü ile elde edilen numuneler kontrollü koşullar altında tamamen suya doygun hale getirilmiş; ardından numunelerin hacim ve ağırlıkları ölçülerek doygun birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Ölçümler sırasında numunelerin yapısal bütünlüğünün korunmasına özen gösterilmiştir.

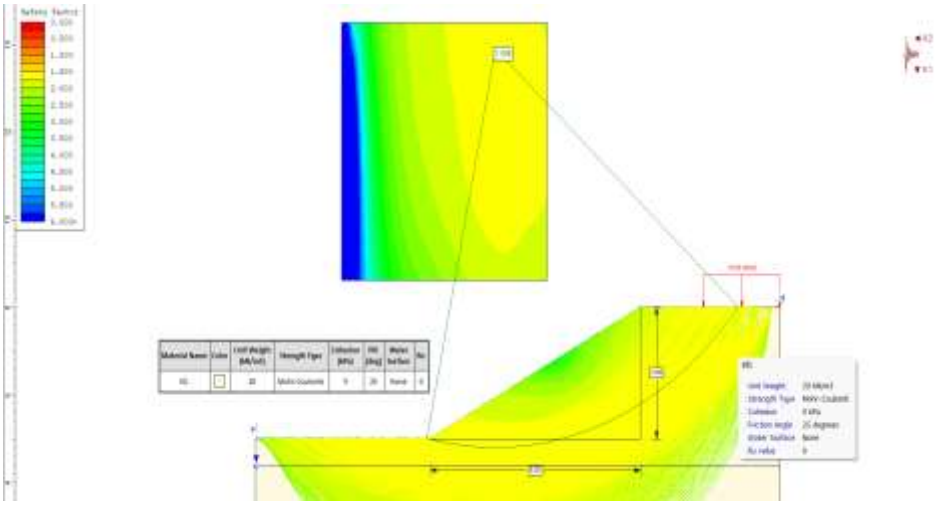
Tablo 1. Analizlerde Kullanılan Parametreler

ANALİZ NO	YASS	İçsel Sürtünme Açısı & Kohezyon	Birim Hacim Ağırlık
1	2 m	25 - 9	20
2	4 m	25 - 7	20
3	1 m	26 - 1	17
4	1 m	28 - 1	17

Problemin çözümüne yönelik olarak, ilk aşamada Orta plastisiteli kil (CI) içeren alüvyon bir zemin profilini temsil edecek şekilde idealize edilmiş bir şev modeli oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, Bursa ili Ertuğrul Mahallesi'nde yer alan proje sahasında gerçekleştirilen temel kazısının derinliği dikkate alınmış ve kazı derinliği 3,00 m olan bu saha için şev geometrisi yatay/düşey oranı 6,00 m / 3,00 m olacak şekilde tanımlanmıştır.

Oluşturulan şev modeli üzerinde, limit denge yöntemlerinden biri olan Bishop yöntemi kullanılarak şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, Slide 6.0 yazılımı yardımıyla yürütülmüş olup, uzun dönem depremli koşullar esas alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlere ait kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik sayıları Şekil 1'de sunulmuştur.

Analiz sonuçlarına göre, uzun dönem depremli durum için hesaplanan güvenlik sayısı FS = 1,59 olarak elde edilmiştir. Hesaplanan güvenlik sayısının FS > 1,00 koşulunu sağlaması nedeniyle, söz konusu şev geometrisinin uzun dönem depremli koşullar altında stabil olduğu ve güvenli kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 1. uzun dönem depremli şev analizi

Çalışmanın ilk aşamasında, orta plastisiteli kil (CI) içeriği yüksek olan zemin profilini temsil eden idealize edilmiş bir şev modeli üzerinde stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, şev güvenliğinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan limit denge yaklaşımlarından biri olan Bishop Limit Denge Yöntemi tercih edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, kritik kayma yüzeyi için hesaplanan şev güvenlik katsayısı 1,59 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu güvenlik katsayısı değeri, analiz edilen şev geometrisinin statik koşullar altında genel kabul gören güvenlik kriterlerini sağladığını ve FS > 1,00 şartını karşılayarak güvenli bölgede yer aldığını göstermektedir. Bu sonuç, incelenen zemin profili ve şev geometrisi için herhangi bir global stabilite problemi bulunmadığını ortaya koymaktadır.

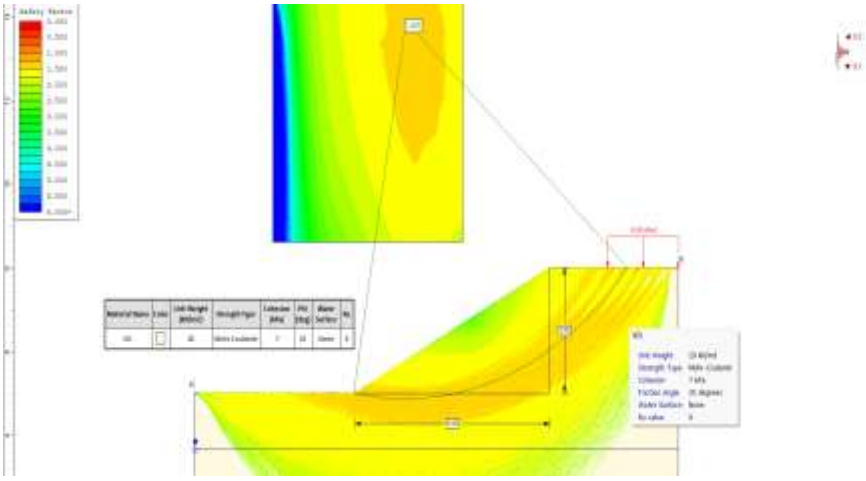
Analiz sonuçlarında elde edilen görece yüksek güvenlik katsayısının temel nedeni, incelenen zemin profilinde kil oranının yüksek olmasıdır. Killi birimlerin karakteristik özelliği olan yüksek kohezyon bileşeni (Cu), dairesel kayma yüzeyi boyunca gelişen kayma gerilmelerine karşı ilave bir direnç sağlayarak şev stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, özellikle kısa drenaj süresine sahip veya kohezyon ağırlıklı davranış sergileyen zeminlerde stabilite açısından belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Limit denge yöntemlerinden Bishop yönteminin, dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alan yapısı sayesinde, yüksek kil içeriğine sahip bu idealize modelde zeminin kayma mukavemeti bileşenlerinin etkin bir şekilde mobilize edildiği görülmektedir. Bu bağlamda, kohezyonun katkısı ile birlikte içsel sürtünme direncinin de analizlere yansıtılması, şev geometrisinin söz konusu zemin tipi için kararlı bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, kullanılan yöntem ve zemin parametreleri çerçevesinde, şevin mevcut geometrisinin mühendislik açısından güvenli ve stabil bir yapı sunduğunu doğrulamaktadır.

İkinci örnek kapsamında, düşük plastisiteli kil (CL) içeren alüvyon bir zemin profilini temsil edecek şekilde idealize edilmiş bir şev modeli oluşturulmuştur. Bursa ili Çeltik Mahallesi'nde yer alan proje sahasında gerçekleştirilen temel kazısının 3,00 m derinliğinde olması dikkate alınarak, şev geometrisi yatay/düşey oranı 6,00 m / 3,00 m olacak biçimde tanımlanmıştır.

Tanımlanan bu geometri üzerinde, limit denge analizleri Bishop yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve hesaplamalar Slide 6.0 yazılımı yardımıyla yürütülmüştür. Uzun dönem depremli koşullar esas alınarak yapılan analizlere ait kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları Şekil 2'de sunulmuştur.

Analizler sonucunda, söz konusu şev için uzun dönem depremli durum altında hesaplanan güvenlik katsayısı FS = 1,44 olarak elde edilmiştir. Bu değerin FS > 1,00 koşulunu sağlaması, incelenen şev geometrisinin ve zemin özelliklerinin uzun dönem depremli koşullar altında stabilite açısından yeterli olduğunu ve şevin güvenli bölgede yer aldığını göstermektedir.



Şekil 2. uzun dönem depremli şev analizi

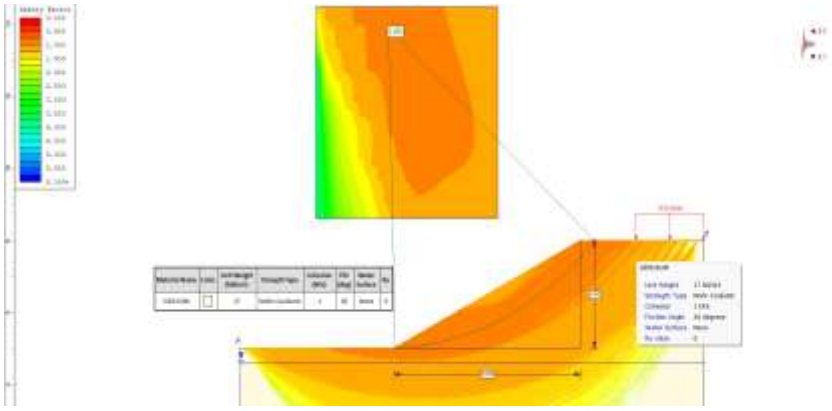
Çalışmanın ikinci aşamasında, düşük plastisiteli kil (CL) içeriğine sahip alüvyon bir zemin profilini temsil eden idealize edilmiş şev modeli üzerinde stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Bishop Limit Denge Yöntemi kullanılmış ve değerlendirmeler uzun dönem depremli koşullar esas alınarak yapılmıştır. Bu aşamada, birinci örnekle karşılaştırıldığında yeraltı su seviyesinin (YASS) daha düşük bir kotta bulunmasına rağmen, hesaplanan şev güvenlik katsayısının azaldığı belirlenmiştir.

Güvenlik katsayısında gözlenen bu düşüşün temel nedeni, zemin yapısındaki kil oranının azalmasına bağlı olarak kohezyonel direncin zayıflamasıdır. Yeraltı su seviyesinin düşmesi, boşluk suyu basıncının azalması yoluyla efektif gerilmeleri artırarak teorik olarak şev stabilitesine olumlu bir katkı sağlamaktadır. Ancak düşük plastisiteli killi birimlerin (CL), orta plastisiteli killi zeminlere kıyasla daha düşük kohezyon ve kayma mukavemeti parametrelerine sahip olması, su seviyesindeki düşüşün sağladığı bu olumlu etkinin baskılanmasına neden olmuştur. Bu durum, incelenen şev geometrisi ve zemin koşulları için stabilitenin, yeraltı su seviyesindeki değişimlerden ziyade, zeminin kohezyonel özelliklerine ve plastisite derecesine daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Üçüncü örnek kapsamında ise, siltli kum (SM) içeren alüvyon bir zemin profilini temsil edecek şekilde idealize edilmiş bir şev modeli oluşturulmuştur. Bursa ili Çukurca Mahallesi'nde yer alan proje sahasında temel kazısının 3,00

m derinliğinde olması dikkate alınarak, şev geometrisi yatay/düşey oranı 6,00 m / 3,00 m olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu model üzerinde Bishop yöntemi kullanılarak Slide 6,0 yazılımı yardımıyla gerçekleştirilen şev stabilite analizlerine ait sonuçlar Şekil 3'te sunulmuştur.

Analizler sonucunda, siltli kum içeren bu zemin profili için uzun dönem depremli koşullar altında hesaplanan güvenlik katsayısı FS = 0,89 olarak elde edilmiştir. Hesaplanan güvenlik katsayısının FS < 1,00 olması, söz konusu şev geometrisinin uzun dönem depremli koşullar altında stabil olmadığını ve potansiyel bir göçme mekanizmasına açık olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, kohezyonel direncin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve kayma mukavemetinin büyük ölçüde içsel sürtünme açısına bağlı olduğu granüler zeminlerde, şev stabilitesinin belirgin şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Özellikle siltli kum birimlerde, deprem etkisi altında gelişen ek kayma gerilmeleri, mevcut şev geometrisi için kritik kayma yüzeylerinin kolaylıkla mobilize olmasına neden olmuştur.



Şekil 3. uzun dönem depremli şev analizi

Çalışmanın üçüncü aşamasında, siltli kum (SiSa) içeriğine sahip alüvyon bir zemin profilini temsil eden idealize edilmiş şev modeli üzerinde stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu modelde hesaplanan güvenlik katsayısının, önceki iki zemin modeline kıyasla belirgin bir azalma gösterdiğini ortaya koymuştur. Her ne kadar dane boyutunun artmasına bağlı olarak içsel sürtünme açısında (φ) bir artış gözlemlenmiş olsa da, şev stabilitesindeki bu olumsuz değişim iki temel geoteknik mekanizma ile açıklanmaktadır.

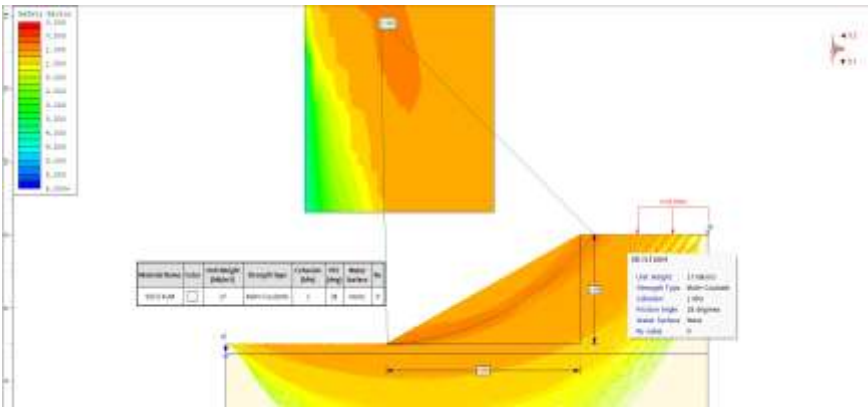
Birinci mekanizma, zemin matrisinde kil fraksiyonunun büyük ölçüde azalması ve bunun yerini silt ağırlıklı bir yapının alması sonucunda kohezyonel direncin (Cu) ihmal edilebilir seviyelere düşmesidir. Kohezyonun azalması, özellikle dairesel kayma yüzeyleri boyunca mobilize edilebilecek toplam kayma mukavemetini önemli ölçüde sınırlamıştır. İkinci ve daha

baskın etken ise, bu zemin modelinde yeraltı su seviyesinin (YASS) önceki modellere kıyasla daha yüksek bir kotta bulunmasıdır. Yükselen su seviyesi, zemin bünyesinde boşluk suyu basıncının artmasına ve buna bağlı olarak efektif gerilmelerin azalmasına neden olmuş; bu durum, içsel sürtünme açısındaki artışın sağladığı potansiyel stabilite katkısını büyük ölçüde baskılamıştır.

Bu bulgular, alüvyon zeminlerde şev stabilitesinin yalnızca içsel sürtünme açısına bağlı olmadığını; yeraltı su seviyesi ile kohezyonel bağların varlığının ve sürekliliğinin stabilite üzerinde belirleyici rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Dördüncü örnek kapsamında ise, üçüncü modele kıyasla daha sıkı bir yapı sergileyen siltli kum içeren alüvyon bir zemin profili için idealize edilmiş bir şev modeli oluşturulmuştur. Bursa ili Yunuseli Mahallesi'nde yer alan proje sahasında gerçekleştirilen temel kazısının 3,00 m derinliğinde olması esas alınarak, şev geometrisi yatay/düşey oranı 6,00 m / 3,00 m olacak şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan bu geometri üzerinde, Bishop Limit Denge Yöntemi kullanılarak Slide 6,0 yazılımı aracılığıyla uzun dönem depremli koşullar için şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur.

Analizler sonucunda, daha sıkı bir dokuya sahip olmasına rağmen, söz konusu zemin profili için uzun dönem depremli koşullar altında hesaplanan güvenlik katsayısı FS = 0,96 olarak bulunmuştur. Güvenlik katsayısının FS < 1,00 olması, incelenen şev geometrisinin bu zemin koşulları altında stabilite açısından yeterli olmadığını ve potansiyel göçme riskinin devam ettiğini göstermektedir. Bu durum, granüler zeminlerde sıkılık artışının tek başına şev stabilitesini garanti etmediğini; özellikle deprem etkisi altında, su seviyesi ve kohezyon eksikliğinin stabiliteyi sınırlayan temel faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. uzun dönem depremli şev analizi

Çalışmanın son aşamasında, üçüncü model ile aynı zemin sınıfına (SiSa) ve aynı yeraltı su seviyesi koşullarına sahip olmakla birlikte, rölatif sıkılığı artırılmış (sıkı siltli kum) alüvyon bir zemin profili üzerinde şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada amaç, granüler zeminlerde sıkılık derecesinin şev stabilitesi üzerindeki etkisini, su seviyesi sabit tutularak incelemektir.

Bishop limit denge yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda, güvenlik katsayısının üçüncü modele kıyasla sınırlı ancak pozitif yönde bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Güvenlik katsayısındaki bu artış, zeminin sıkılaşmasına bağlı olarak birim hacim ağırlığında meydana gelen artış ve buna eşlik eden içsel sürtünme açısı (φ) değerlerinin yükselmesi ile açıklanabilmektedir. Daha sıkı bir dane paketlenme yapısı, dane temas noktalarındaki sürtünme direncini artırarak kayma mukavemetine ilave katkı sağlamıştır.

Bununla birlikte, yeraltı su seviyesinin yüksek olması, boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmelerin azalmasına neden olarak stabilite üzerinde baskılayıcı etkisini sürdürmüştür. Bu nedenle, zeminin sıkılık derecesindeki artış, şev stabilitesini belirli ölçüde iyileştirmiş olsa da, yüksek su seviyesinin olumsuz etkilerini tamamen telafi edememiştir.

Elde edilen bu bulgular, su seviyesinin kritik düzeylerde bulunduğu alüvyon zeminlerde, sıkılık derecesinin stabiliteyi sınırlı ölçüde artırabildiğini; ancak boşluk suyu basıncının baskın olduğu koşullarda tek başına yeterli bir iyileştirme sağlamadığını ortaya koymaktadır. Böylece, dört farklı zemin modeli üzerinden gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler, şev stabilitesinin belirlenmesinde zemin türü, kohezyonel bağların varlığı ve yeraltı su seviyesinin, rölatif sıkılık derecesine kıyasla daha etkili ve belirleyici parametreler olduğunu açıkça göstermiştir.

Tablo 2. Analiz Sonuçları

ANALİZ NO	**Zemin Tipi**	**Güvenlik Katsayıları**	**Sonuç**
1	Orta Plastisiteli Kil	1,59	Güvenli
2	Düşük Plastisiteli Kil	1,44	Güvenli
3	Gevşek Siltli Kum	0,89	Güvenli Değil
4	Sıkı Siltli Kum	0,96	Güvenli Değil

Elde edilen analiz sonuçları, Türkiye'deki güncel kazı ve deprem yönetmeliklerinde uzun dönem depremli durum stabilitesi için öngörülen alt sınır değeri olan FS = 1,00 kriteri referans alınarak değerlendirilmiştir.

III. BULGULAR

Gerçekleştirilen parametrik simülasyonlar, Bursa ili alüvyon zemin koşullarını temsil edecek şekilde oluşturulan üç farklı idealize edilmiş şev profilinde, güvenlik faktöründeki (FS) değişimi kontrol eden en kritik iki parametrenin kohezyon (c) ve yeraltı su seviyesi (YASS) olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, zemin kohezyonundaki azalma ile yeraltı su seviyesindeki yükselmenin birlikte gerçekleşmesi durumunda, şev stabilitesi üzerinde kümülatif ve belirgin ölçüde olumsuz bir etki oluştuğunu göstermektedir (Bkz. Şekil 3).

Kohezyon, zemin kütlesinin kaymaya karşı gösterdiği iç direncin temel bileşenlerinden biri olup, özellikle alüvyon zeminlerde yaygın olarak bulunan ince taneli fraksiyonların (silt ve kil) varlığıyla doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, kohezyon değerlerinde meydana gelen azalmalar —örneğin mevsimsel kuruma, su içeriğindeki değişimler veya fiziksel yapı bozulmaları sonucunda— kritik kayma yüzeyi boyunca mobilize edilebilecek kesme mukavemetini doğrudan düşürmektedir. Kohezyonel direncin zayıflaması, şev kütlesinin kayma potansiyelini artırarak güvenlik faktörünün hızla azalmasına neden olmaktadır.

Öte yandan, yeraltı su seviyesindeki yükselme, zemin bünyesinde boşluk suyu basıncını artırarak efektif gerilmelerin azalmasına yol açmakta; bu durum, hem kohezyonel hem de sürtünmeye bağlı mukavemet bileşenlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Özellikle kohezyonun düşük olduğu veya zamanla zayıfladığı alüvyon zeminlerde, YASS artışının yarattığı bu olumsuz etki daha belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla elde edilen bulgular, şev stabilitesinin yalnızca tekil parametreler üzerinden değil, kohezyon ve yeraltı su seviyesinin birlikte değerlendirilmesi gereken etkileşimli bir sistem olarak ele alınması gerektiğini güçlü biçimde ortaya koymaktadır.

IV. TARTIŞMA

Parametrik simülasyon sonuçları, Bursa alüvyon zeminlerini temsil eden üç farklı idealize edilmiş şev profili üzerinde yapılan analizlerde, güvenlik faktöründeki (FS) değişimi kontrol eden en kritik iki parametrenin zemin kohezyonu ve yeraltı su seviyesi (YASS) olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, kohezyon değerindeki azalma ile YASS' deki yükselmenin birlikte gerçekleştiği durumlarda, şev stabilitesi üzerinde kümülatif ve belirgin derecede olumsuz bir etki oluştuğunu göstermektedir (bkz. Şekil 3). Kohezyon, zemin kütlesinin kaymaya karşı gösterdiği iç direncin temel bileşenlerinden biri olup, özellikle ince taneli (kil ve silt içeriği yüksek) alüvyon zeminlerde kritik bir rol üstlenmektedir. Bu tür zeminlerde kohezyonun azalması; mevsimsel kuruma, yapısal bozulma veya su–zemin

etkileşimleri gibi nedenlerle meydana geldiğinde, potansiyel kayma yüzeyi boyunca mobilize edilebilecek kesme mukavemeti doğrudan azalmaktadır.

Bu olumsuz etki, yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle birlikte çok daha belirgin hale gelmektedir. YASS' nin kayma yüzeyine yaklaşması veya bu yüzeyi kesmesi durumunda, zemin bünyesindeki gözenek suyu basıncı artmakta ve Terzaghi'nin efektif gerilme prensibi doğrultusunda, zemin taneleri arasındaki efektif gerilme önemli ölçüde azalmaktadır. Efektif gerilmedeki bu azalma, hem efektif içsel sürtünme açısına bağlı sürtünme direncinin hem de efektif kohezyonun eş zamanlı olarak düşmesine neden olmaktadır. Bu çift etkili mekanizma—zemin direncinin azalması ve yüksek YASS nedeniyle kaydırıcı etkilerin artması—analizler kapsamında güvenlik faktöründe gözlenen en keskin düşüşlerin temel sebebi olarak öne çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar, alüvyon sahalarda gerçekleştirilecek şev tasarımlarında, özellikle hidrolik koşulların zamana bağlı olarak değişkenlik gösterdiği alanlarda, etkin drenaj önlemlerinin uygulanmasının; kohezyon kaybı ve boşluk suyu basıncı artışına karşı alınabilecek en önemli mühendislik stratejilerinden biri olduğunu güçlü biçimde desteklemektedir (Terzaghi, 1950; Poulos, 2017).

Bu bağlamda, alüvyon zeminlerde şev stabilitesinin artırılmasına yönelik tasarım yaklaşımlarında, yalnızca geometrik optimizasyonun değil, etkin drenaj sistemleri ve su kontrol önlemlerinin de temel bir tasarım girdisi olarak ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

V. SONUÇLAR

Üç farklı alüvyon zemin profili üzerinde gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

Hidrolik Koşulların Baskın Etkisi:

İncelenen tüm parametreler arasında, yeraltı su seviyesindeki (YASS) artışın, güvenlik faktöründe en hızlı ve en yüksek oranda düşüşe neden olan parametre olduğu belirlenmiştir. Bu durum, şev stabilitesinin hidrolojik koşullara son derece duyarlı olduğunu göstermektedir.

YASS–FS İlişkisi:

Yeraltı su seviyesinde meydana gelen ortalama bir yükselmenin, güvenlik faktörünü yaklaşık %25 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, alüvyon zeminlerde stabilitenin, yalnızca zemin mukavemet parametrelerine değil, büyük ölçüde hidrolojik rejime bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Kohezyonun Kritik Rolü:

Zemin mukavemet parametreleri arasında kohezyonun, içsel sürtünme açısına kıyasla güvenlik faktörü üzerindeki değişime daha yüksek hassasiyet gösterdiği belirlenmiştir. Kohezyondaki azalma ile YASS'daki yükselmenin eş zamanlı etkisi, şevin kayma direncini en kritik seviyeye indiren temel mekanizma olarak tanımlanmıştır.

Parametrelerin Göreli Etkisi:

Hidrolik parametrelerin yüksek hassasiyetine karşın, zeminin birim hacim ağırlığı ve içsel sürtünme açısındaki değişimlerin güvenlik faktörü üzerindeki etkisinin, YASS'ya kıyasla belirgin ölçüde daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Odaklanmış Zemin Etütleri ve İzleme Gereksinimi:

Alüvyon sahalarda gerçekleştirilecek zemin etütlerinde, yeraltı su seviyesinin mevsimsel ve yağışa bağlı dalgalanmalarının yüksek çözünürlüklü ve uzun dönemli olarak izlenmesine öncelik verilmelidir. Güvenlik faktörünün YASS'ya olan yüksek hassasiyeti nedeniyle, uzun süreli hidrolojik izleme verilerinin, tekil laboratuvar deneylerinden daha kritik bir rol oynadığı değerlendirilmektedir.

Drenaj ve Hidrolik Kontrol Önlemleri:

Şev stabilitesini artırmaya yönelik en etkin maliyet–fayda oranına sahip mühendislik çözümünün, kohezyonu artırmaya yönelik pahalı zemin iyileştirme yöntemleri yerine, yüzey ve yeraltı drenaj sistemlerinin (örneğin yatay drenler, toplayıcı hendekler ve drenaj hendekleri) tasarıma öncelikli olarak entegre edilmesi olduğu belirlenmiştir. Bu tür önlemler, yeraltı su seviyesinin kritik kotların altında tutulmasını sağlayarak güvenlik faktörünün sürdürülebilir biçimde artırılmasına olanak tanımaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada destekleri bulunan, şu an çalışanı olduğum Er-zem Mühendislik ailesine ve danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK' e teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

[1] Bromhead, E. N. (1986). The Stability of Slopes. Surrey University Press. (Şev stabilitesi ve zemin mekaniği ilkeleri üzerine temel çalışma).

[2] Christian, J. T., Ladd, C. C., & Baecher, G. B. (1994). Reliability applied to slope stability analysis. Journal of Geotechnical Engineering, 120(12), 2181-2207. (Güvenilirlik ve olasılıksal yaklaşımlar).

https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:12(2181)&authuser=1

[3] Cornforth, D. H. (2005). Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial Design. John Wiley & Sons. (Arazi incelemeleri ve iyileştirme projeleri).

[4] Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons. (Zemin mukavemeti ve drenaj koşulları analizi).

[5] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Landslide Risk Management. CRC Press. (Risk yönetimi ve jeoteknik değişkenlik).

[6] Fredlund, D. G., & Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 14(3), 429-439. (Limit denge metotlarının karşılaştırılması).

https://doi.org/10.1139/t77-045&authuser=1

[7] Griffiths, D. V., & Fenton, G. A. (2004). Probabilistic slope stability analysis by finite elements. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(5), 509-518. (Sonlu elemanlar ve mekansal rastgelelik).

https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(509)&authuser=1

[8] Krahn, J. (2003). The limits of limit equilibrium analyses. 4th Brazilian Symposium on Soil Mechanics. (Limit denge analizlerinin sınırları ve hassasiyeti).

[9] Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. Canadian Geotechnical Journal, 3(2), 74-97. (Doğal zeminlerin istatistiksel değişkenliği).

[10] Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79-93. (Genel sınır denge yöntemi ve karmaşık yüzeyler).

https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79

[11] Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical spatial variability. Canadian Geotechnical Journal, 36(4), 614-627. (Mekansal değişkenlik ve güvenilirlik indeksleri).

[12] Poulos, H. G. (2017). The effect of water on slope stability: an overview. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 11(3), 195-207. (Suyun ve boşluk suyu basıncının etkisi).

[13] Sidle, R. C., & Bogaard, T. (2016). Dynamic hydrologic controls of landslide initiation. Earth-Science Reviews, 159, 274-291. (Hidrolojik süreçler ve ani yağış etkisi).

[14] Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. Géotechnique, 14(2), 77-101. (Killi zeminlerde artık mukavemet ve uzun dönem stabilite).

https://doi.org/10.1680/geot.1964.14.2.77

[15] Terzaghi, K. (1950). Mechanics of Landslides. Engineering Geology (Berkey Volume), 83-123. (Efektif gerilme ilkesi ve heyelan mekanizmaları).

Meyve ve Sebze Sularına Uygulanan Isıl Olmayan İşlemlerin Biyoaktif Bileşenler Üzerine Etkisi

Sara Betül ÖZGEN[1]

Tuba Eda ARPA ZEMZEMOĞLU[2]

1- Dr. Öğr. Gör.; Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Teknoloji ve Ar-Ge Uygulama ve Araştırma Merkezi.sarabdolgun@mku.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0218-7625

2- Dr. Öğr. Üyesi; Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü,. tubaedaarpa@gmail.com ORCID No: 0000-0002-6836-4527

ÖZET

Gıda işleme teknolojilerinin temel amacı, patojen ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların inaktivasyonu yoluyla ürün güvenliğini sağlamak ve raf ömrünü uzatmaktır. Bununla birlikte günümüzde gıda kalitesi kavramı, yalnızca mikrobiyal güvenlikle sınırlı olmayıp; besin değeri ile birlikte renk, aroma, tat ve doku gibi duyusal özelliklerin korunmasını da içeren bütüncül bir yaklaşımı kapsamaktadır. Meyve ve sebze suları, fenolik bileşikler, vitaminler, karotenoidler ve diğer biyoaktif bileşenler bakımından zengin olmaları nedeniyle fonksiyonel gıdalar arasında önemli bir yere sahiptir. Ancak konvansiyonel ısıl işlemler (TT), mikrobiyal güvenlik açısından etkin olmalarına karşın, yüksek sıcaklık ve uzun işlem süreleri nedeniyle bu bileşenlerde kayıplara ve taze ürüne özgü duyusal özelliklerin zayıflamasına yol açabilmektedir. Bu durum, ısıl olmayan veya minimal ısıl etkiye sahip yenilikçi işleme teknolojilerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu derleme çalışmasında, meyve ve sebze sularına uygulanan yüksek basınçlı işlem (HPP), ohmik ısıtma (OH) ve ultrasonikasyon (US) teknolojilerinin biyoaktif bileşenler üzerindeki etkileri literatür bulguları ışığında değerlendirilmiştir. HPP'nin düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi sayesinde pigmentler, vitaminler ve antioksidanların daha yüksek oranda korunabildiği; OH'nin hızlı ve homojen ısıtma özelliği ile bazı aroma ve karotenoid bileşiklerin stabilitesini desteklediği; US ve termosonikasyon uygulamalarının ise kavitasyon etkisiyle hücresel yapıyı parçalayarak biyoaktif bileşenlerin matriksten salınımını ve in vitro erişilebilirliğini artırabildiği görülmektedir. Bununla birlikte, her bir teknolojinin etkinliğinin ürün matriksi ve proses parametrelerine bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, ısıl olmayan işleme teknolojileri meyve ve sebze sularında kalite kayıplarını azaltma ve fonksiyonel özellikleri koruma açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – meyve suyu, sebze suyu, ısıl olmayan işlemler, ultrasound, ohmik

GİRİŞ

Gıda ürünlerinin işlenmesindeki temel amaç, patojen mikroorganizmaların inaktivasyonu ve bozulmaya yol açan mikroorganizma yükünün azaltılması yoluyla ürün güvenliğinin sağlanması ve raf ömrünün uzatılmasıdır. Ancak günümüzde gıda kalitesi kavramı yalnızca mikrobiyolojik güvenlikle sınırlı olmayıp; besin değeri ile birlikte renk, aroma, tat ve doku gibi duyusal özelliklerin korunmasını da kapsamaktadır. Depolama sürecinde bu duyusal özellikleri olumsuz yönde etkileyebilen enzimatik reaksiyonların meydana gelmesi nedeniyle, işleme sırasında enzim aktivitesinin en aza indirilmesi ya da mümkün olduğunda tamamen ortadan kaldırılması temel bir gereklilik haline gelmiştir. Bu doğrultuda gıda

işletmecileri, tüketici için güvenli ürünler üretirken aynı zamanda besinsel ve duyusal kalite üzerindeki olumsuz etkileri minimum düzeyde tutan işleme teknolojilerini tercih etmeye başlamışlardır.

Duyusal kalite; renk, aroma, tat ve doku gibi özelliklerin bütüncül algısını ifade etmekte olup, tüketici kabulünü belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Özellikle meyve sularında "taze", "doğal" ve "katkısız" algısı, satın alma tercihlerini doğrudan etkilemektedir. Geleneksel konvansiyonel ısıl işlemler (TT), mikrobiyal güvenliğin sağlanmasında etkin yöntemler olmakla birlikte; yüksek sıcaklıklar ve uzun işlem süreleri nedeniyle besinsel ve duyusal kalite kayıplarına neden olabilmektedir. Literatürde, TT'nin fenolik bileşikler, antosiyaninler, vitaminler, uçucu aroma aktif bileşikler ve diğer biyoaktif bileşenler gibi gıdanın değerli bileşenlerinde önemli kayıplara yol açtığını ortaya koyan çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Odriozola-Serrano ve ark., 2008; Cao ve ark., 2011; Rupasinghe ve Yu, 2012; Santhirasegaram ve ark., 2015; Petruzzi ve ark., 2017). Yüksek sıcaklıkta kısa süreli pastörizasyon ve ultra yüksek sıcaklık (UHT) uygulamaları gibi TT'nin daha az invaziv alternatifleri geliştirilmiş olsa da, termal işlemlerin gıda kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri henüz istenilen düzeyde azaltılamamıştır (Perez-Cacho ve Rouseff, 2008; Petruzzi ve ark., 2017).

Meyve ve sebzelerin düzenli tüketiminin, tip II diyabet, kanser, obezite ve diğer beslenme kaynaklı kronik hastalıkların görülme sıklığını azalttığı ve insan sağlığı üzerinde koruyucu etki gösterdiği bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur (Saikumar ve ark., 2024). Bu bağlamda, meyve ve sebze suları yüksek düzeyde biyoaktif bileşen içermeleri nedeniyle fonksiyonel gıdalar arasında değerlendirilmektedir. Lif, vitaminler, fenolik bileşikler ve karotenoidler gibi biyoaktif bileşenler sayesinde bu ürünler antioksidan, antiinflamatuar ve antihipertansif özellikler sergilemektedir (Polak ve ark., 2024). Bununla birlikte, meyve ve sebze bazlı ürünler mikrobiyal güvenliğin sağlanması ve enzimatik aktivitelerin kontrol altına alınması amacıyla geleneksel olarak pastörizasyon, haşlama ve kurutma gibi termal işlemlere tabi tutulmaktadır. Ayrıca meyve ve sebze sularının kısa raf ömrüne sahip olması, bu ürünlerin uygun şekilde işlenmesini ve mevcut koruma yöntemleriyle stabilitelerinin sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Her ne kadar termal işlemler ekonomik ve etkin yöntemler olarak yaygın biçimde kullanılsa da, bu işlemler biyoaktif bileşenlerde, besin öğelerinde ve duyusal özelliklerde önemli kayıplara yol açabilmektedir. Bu durum, son yıllarda ısıl olmayan veya minimal ısıl etkiye sahip yenilikçi işleme teknolojilerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu kapsamda, ohmik ısıtma ve yüksek basınçlı işlem (HPP) gibi alternatif teknolojiler, meyve ve sebze sularında kalite kayıplarını azaltma potansiyelleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. TT'ye alternatif olarak geliştirilen çok sayıda teknoloji bulunmasına karşın, bu yaklaşımların ticari ölçekte yaygın olarak benimsenmesi çeşitli engellerle sınırlıdır. Gelişmekte olan işleme teknolojileri, uzun vadede daha enerji verimli, çevre dostu ve maliyet etkin olmalarına rağmen, TT'ye kıyasla daha yüksek başlangıç

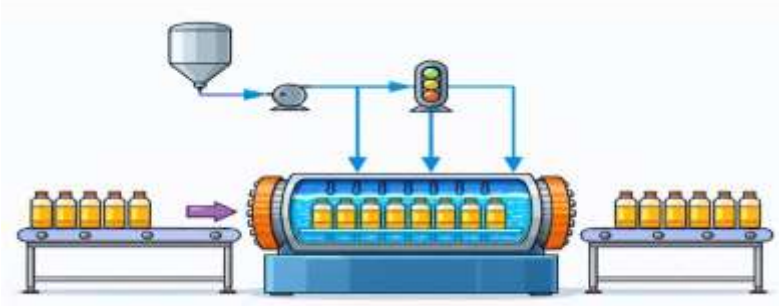
sermaye yatırımı gerektirmekte ve bu durum işlenmiş ürünlerin maliyetini artırmaktadır (Rastogi ve ark., 2007). Ayrıca TT'nin farklı gıda ürünleri için optimizasyonuna ilişkin kapsamlı bir literatür mevcutken, gelişmekte olan muhafaza tekniklerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalarda halen önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır (Priyadarshini ve ark., 2018). Buna ek olarak, tüketicilerin geleneksel olmayan gıda teknolojileri hakkında yeterli bilgiye sahip olmamaları ve bu teknolojilerin insan sağlığı üzerindeki etkilerine ilişkin olumsuz algılara sahip olmaları, benimsenme sürecini yavaşlatan diğer önemli faktörler arasında yer almaktadır (Junqueira-Gonçalves ve ark., 2011). Bununla birlikte, ekipman tasarımı ve teknolojideki ilerlemelerin üretim maliyetlerini düşürmesi ve tüketici farkındalığının artmasıyla birlikte, gelişmekte olan gıda işleme teknolojilerinin benimsenme oranı son yıllarda belirgin şekilde artmıştır (Rocha ve ark., 2022). Özellikle meyve suyu ve içecek endüstrisi, diğer gıda sektörlerine kıyasla yenilikçi işleme teknolojilerinin uygulanmasına daha açık bir yapı sergilemektedir (Martins ve ark., 2019). Yüksek basınçlı işlem (HPP) ve ohmik ısıtma (OH) gibi teknolojiler, meyve suları ve içeceklerin muhafazasında ticari ölçekte başarıyla uygulanmakta ve küresel gıda pazarındaki konumlarını giderek güçlendirmektedir (Alkanan ve ark., 2021). Bu bölümde, meyve ve sebze sularına uygulanan ohmik ısıtma, yüksek basınçlı işlem ve ultrasound teknolojilerinin biyoaktif bileşenler üzerindeki etkileri, mekanistik temelleri ve uygulamaya yönelik sonuçlar ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

Isıl Olmayan İşlemler

Yüksek Basınçlı İşlem (High Pressure Processing, HPP)

Yüksek basınçlı işlem (High Pressure Processing, HPP), günümüzde meyve suları ve içeceklerin işlenmesinde ticari ölçekte uygulanmakta olan umut vadeden bir ısıl olmayan teknolojidir. HPP'de, su gibi bir sıvı ortam kullanılarak önceden paketlenmiş gıda ürünlerine kapalı bir hazne içerisinde 100 ila 1000 MPa aralığında bir basınç uygulanmaktadır. Şekil 1, yüksek basınçlı işlem (HPP) teknolojisinin uygulanışına ilişkin şematik bir örneği göstermektedir. HPP genellikle kesikli (batch) bir proses olarak uygulanmakta olup, önceden paketlenmiş ürünler basınç kabına yerleştirilmektedir. Ürünler yüklendikten ve kapak kapatıldıktan sonra, basınç oluşturucu bir sistem aracılığıyla basıncı ileten akışkan ile basınç kabı doldurulmaktadır. Güncel HPP sistemlerinde basınç iletim ortamı olarak çoğunlukla su kullanılmaktadır (Rastogi, 2013). Su, kendi deposundan izostatik olarak basınç kabına pompalanmakta ve hedef basınç seviyesine ulaşıldığında giriş vanalarının kapatılmasıyla pompa durdurulmaktadır (Elamin ve ark., 2015). Bu aşamadan sonra, uygulanan basıncın korunması için ek bir enerji girdisine ihtiyaç duyulmamaktadır (Huang ve ark., 2014). Ürün, belirlenen süre boyunca bu basınç altında tutulduktan sonra, basıncı ileten akışkanın serbest bırakılarak

tekrar başlangıçtaki rezervuara geri dönmesiyle basınç kademeli olarak düşürülmekte ve işlem sonlandırılmaktadır (Farkas ve Hoover, 2000).



Şekil 1. Yüksek basınçlı işlem (HPP) için örnek şema (Vignali ve ark., 2022).

Meyve suları ve içeceklerde, patojenik ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların sayısını azaltmak ve gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için genellikle birkaç dakika boyunca 400 ila 600 MPa'da HPP ile işlenir (Patterson, 2005). Bu teknoloji sayesinde bakteri, maya ve küflerin mikrobiyal yükü önemli ölçüde azaltılmakta ve ürünlerin soğuk depolama koşulları altında raf ömrü uzatılabilmektedir (Hu ve ark., 2020; Podolak ve ark., 2020). HPP'nin mikroorganizmalar üzerindeki en yaygın inaktivasyon mekanizması, yüksek basınç altında hücre duvarı ve hücre zarı gibi hücresel bariyerlerin zarar görmesi olarak tanımlanmaktadır (Georget ve ark., 2015). Benzer şekilde, yüksek basınç proteinlerin üçüncül ve dördüncül yapılarını bozabilmekte; bunu takiben su moleküllerinin deforme olmuş protein yapılarına nüfuz etmesiyle hidrofobik bölgeler arasındaki etkileşimler kaybolmakta ve sonuç olarak konformasyonel değişiklikler veya kısmi açılmalar meydana gelmektedir. Bu yapısal değişimler, enzimlerin işlevsiz hale gelmesine ya da fonksiyonlarının değişmesine yol açabilmektedir (Van Loey ve ark., 2003; Georget ve ark., 2015).

HPP, uçucu bileşikler, pigmentler, vitaminler ve antioksidanlar gibi düşük molekül ağırlıklı bileşenler üzerinde sınırlı etki göstermektedir. Bunun temel nedeni, bu teknolojinin kovalent bağlar üzerinde belirgin bir etki oluşturmaması ve düşük işlem sıcaklıklarında uygulanmasıdır. Bu özellikleri sayesinde yüksek basınçlı işlem, meyve ve sebze sularının raf ömrünü uzatmak ve taze ürüne yakın duyusal ve besinsel kaliteye sahip yüksek kaliteli ürünler üretmek amacıyla endüstriyel ölçekte yaygın olarak benimsenmiştir (Chen ve ark., 2012). HPP uygulamasının etkinliğini etkileyen çeşitli faktörler bulunmakla birlikte, uygulanan basınç düzeyi ve işlem süresi temel işletim parametreleri olarak kabul edilmektedir (Podolak ve ark., 2020). Genel olarak, gıdalara 5–15 dakika süreyle 300–600 MPa aralığında yüksek basınç uygulanmaktadır (Houška ve ark., 2022). İşlem sırasında adyabatik ısınmaya bağlı olarak dolaylı bir sıcaklık artışı meydana gelse de, termal etkileri en aza indirmek amacıyla basınç hızla düşürülmektedir. Sıkıştırma sırasında

meydana gelen sıcaklık artışının, uygulanan her 100 MPa basınç için yaklaşık 3 °C olduğu bildirilmektedir (Timmermans ve ark., 2011). Sıcaklık artışının sınırlı ve maruziyet süresinin kısa olması nedeniyle, HPP ile işlenmiş meyve suları ve içeceklerin besinsel ve duyusal özellikleri taze ürünlere oldukça yakın olmakta; bazı durumlarda ise bu özelliklerin taze ürünlere kıyasla daha iyi olduğu bildirilmektedir (Barba ve ark., 2010; Huang H.-W. ve ark., 2020). HPP uygulamasının, özellikle ısıl işlem (TT) görmüş meyve sularında daha yoğun algılanan acı ve greyfurt benzeri tat/koku notalarını azalttığı da rapor edilmiştir (Baxter ve ark., 2005; Hu ve ark., 2020). Bu acı ve greyfurt benzeri tat ve koku özellikleri, ısıl işlemler sırasında limoninin oluşumu ve metiyonin gibi kükürt içeren amino asitlerden türeyen 1-p-menten-8-tiyol gibi uçucu kükürt bileşiklerinin meydana gelmesiyle ilişkilendirilmektedir (Perez-Cacho ve ark., 2007; Zhang ve ark., 2024). HPP'nin, meyvelerin renklenmesinden sorumlu olan klorofil, karotenoidler ve antosiyaninler gibi pigment bileşiklerinin kovalent bağları üzerinde çok az ya da hiç etkisi olmadığı bildirilmektedir (De Ancos ve ark., 2000; Butz ve ark., 2002; Garcia-Palazon ve ark., 2004; Oey ve ark., 2008; Houška ve ark., 2022). HPP sırasında renk değişimi meydana gelmesi durumunda, bu değişimin işlem süresinden ziyade uygulanan basınç şiddetiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Ahmed ve ark., 2005). HPP gibi "soğuk pastörizasyon" teknikleri, enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarının önemli ölçüde yavaşlaması nedeniyle işlem sonrası renk korunmasına katkı sağlamaktadır. Daha iyi renk özelliklerinin bir diğer nedeni ise düşük sıcaklıklarda askorbik asidin (AA) daha yüksek oranda korunmasıdır. Isıya duyarlı bir bileşik olan askorbik asit, yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla dehidroaskorbik aside (DHA) oksitlenmekte; DHA ise 2,3-diketogulonik asite ve ardından ksiloson, furfural ve redüktonlara parçalanabilmektedir. Bu bileşikler, gıda matrisinde serbest amino asitlerle reaksiyona girerek kahverengi pigmentlerin oluşumuna neden olmakta ve meyve sularında taze görünümlü rengin kaybolmasına yol açmaktadır (Bharate ve Bharate, 2012). Ayrıca HPP, uygulanan basınç etkisiyle bitki hücrelerindeki pigmentlerin hücre içi bölmelerden hücre dışı matrise salınmasını sağlayarak, bazı işlenmiş gıdalarda renk yoğunluğunun artmasına dahi katkıda bulunabilmektedir (Dörnenburg ve Knorr, 1993; De Ancos ve ark., 2000; Oey ve ark., 2008). Tablo 1, son yıllarda gerçekleştirilen ve ısıl işlem (TT) ile yüksek hidrostatik basınç (HPP) uygulanan meyve ve sebze sularının son ürün özelliklerini inceleyen ve karşılaştıran farklı çalışmalardan elde edilen temel bulguları özetlemektedir.

Tablo 1. Meyve-Sebze Sularında HPP işlemlerinin Son Ürüne Etkileri

Meyve-Sebze Suyu	İşleme, depolama koşulları	Etkiler	Kaynak
Ananas Suyu	HPP: 500 MPa / 10 dk TT: 95 °C / 3 dk Depolama: 4 °C'de 28 gün	Renk: TT uygulanmış ananas suyu, işlenmemiş ürüne kıyasla daha koyu, daha yeşil ve daha sarı renktedir. HPP uygulanmış ürünün rengi ise işlenmemiş ürüne oldukça benzer olup, depolama süresince her iki işlemde de belirgin bir renk değişimi gözlenmemiştir. Doku: TT uygulanmış ürün, işlenmemiş ürüne göre daha az bulanık; HPP uygulanmış ürün ise daha yüksek bulanıklık göstermiştir. TT uygulanmış üründe bulanıklık ve çökelme indeksi depolama boyunca değişmezken, HPP uygulanmış üründe bu değerlerde artış eğilimi gözlenmiştir. Koku: GC-MS analizlerine göre her iki işlem de aroma bileşik profilinde değişime neden olmuş; ancak HPP uygulanmış ürün, TT uygulanmış ürüne kıyasla işlenmemiş ürüne daha fazla benzerlik göstermiştir. Depolama sonunda HPP uygulanmış ürün, TT uygulanmış ürüne göre işlenmemiş ürüne daha yakın bulunmuştur.	Wu ve ark. (2021)
Kivi Suyu	HPP: 500 MPa / 10 dk (25 °C) TT: 110 °C / 8,6 sn Depolama: 4 ± 2 °C ve 25 ± 2 °C'de karanlıkta 42 gün	Renk: HPP uygulanmış ürünün rengi işlenmemiş ürüne benzerken, TT uygulanmış ürün önemli ölçüde farklı bulunmuştur. Klorofil kaybı HPP uygulanmış üründe daha yavaş gerçekleşmiş ve depolama sonunda renk korunumu daha yüksek olmuştur. Tat: HPP uygulanmış ürün işlenmemiş ürüne benzerken, TT uygulanmış ürün işlem	Xu ve ark. (2018)

		sonrası belirgin farklılık göstermiştir. Aroma: HPP uygulanmış ürün aromatik açıdan işlenmemiş ürüne daha yakın bulunmuştur. Doku: Her iki işlem de viskozite açısından benzer sonuçlar vermiştir. TT uygulanmış üründe parlaklık depolama süresince azalırken, HPP uygulanmış üründe değişmemiştir.	
Greyfurt Suyu	HPP: 400 MPa / 3 dk (31 °C) TT: 85 °C / 45 sn Depolama: 4 °C'de 21 gün	Renk: HPP uygulanmış ürün işlenmemiş ürüne oldukça benzerken, TT uygulanmış ürün belirgin şekilde daha soluk bulunmuştur. Tat: Naringin, poncirin ve neohesperidin gibi acı flavanonların konsantrasyonu TT uygulanmış üründe depolama sırasında artmış; HPP uygulanmış üründe ise sabit kalmıştır.	Uckoo ve ark. (2013)
Elma ve Portakal Suyu	Portakal suyu: HPP 500 MPa / 10 dk (10 °C) Elma suyu: HPP 400 MPa / 5 dk (10 °C) TT: 76 °C / 30 sn Depolama: Portakal suyu 11 hafta, elma suyu 12 hafta	Renk: HPP ve TT sonrası renkler benzer olsa da, HPP uygulanmış elma suyu TT'ye göre daha açık renkte kalmıştır. Doku: HPP, her iki meyve suyunda da TT'ye kıyasla daha yüksek viskozite sağlamıştır. Aroma: HPP uygulanmış ürünlerde taze benzeri aroma daha yüksek bulunmuştur. Depolama sırasında tüketici beğenisi HPP ürünlerde daha hızlı azalmış, ancak düşük sıcaklıkta depolanan ürünlerde genel beğeni daha yüksek kalmıştır.	Song ve ark. (2023)
Beyaz Üzüm Suyu	HPP: 300 ve 600 MPa / 3 dk TT: 90 °C / 60 sn	Tat: TT uygulanmış ürün HPP ve taze ürüne göre daha acı bulunmuştur. Koku: HPP uygulanmış ürün taze ürüne benzerken, TT uygulanmış üründe koku skorları anlamlı derecede düşmüştür.	Chang ve ark. (2017)

	Depolama: 4 °C'de 20 gün	Renk: HPP, POD ve PPO enzimlerini TT'ye kıyasla daha etkili inaktive etmiş ve renk stabilitesini daha iyi sağlamıştır.	
Elma Suyu	HPP: 400 ve 600 MPa / 3 dk TT: 72 °C / 15 sn ve 85 °C / 30 sn Depolama: 4 °C'de 3 hafta	Tat: Şekerler ve organik asitler bakımından HPP ve TT arasında fark görülmemiştir. Renk: TT uygulanmış ürün daha açık renkli iken, HPP uygulanmış üründe daha az esmerleşme gözlenmiştir. Doku: Bulut stabilitesi TT'de sabit kalırken, HPP uygulanmış üründe PME aktivitesine bağlı azalma görülmüştür. Koku: HPP uygulanmış ürün aromatik profil açısından taze ürüne daha yakın bulunmuştur.	Wibowo ve ark. (2019)
Karpuz Suyu	HPP: 600 MPa / 5 dk TT: 74 °C / 45 sn Depolama: 3 °C'de 12 gün	Koku: HPP uygulanmış üründe C6–C9 aldehitler daha yüksek bulunmuştur. Tat: TT uygulanmış üründe acı bileşik olan limonen tespit edilirken, HPP ürününde bulunmamıştır. Renk: Likopen HPP uygulanmış üründe daha fazla degradasyona uğramıştır	Aganovic ve ark. (2015)
Çilek Suyu	HPP: 400, 500 ve 600 MPa / 3 dk (20 °C) TT: 85 °C / 2 dk Depolama: 6 °C'de 49 gün	Tat: °Brix ve pH değerleri tüm örneklerde benzer bulunmuştur. Renk: Her iki işlemde de renk koyulaşmış; HPP ürünlerinde bu dönüşüm daha hızlı gerçekleşmiştir. Doku: 600 MPa HPP uygulanan üründe viskozite daha yüksek bulunmuştur.	Aaby ve ark. (2018)
Şeftali Suyu	HPP: 600 MPa / 10 dk TT: 90 °C / 1 dk	Renk: HPP uygulanmış üründe renk değişimi önemsiz bulunurken, TT uygulanmış ürün depolama sırasında koyulaşmıştır. Doku: TT uygulanmış üründe başlangıç viskozitesi daha yüksek bulunmuştur.	Rao ve ark. (2014)

	Depolama: 4 °C'de 90 gün	Aroma: HPP uygulanmış ürün daha belirgin şeftali aroması göstermiştir.	
Liçi Suyu	HPP: 500 MPa / 2 dk TT: 95 °C / 1 dk Depolama: 4 °C'de 4 hafta	Tat: Şeker ve organik asit içerikleri tüm örneklerde benzer bulunmuştur. Aroma: HPP uygulanmış ürün taze ürüne daha benzerken, TT uygulanmış ürün pişmiş tat profili göstermiştir. Renk: TT uygulanmış ürün depolama sırasında belirgin şekilde koyulaşmıştır.	Zheng ve ark. (2014)
Nar Suyu	HPP: 500–600 MPa / 5–10 dk TT: 63 °C / 30 dk ve 72 °C / 15 sn Depolama: 4 °C'de 42 gün	Renk: HPP uygulanmış ürün rengi taze ürüne daha yakın bulunmuştur. Tat: Çözünür kuru madde ve algılanan tatlılık bakımından fark bulunmamıştır. Aroma: 42 gün sonunda HPP ve TT uygulanmış ürünlerin duyusal kabulü taze üründen anlamlı derecede farklı değildir.	Rios-Corripio ve ark. (2020)
Havuç Suyu	HPP: 500–600 MPa / 1 dk; 20 °C Depolama:4 °C'de 22 gün	Toplam mikroorganizma sayısında yaklaşık 4 log CFU/mL düzeyinde azalma sağlanmış, 500 MPa basınç uygulamasıyla *Listeria monocytogenes* tamamen inaktive edilmiştir.	Patterson ve ark., 2012)
Havuç, kereviz, yeşil biber, limon, zeytin, soğan ve domatesten oluşan karışım içecek	HPP: 100–400 MPa / 120–540 s, <30 °C	Askorbik asidin yüksek oranda korunduğu, toplam fenolik bileşikler açısından ise anlamlı bir değişim olmadığı belirlenmiştir.	Barba ve ark. (2010).
Havuç, kavun, portakal ve papayadan oluşan ve soya sütü ilave	HPP: 550–650 MPa /3 dk 20 °C TT: 80 °C /3 dk	Yalnızca çok sınırlı düzeyde renk değişimi gözlenmiştir. Ayrıca ürünlerin yüksek antioksidan kapasiteye sahip olduğu ve bu kapasitenin başlıca askorbik asit tarafından belirlendiği rapor edilmiştir.	Andrés ve ark. (2016)

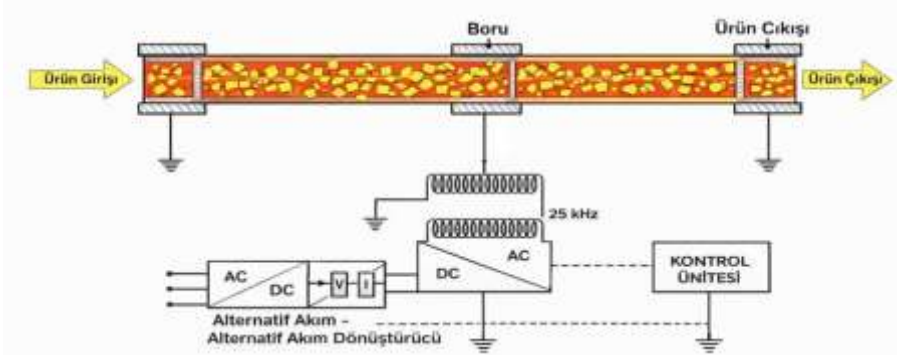
edilmiş smoothie	Depolama:4 °C'de 45 gün		
Çin koca yemişi suyu	HPP: 500 MPa / 5 dk TT: 55 °C/ 8 dk Depolama:4 °C ve 25 °C 'de 8-25 gün	Sırasıyla askorbik asidin %89,2'si ve antosiyaninlerin %96,5'i korunmuştur.	Wang ve ark. (2015)
Ispanak ve Elma suyu karışımı	HPP: 400–600 MPa; 0-300 s; 11 °C	En yüksek patulin bozunumu, 600 MPa basınçta 300 saniye süreyle uygulanan işlemler sonucunda 43 ppb (0,28 µM) olarak belirlenmiştir.	Hao ve ark. (2016)
Aronya İçeceği	HPP: 200–600 MPa; 15 dk Depolama:4 °C'de 80 gün	400 MPa'lık basınç, ürünün mikrobiyal stabilitesini belirgin şekilde arttırmış ve fenolik bileşikleri depolama sırasında daha stabil hale getirmiştir.	Błaszczak ve ark. (2017)
Salatalık Suyu	HPP: 500–600 MPa; 2 dk Depolama: 10 °C'de 15 gün, 25 °C'de 64 saat ve 37 °C'de 24 saat	Depolama süresince renk iyi düzeyde korunmuştur.	Wang ve ark. (2013)
Mor tatlı patates nektarı	HPP: 400 MPa/10 dk, 500 MPa/5 dk veya 600 MPa/2,5 dk (≈25 °C) TT: 110 °C/8.6 s Depolama: 4 °C ile 25 °C'de 12 hafta	Mayalar ve küfler tespit limitinin altına indirgenmiş ve 4 °C ile 25 °C'de 12 haftalık depolama boyunca mikroorganizma sayısı tespit limitinin altında kalmıştır.	Wang ve ark. (2012)
Karadut suyu	HPP:200–600 MPa /	200 MPa'da işlenen örneklerde iki yeni antosiyanin [pelargonidin-3-O-	Engmann ve ark. (2013)

	20 dk; 25 °C Depolama: 4 °C	kumaroylglukozit (%0,46) ve delphinidin-3-O-kumaroylglukozit (%5,8)] tanımlanmıştır. 400 MPa uygulanan meyve suyunda ise tek bir yeni antosiyanin olan delphinidin-3-O-kumaroylglukozit (%5,38) tespit edilmiştir. 600 MPa'da gerçekleştirilen HHP uygulamasında ise yeni antosiyanin oluşumu gözlenmemiştir.	
Longan meyvesi ve Hint pennywort karışımı (pirinç katkılı içecek)	HPP:400 MPa/ 30 dk; 25 °C TT:90 °C/ 2 dk Depolama: 4 °C'de 28 gün	Basınç uygulaması, ürünün doğal rengini ve biyoaktif bileşenlerini 4 haftalık soğuk depolama süresi boyunca koruyabilmiştir.	Worametrachanon ve ark. (2014)
Elma, muz, portakal ve çilek karışımlı içecek	HPP: 450 MPa/ 5 dk veya 600 MPa/ 10 dk; 20 °C Depolama: 4 °C'de 10 hafta	450 MPa/5 dk koşullarında işlenen örnekler, işlenmemiş kontrol örneklerine benzer özellikler göstermiş ve tazeliğe benzer karakteristiklerini büyük ölçüde korumuştur. Ancak PPO'nun tam inaktivasyonu sağlanamamıştır.	Keenan ve ark. (2012)
Kayısı Nektarı	HPP: 300–500 MPa / 5-10 dk; <40 °C	HHP uygulamaları sonucunda PPO ve POD enzim aktiviteleri anlamlı düzeyde artmış, PME aktivitesinde ise herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Toplam ve bireysel fenolik bileşiklerde artış saptanmış ve genel ürün kalitesi iyi düzeyde korunmuştur.	Huang ve ark. (2013)
Kuşkonmaz Suyu	HPP: 200–600 MPa; 10 ve 20 dk; 25 °C TT: 91 °C/ 3 dk Depolama: 4 °C'de 2 gün	Isıl işleme kıyasla HHP uygulamaları, askorbik asit, rutin, toplam fenolik madde içeriği ve toplam antioksidan aktivitenin anlamlı derecede daha yüksek düzeyde korunmasını sağlamıştır. Ayrıca, HHP ile işlenen örneklerde aldehit, alkol ve keton konsantrasyonlarının ısıl	Chen ve ark. (2015)

		işleme göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.	

Ohmik Isıtma (OH)

Ohmik Isıtma (OH), gıdanın içinden geçirilen elektrik akımı sayesinde ısının doğrudan ürün bünyesinde oluşturulduğu, gelişmekte olan bir ısıl işleme teknolojisidir. Şekil 2'de gösterildiği üzere, sıvı gıdaların ohmik ısıtma (OH) ile işlenmesine yönelik tipik endüstriyel tasarımda, her bir modülün uç noktalarında yer alan iki flanş arasında yüksek bir elektrik potansiyeli (genellikle yaklaşık 5000 V) uygulanmaktadır. Bu sistemde, modül içerisinden akış halinde bulunan gıda ürünü elektriksel bir direnç görevi görmekte ve yüksek frekanslı elektrik akımı (genellikle 20–30 kHz aralığında) doğrudan gıdanın içinden geçmektedir. Elektrik akımının geçişi sırasında oluşan Joule etkisi sayesinde sıcaklık artışı hızlı ve homojen bir şekilde gerçekleşmekte, böylece iletim ve taşınım gibi geleneksel ısı transfer mekanizmalarına olan gereksinim ortadan kalkmaktadır (Vignali ve ark., 2022). OH, geleneksel ısıl işlemlere (TT) kıyasla çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmekte olup, daha hızlı ve homojen ısıtma sağlaması sayesinde daha kısa işlem süreleri ile etkili bir pastörizasyon imkânı sunmaktadır (Darvishi ve ark., 2013; Fadavi ve Salari, 2019). Örneğin portakal suyunda gerçekleştirilen çalışmalarda, OH uygulamasında 80°C/dk gibi yüksek ısıtma hızlarına ulaşılabilirken, TT uygulamasında bu hızın yalnızca 2°C/dk olduğu bildirilmiştir (Achir ve ark., 2016). OH işleminin şiddeti temel olarak uygulanan voltaj gradyanı ve gıdanın elektriksel iletkenliği ile belirlenmektedir. Bununla birlikte, askıda bulunan partiküllerin boyutu, katı-sıvı oranı, iyon içeriği ve uygulanan akımın frekansı gibi faktörler de işlem etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir (Doan ve ark., 2022). Meyve suları, yüksek su içeriği ve çözünmüş iyonik tuzlar içermeleri nedeniyle yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olduklarından, OH uygulamaları için oldukça uygun bir matriks oluşturmaktadır (Millers ve Silva, 2012). Kısa işlem süresi sayesinde OH ile işlenen gıdaların besinsel ve duyusal özellikleri, taze veya minimal işlem görmüş ürünlere oldukça benzerlik göstermektedir (Leizerson ve Shimoni, 2005; Petruzzi ve ark., 2017). Örneğin, OH ile işlenmiş portakal suyunda, dekanal, oktanal, limonen, pinen ve mirsen gibi aroma açısından arzu edilen uçucu bileşiklerin konsantrasyonunun, hem TT ile işlenmiş hem de taze portakal suyuna kıyasla daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Leizerson ve Shimoni, 2005).



Şekil 2. Ohmik Isıtma (OH) için örnek şema (Vignali ve ark., 2022).

Buna ek olarak, OH uygulamasının meyve sularında karakteristik renk bileşiklerinin korunmasında da avantaj sağladığı bildirilmektedir. Özellikle cis-violaksantin, lutein, zeaksantin, cis-anteraksantin ve β-kriptoksantin gibi karotenoidlerin, aynı pastörizasyon etkisi hedeflendiğinde TT'ye kıyasla OH uygulamasında daha yüksek oranda korunduğu belirlenmiştir (Achir ve ark., 2016). Sarkis ve ark. (2013), yaban mersini püresinde TT uygulamasının, düşük voltajda (160 V) uygulanan OH'ye kıyasla antosiyaninlerde daha yüksek bozulmaya neden olduğunu raporlamıştır. Ancak bu düşük voltaj seviyelerinde OH ve TT uygulamaları arasında ısınma süresi açısından belirgin bir fark gözlenmemiştir.

OH uygulamasında daha yüksek voltajlar kullanıldığında işlem süresi önemli ölçüde kısalabilmekte; ancak bu durumda, elektrokimyasal bozunma etkileri nedeniyle antosiyanin kaybının TT uygulamasına kıyasla daha yüksek olabildiği bildirilmiştir (Sarkis ve ark., 2013). Benzer şekilde, Darvishi ve ark. (2019), OH uygulaması sonrasında üzüm suyunda organik asitlerin elektrokimyasal bozunmaya uğrayabileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, OH'nin gıda kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilirken, uygulanan elektrik alanın yol açabileceği ısıl olmayan (non-termal) etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir; zira bu etkiler, duyusal özelliklere katkıda bulunan bileşiklerin elektrokimyasal olarak bozunmasına neden olabilmektedir (Kaur ve ark., 2016). Meyve ve sebze sularına OH ve TT uygulamalarının ürün üzerindeki etkilerini karşılaştıran çalışmalardan elde edilen temel bulgular Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Meyve-Sebze Sularında OH işlemlerinin Son Ürüne Etkileri

Meyve-Sebze Suyu	İşleme, depolama koşulları	Etkiler	Kaynak
Elma Suyu	OH: 20 kHz, 30 60 V/cm, 60 s	OH ile işlenmiş meyve suyunun rengi, işlenmemiş meyve suyuna kıyasla değişmemiştir.	Park ve ark. (2017)
Yaban mersini püresi	OH: 60 Hz, 90°C/2 dk, 160, 200 ve 240 V değişen voltajlarda TT: 90°C/2 dk	200 ve 240 V'da, OH ile işlenmiş meyve suyunda antosiyanin bozulması TT ile işlenmiş meyve suyuna kıyasla daha yüksek olmuştur. Antosiyaninlerin korunması, TT ile işlenmiş meyve suyu ile 160 V'da yapılan OH işlemi arasında önemli bir fark göstermemiştir.	Sarkis ve ark. (2013)
Kan Portakalı Suyu	OH ve TT için 70°C'de 50 dk ve 150 dk	Likopen ve β-karoten, uygulanan işlem tekniğinden bağımsız olarak stabil kalmıştır. Buna karşılık, ksantofil bozunumu TT ile işlenen meyve suyunda, OH ile işlenen meyve suyuna kıyasla belirgin ölçüde daha yüksek bulunmuştur.	Achir ve ark. (2016)
Vişne Suyu konsantresi	OH: 50 Hz frekansta 8.3, 9.7, 11.1, 12.5 ve 13.9 V/cm TT: Isıtıcı plakada, %40 nem kaybı sağlanana kadar sürdürülmüştür.	İşleme bağlı olarak asitlik azalmış olup, TT ve OH ile işlenen meyve suyu örneklerinde asitlik düzeylerinin birbirine benzer olduğu bildirilmiştir. İşlem sonrasında bulanıklığın arttığı belirlenmiştir. Bulanıklık artışı, TT ile işlenen örneklerde düşük voltajlı OH ile işlenen örneklere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte, yüksek voltajlı OH ile işlenen örneklerde gözlenen bulanıklık	Norouzi ve ark. (2021)

		artışı, TT ile işlenen örneklere kıyasla daha fazla olmuştur. TT ile işlenen meyve suyunun rengi, taze meyve suyuna kıyasla anlamlı derecede farklılık göstermiştir. Buna karşılık, OH ile işlenen meyve suyunda renk değişimi taze meyve suyuna göre anlamlı bulunmamış ve OH işleminde renk değişiminin uygulanan voltajdan bağımsız olduğu belirlenmiştir.	
Üzüm suyu konsantresi	OH: 50 Hz frekansta 15, 20, 25 ve 30 V/cm TT: Laboratuvar tipi bir sıcak plaka, nem içeriği %22 seviyesine ulaşıncaya kadar sürdürülmüştür.	İşleme sonrasında toplam çözünür katı madde içeriği artmış olmakla birlikte, uygulanan işlemler arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Titre edilebilir asitlik ise işlem sonrası önemli ölçüde azalmış ve OH ile işlenen meyve suyunda, TT ile işlenen meyve suyuna kıyasla daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Duyusal değerlendirme sonuçlarına göre, OH ile işlenen meyve suyunun duyusal puanları TT ile işlenen meyve suyuna kıyasla daha yüksek bulunmuştur.	Darvishi ve ark. (2020)
Portakal suyu	OH: 90, 120 ve 150 °C sıcaklıklarda sırasıyla 1,13; 0,85 ve 0,68 saniye bekletme süreleriyle uygulanmıştır. TT işlemi ise 90 °C'de 50 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir.	OH şiddeti arttıkça esmerleşme indeksi artmıştır. Duyusal panel, taze meyve suyuna kıyasla renk açısından anlamlı fark olmadığını bildirmiştir. Panelistler, taze ve TT uygulanmış meyve suları arasındaki farkı ayırt edebilmiş, ancak taze ve	Leizerson ve Shimoni (2005)

		OH uygulanmış meyve suları arasında fark saptayamamıştır. Genel olarak taze, OH ve TT uygulanmış meyve suları arasında renk açısından anlamlı fark bulunmamıştır. Portakal suyunda aroma bileşikleri, OH uygulanmış örneklerde TT'ye göre daha yüksek bulunmuştur. 90°C ve 120°C'de uygulanan OH, karakteristik aroma bileşiklerinin içeriğini artırmıştır.	
Ejder meyvesi suyu	OH: 60 Hz ve 30 V/cm, sıcaklık 20°C'den 85°C'ye 51 saniyede yükseltilmiş ve ardından 85°C'de 60 saniye boyunca muhafaza edilmiştir. TT: 85°C sıcaklığa 300 saniyede ulaşılmış ve daha sonra bu sıcaklıkta 60 saniye tutulmuştur. Depolama: 4°C'de 8 hafta	Toplam çözünür kuru madde ve asitlik düzeyleri, taze meyve suyu ile OH ve TT uygulanmış meyve suları arasında aynı bulunmuştur. Depolama süresine bağlı olarak bu parametrelerde meydana gelen değişimlere ilişkin herhangi bir sonuç rapor edilmemiştir. Renk: Her iki işleme tekniği de, taze meyve suyuna kıyasla meyve suyunun renginde anlamlı bir değişikliğe yol açmamış; bu durum, karakteristik renk bileşiği olan β-siyanin düzeylerinin değişmemesiyle doğrulanmıştır. Ancak depolama süresi boyunca, hem TT hem de OH uygulanmış meyve sularında β-siyanin içeriği ve buna bağlı olarak renk, taze ürüne kıyasla kademeli olarak azalmıştır. Renk	Doan et al. (2023)

		bozunmasının, TT uygulanmış meyve suyunda OH uygulamasına göre daha hızlı gerçekleştiği bildirilmiştir.	
Aloevera suyu	OH: 50 Hz frekansta 15, 20, 25 ve 30 V/cm TT: 90°C 1 dk Depolama: 4°C ve 25°C'de 30 gün	Her iki pastörizasyon yöntemi C vitamini kaybına yol açmıştır; kayıp ohmik ısıtmada daha fazladır. Toplam fenolik madde içeriği artmış, artış ohmik pastörizasyonda daha belirgin olmuştur. Esmerleşme indeksi pastörizasyon sonrası artmış, yöntemler arasında fark görülmemiştir. Depolamada fenolikler stabil kalırken, C vitamini ve glukomannan azalmıştır. Esmerleşme, özellikle 25°C'de daha belirgin artmıştır.	Saberian ve ark., (2015)
Şeker kamışı suyu	OH: 60, 70, 75 ve 80°C 3.57–4.39 V/cm 2.0, 3.0, 3.5 ve 4.0 dk TT: 60, 70, 75 ve 80°C 2.0, 3.0, 3.5 ve 4.0 dk	OH uygulaması sonrasında şeker kamışı suyunda toplam fenolik bileşik miktarı maksimum %23 oranında azalma gözlenmiştir. OH ve TT uygulamaları karşılaştırıldığında, işlem koşulları eşit olmasına rağmen OH etkisinin daha belirgin olduğu rapor edilmiştir.	Brochier ve ark. (2016)

Ultrasonikasyon

Ultrasonikasyon, gıda sektöründe ortaya çıkan ısıl olmayan (non-termal) bir teknoloji olmakla birlikte, kimya, çevre ve malzeme gibi diğer işleme sektörlerinde uzun süredir kullanılan köklü bir tekniktir (Chemat ve ark., 2011). Ultrason, insan kulağının duyabileceği frekans aralığının üzerinde, yani 20 kHz'in üzerindeki frekanslara sahip ses dalgaları olarak tanımlanmaktadır (Jadhav ve ark., 2021). Ultrasonik dalgalar bir ortamdan geçerken ardışık genleşme ve sıkışma döngülerine neden olur; bu süreçte ortamda bulunan çözünmüş gazlar nedeniyle mikroskobik boşluklar

(kaviteler) oluşur. Kavitelerin belirli bir kritik boyuta ulaştıktan sonra çökmesiyle birlikte yüksek enerji açığa çıkar ve lokal sıcak noktaları meydana gelir. Bu durum, ortamda ısı ve kütle transfer hızlarının artmasına yol açar (Bhangu ve Ashokkumar (2016). Ultrasonikasyon, özellikle organik bileşiklerin kimyasal sentezinde reaksiyon hızını ve verimini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun temel nedeni, ultrasonik etkinin ısı ve kütle transferini iyileştirerek reaksiyon süresini kısaltmasıdır. Ultrasonikasyon uygulamaları frekans aralıklarına göre düşük, orta ve yüksek frekanslı olarak sınıflandırılmakta olup; bu aralıklar sırasıyla 20 kHz–100 kHz, 100 kHz–1 MHz ve 1 MHz–100 MHz olarak tanımlanmaktadır (Mason ve ark., 2015). Düşük frekanslı ultrasonikasyon ortamda yüksek kesme kuvvetleri oluştururken, yüksek frekanslı ultrasonikasyon daha sınırlı mekanik etki meydana getirir. Orta frekanslı ultrasonikasyon ise serbest radikal oluşumunu teşvik etmekte ve bu nedenle birçok sonokimyasal süreç için optimum kabul edilmektedir. Bununla birlikte, radikal oluşumu lipit ve proteinlerde oksidatif değişikliklere yol açarak gıdalarda istenmeyen kalite kayıplarına neden olabilmektedir (Delmas ve, Barthe, 2015). Gıda işlemede ultrasonikasyon genellikle sıvı çözeltiye veya meyve suyuna daldırılan bir ultrasonik prob (horn) aracılığıyla ya da ultrasonik banyo sistemleri kullanılarak uygulanmaktadır. Ultrasonik banyolarda gıda maddesi veya ambalajlı ürün, ses dalgalarının oluşturulduğu bir ortamda tutulmakta ve bu sayede hedeflenen fiziksel veya kimyasal değişimler sağlanmaktadır (Li ve ark., 2021). Gıda işleme uygulamalarında özellikle 20 kHz–100 kHz frekans aralığı; biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonu, emülsifikasyon, pişirme, acılığın giderilmesi ve sentez yoğunlaştırması gibi birçok işlemde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ultrasonikasyon ayrıca moleküllerin arayüzey transferini kolaylaştırarak bitkisel ve hayvansal kaynaklardan biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyon verimliliğini artırmaktadır. Bu yöntem yalnızca ekstraksiyon verimini yükseltmekle kalmamakta, aynı zamanda elde edilen bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini de iyileştirmektedir (Jadhav ve ark., 2021). Campoli ve arkadaşları (2018), guava suyuna uygulanan yüksek güçlü ultrasonik işlemin ürünün mikro yapısı, fiziksel özellikleri ve özellikle likopenin in vitro erişilebilirliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada guava suyu, 20 kHz frekansta ve farklı işlem sürelerinde ultrasonikasyona tabi tutulmuş; ultrasonik işlemin hücresel yapı, partikül boyutu dağılımı, fiziksel stabilite ve likopen davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, ultrasonikasyonun kavitasyon etkisiyle hücre duvarlarını bozarak hücre içi bileşenlerin salınımını kolaylaştırdığını ve bu yapısal değişimlerin likopenin sindirim sistemi koşullarını simüle eden in vitro ortamda erişilebilirliğini anlamlı düzeyde artırdığını göstermiştir. Bu sonuçlar, ultrasonik işlemin toplam likopen miktarını kısmen azaltabilmesine rağmen, biyolojik açıdan daha önemli olan erişilebilir fraksiyonu artırabildiğini ortaya koymaktadır. Zhang ve ark (2019), domates suyuna uyguladıkları yüksek basınçlı homojenizasyon (HPH) ve

ultrasonikasyon (US) işlemlerinin ürünün fiziksel stabilitesi ve karotenoidlerin in vitro biyoerişilebilirliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Araştırmada domates suyu, farklı basınç seviyelerinde HPH ve belirli frekans, güç ve süre kombinasyonlarında ultrasonik işleme tabi tutulmuş; bu işlemlerin partikül boyutu dağılımı, faz ayrımı davranışı, renk özellikleri ve karotenoid fraksiyonlarının sindirim simülasyonu koşullarındaki erişilebilirliği üzerindeki etkileri incelemiştir. Elde edilen bulgular, her iki teknolojinin de hücresel yapıyı parçalayarak karotenoidlerin matriksten salınımını kolaylaştırdığını, ancak HPH ile kombine veya tek başına uygulanan ultrasonikasyonun, karotenoidlerin micellar faza geçişini artırarak in vitro biyoerişilebilirliği anlamlı düzeyde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, ısıl olmayan bu iki ileri işleme teknolojisinin domates suyu gibi karotenoid açısından zengin içeceklerde fonksiyonel kaliteyi artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Mukhtar ve arkadaşları (2024), karpuz–pancar suyu karışımına uygulanan termal işlem, ultrasonikasyon (US) ve termosonikasyon (TS) uygulamalarının ürünün kalite profili üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmada 50:50 oranında formüle edilen karpuz–pancar suyu karışımı; termal işlem (95–100 °C, 4 dk), US (25 kHz, 5 ve 10 dk) ve TS (25 kHz; 40 ve 50 °C'de uygulama) koşullarında işlenmiş ve işlemlerin ürünün fizikokimyasal özellikleri (renk, pH, titrasyon asitliği ve çözünür kuru madde gibi), biyoaktif bileşenleri/antioksidan kapasitesi ile mikrobiyolojik yükü üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları, özellikle ultrason temelli uygulamaların kavitasyon kaynaklı yapısal etkilerle matrise bağlı bileşenlerin serbestleşmesini destekleyerek kalite parametrelerini iyileştirebildiğini ve termal işleme kıyasla bazı kalite bileşenlerinin korunması açısından avantaj sağlayabildiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Meyve ve sebze sularında kalite, günümüzde yalnızca mikrobiyal güvenliğin sağlanması ve raf ömrünün uzatılması ile sınırlı kalmayıp; biyoaktif bileşenlerin korunması ve taze ürüne özgü renk, aroma, tat ve doku özelliklerinin sürdürülebilmesini de kapsayan çok boyutlu bir yaklaşım hâline gelmiştir. Bu kapsamda literatürde yer alan bulgular, konvansiyonel ısıl işlemlerin (TT) mikrobiyal inaktivasyon açısından etkin olmasına rağmen, yüksek sıcaklık ve uzun işlem süreleri nedeniyle besinsel ve duyusal kalite üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiğini bildirmektedir. Buna karşılık ısıl olmayan veya minimal ısıl etkiye sahip yenilikçi teknolojilerin, birçok meyve ve sebze suyu matriksinde daha yüksek kalite sağlayabildiğini ortaya koymaktadır. Özellikle pigmentler, vitaminler, fenolik bileşikler ve aroma aktif bileşenler gibi ısıya duyarlı bileşenlerin korunmasında bu alternatif teknolojilerin belirgin avantajlar sunduğu görülmektedir. Yüksek basınçlı

işlem (HPP), düşük sıcaklıkta uygulanması ve kovalent bağlar üzerinde sınırlı etkisi sayesinde pigmentler, vitaminler ve antioksidanlar gibi düşük molekül ağırlıklı bileşiklerin daha iyi korunmasına olanak tanımakta; aynı zamanda mikrobiyal yükü etkin biçimde azaltarak soğuk zincirde raf ömrünü uzatabilmektedir. Bununla birlikte, renk ve bulanıklık gibi kalite parametrelerinde gözlenen değişimlerin ürün matriksine, basınç şiddetine ve depolama koşullarına bağlı olduğu; bazı ürünlerde enzimlerin tam inaktivasyonunun sağlanamayabileceği dikkate alınmalıdır. Ohmik ısıtma (OH) ise hızlı ve homojen ısınma avantajıyla termal hasarı azaltarak özellikle aroma bileşiklerinin ve bazı karotenoidlerin korunmasını destekleyebilir. Ancak yüksek voltaj gradyanlarında elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle antosiyanin kaybı veya organik asitlerin bozunumu gibi istenmeyen etkiler görülebileceğinden, proses tasarımı ve parametre optimizasyonu kritik önem taşımaktadır. Ultrasonikasyon (US) ve termosonikasyon (TS) uygulamaları, kavitasyon kaynaklı hücre duvarı yıkımı ve partikül boyutu küçülmesi yoluyla biyoaktif bileşiklerin matriksten salınımını artırabilir; bu durum, bazı bileşiklerde toplam içerik azalabilse bile in vitro erişilebilirlik/biyoerişilebilirliğin artmasına neden olabilir. Genel olarak, ısıl olmayan teknolojiler meyve ve sebze suyu endüstrisinde kalite kayıplarını azaltma ve fonksiyonelliği artırma açısından güçlü seçenekler sunmaktadır. Ancak endüstriyel ölçekte yaygınlaşma için ürün bazlı optimizasyon çalışmalarının artırılması, ekipman/sermaye maliyetlerinin düşürülmesi, proses standardizasyonu ve tüketici kabulünü destekleyecek şeffaf bilgilendirme stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

REFERANSLAR

Aaby, K., Grimsbo, I.H., Hovda, M. B., and Rode, T. M. (2018). Effect of high pressure and thermal processing on shelf life and quality of strawberry purée and juice. Food Chem. 260, 115–123. doi:10.1016/j.foodchem.2018.03.100

Achir, N., Dhuique-Mayer, C., Hadjal, T., Madani, K., Pain, J.-P., and Dornier, M. (2016). Pasteurization of citrus juices with ohmic heating to preserve the carotenoid profile. Innovative Food Sci. Emerg. Technol. 33, 397–404. doi:10.1016/j.ifset.2015.11.002

Aganovic, K., Grauwet, T., Siemer, C., Toepfl, S., Heinz, V., Hendrickx, M., et al. (2015). Headspace fingerprinting and sensory evaluation to discriminate between traditional and alternative pasteurization of watermelon juice. Eur. Food Res. Technol. 242, 787–803. doi:10.1007/s00217-015-2586-8

Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., and Hiremath, N. (2005). The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and colour of mango pulp. Int. J. Food Sci. Technol. 40, 885–895. doi:10.1111/j.1365-2621.2005.01026.x

Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R., Watson, D. G., and Pratap-Singh, A. (2021). Ohmic heating in the food industry: developments in concepts and applications during 2013–2020. Appl. Sci. 11, 2507. doi:10.3390/app11062507

Andrés, V., Mateo-Vivaracho, L., Guillamón, E., Villanueva, M. J., & Tenorio, M. D. (2016). High hydrostatic pressure treatment and storage of soy-smoothies: Colour, bioactive compounds and antioxidant capacity. LWT-Food science and technology, 69, 123-130.

Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frigola, A. (2010). Ascorbic acid is the only bioactive that is better preserved by high hydrostatic pressure than by thermal treatment of a vegetable beverage. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(18), 10070-10075.

Baxter, I. A., Easton, K., Schneebeli, K., and Whitfield, F. B. (2005). High pressure processing of Australian navel orange juices: sensory analysis and volatile flavor profiling. Innovative Food Sci. Emerg. Technol. 6, 372–387. doi:10.1016/j.ifset.2005.05.005

Bhangu SK, Ashokkumar M. Theory of sonochemistry. Top Curr Chem. (2016) 374:1–28. doi: 10.1007/978-3-319-54271-3_1

Bharate, S. S., and Bharate, S. B. (2012). Non-enzymatic browning in citrus juice: chemical markers, their detection and ways to improve product quality. J. Food Sci. Technol. 51, 2271–2288. doi:10.1007/s13197-012-0718-8

Błaszczak, W., Amarowicz, R., & Górecki, A. R. (2017). Antioxidant capacity, phenolic composition and microbial stability of aronia juice subjected to high hydrostatic pressure processing. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 39, 141-147.

Brochier, B.; Mercali, G. D.; Marczak, L. D. F. Influence of Moderate Electric Field on Inactivation Kinetics of Peroxidase and Polyphenol Oxidase and on Phenolic Compounds of Sugarcane Juice Treated by Ohmic Heating. LWT - Food Sci. Technol. 2016, 74, 396–403. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.08.001.

Butz, P., Edenharder, R., García, A. F., Fister, H., Merkel, C., and Tauscher, B. (2002). Changes in functional properties of vegetables induced by high pressure treatment. Food Res. Int. 35, 295–300. doi:10.1016/s0963-9969(01)00199-5

Campoli, S. S., Rojas, M. L., do Amaral, J. E. P. G., Canniatti-Brazaca, S. G., & Augusto, P. E. D. (2018). Ultrasound processing of guava juice: Effect on structure, physical properties and lycopene in vitro accessibility. *Food Chemistry*, *268*, 594-601.

Cao, S.-Q., Liu, L., and Pan, S.-Y. (2011). Thermal degradation kinetics of anthocyanins and visual color of blood orange juice. Agric. Sci. China 10, 1992–1997. doi:10.1016/s1671-2927(11)60201-0

Chang, Y.-H., Wu, S., Chen, B., Huang, H., and Wang, C.-Y. (2017). Effect of highpressure processing and thermal pasteurization on overall quality parameters of White grape juice. J. Sci. Food Agric. 97, 3166–3172. doi:10.1002/jsfa.8160

Chemat F, Zill-E-Huma, Khan MK. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. Ultrason Sonochem. (2011) 18:813–35. doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023

Chen, C., Zhao, W., Yang, R., and Zhang, S. (2012). Effects of pulsed electric field on colloidal properties and storage stability of carrot juice. Int. J. Food Sci. Technol. 47, 2079–2085. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03072.x

Chen, X., Qin, W., Ma, L., Xu, F., Jin, P., & Zheng, Y. (2015). Effect of high pressure processing and thermal treatment on physicochemical parameters, antioxidant

activity and volatile compounds of green asparagus juice. LWT-Food Science and Technology, 62(1), 927-933.
Darvishi, H., Khostaghaza, M. H., and Najafi, G. (2013). Ohmic heating of pomegranate juice: electrical conductivity and pH change. J. Saudi Soc. Agric. Sci. 12, 101–108. doi:10.1016/j.jssas.2012.08.003
Darvishi, H., Koushesh Saba, M., Behroozi-Khazaei, N., & Nourbakhsh, H. (2020). Improving quality and quantity attributes of grape juice concentrate (molasses) using ohmic heating. Journal of Food Science and Technology, 57(4), 1362-1370.
De Ancos, B., Gonzalez, E., and Cano, M. P. (2000). Effect of high-pressure treatment on the carotenoid composition and the radical scavenging activity of persimmon fruit purees. J. Agric. Food Chem. 48, 3542–3548. doi:10.1021/jf990911w
Delmas H, Barthe L. Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications. In: Gallego J, Karl F, Juan A, editors. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge: Elsevier Ltd. (2015). p. 757–91. doi: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00025-9
Doan, N. K., Hu'o'ng, N. T. L., Le, N. T., Tuan, P. M., Uyên, P. T. X., Lai, Đ. Q., et al. (2023). Effects of ohmic heat processing and ascorbic acid on antioxidant compounds and colour of red-fleshed dragon (Hylocereus polyrhizus) fruit juice during storage. Int. J. Food Sci. Technol. 58, 3819–3826. doi:10.1111/ijfs.16483
Dörnenburg, H., and Knorr, D. (1993). Cellular permeabilization of cultured plant tissues by high electric field pulses or ultra high pressure for the recovery of secondary metabolites. Food Biotechnol. 7, 35–48. doi:10.1080/08905439309549844
Elamin, W. M., Endan, J. B., Yosuf, Y. A., Shamsudin, R., & Ahmedov, A. (2015). High pressure processing technology and equipment evolution: a review. Journal of Engineering Science & Technology Review, 8(5).
Engmann, N. F., Ma, Y. K., Ying, X., & Qing, Y. (2013). Investigating the Effect of High Hydrostatic Pressure Processing on Anthocyanins Composition of Mulberry (Morus moraceae) Juice. Czech Journal of Food Sciences, 31(1).
Fadavi, A., and Salari, S. (2019). Ohmic heating of lemon and grapefruit juices under vacuum pressure— comparison of electrical conductivity and heating rate. J. Food Sci. 84, 2868–2875. doi:10.1111/1750-3841.14802
Farkas, D. F., & Hoover, D. G. (2000). High pressure processing. Journal of food science, 65, 47-64.
Garcia-Palazon, A., Suthanthangjai, W., Kajda, P., and Zabetakis, I. (2004). The effects of high hydrostatic pressure on β-glucosidase, peroxidase and polyphenoloxidase in red raspberry (Rubus idaeus) and strawberry (Fragaria×ananassa). Food Chem. 88, 7–10. doi:10.1016/j.foodchem.2004.01.019
Georget, E., Sevenich, R., Reineke, K., Mathys, A., Heinz, V., Callanan, M., et al. (2015). Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: a review. Innovative Food Sci. Emerg. Technol. 27, 1–14. doi:10.1016/j.ifset.2014.10.015
Hao, H., Zhou, T., Koutchma, T., Wu, F., & Warriner, K. (2016). High hydrostatic pressure assisted degradation of patulin in fruit and vegetable juice blends. Food control, 62, 237-242.

Houška, M., Silva, F. V. M., Evelyn, Buckow, R., Terefe, N. S., and Tonello, C. (2022). High pressure processing applications in plant foods. Foods 11, 223. doi:10.3390/foods11020223

Hu, Y.-H., Wang, C.-Y., and Chen, B.-Y. (2020). Effects of high-pressure processing and thermal pasteurization on quality and microbiological safety of jabuticaba (Myrciaria cauliflora) juice during cold storage. Journal of Food Science and Technology 57, 3334–3344. doi:10.1007/s13197-020-04366-w

Huang, B., Li, H., and Xu, T. (2020). Experimental investigation of the flow and heat transfer characteristics in microchannel heat exchangers with reentrant cavities. Micromachines 11 (4), 403. doi:10.3390/mi11040403

Huang, H. W., Lung, H. M., Yang, B. B., & Wang, C. Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. Food Control, 40, 250-259.

Huang, W., Bi, X., Zhang, X., Liao, X., Hu, X., & Wu, J. (2013). Comparative study of enzymes, phenolics, carotenoids and color of apricot nectars treated by high hydrostatic pressure and high temperature short time. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 18, 74-82.

Jadhav, H. B., Annapure, U. S., & Deshmukh, R. R. (2021). Non-thermal technologies for food processing. Frontiers in Nutrition, 8, 657090.

Junqueira-Gonçalves, M. P., Galotto, M. J., Valenzuela, X., Dinten, C. M., Aguirre, P., and Miltz, J. (2011). Perception and view of consumers on food irradiation and the Radura symbol. Radiation Physics and Chemistry 80, 119–122. doi:10.1016/j.radphyschem.2010.08.001

Kaur, R., Gul, K., and Singh, A. K. (2016). Nutritional Impact of Ohmic heating on fruits and vegetables-A review. Cogent Food and Agriculture 2. doi:10.1080/23311932. 2016.1159000

Keenan, D. F., Rößle, C., Gormley, R., Butler, F., & Brunton, N. P. (2012). Effect of high hydrostatic pressure and thermal processing on the nutritional quality and enzyme activity of fruit smoothies. LWT-Food Science and Technology, 45(1), 50-57.

Leizerson, S.; Shimoni, E. Effect of Ultrahigh-Temperature Continuous Ohmic Heating Treatment on Fresh Orange Juice. Agric. Food Chem. 2005, 53(9), 3519–3524. DOI: 10.1021/jf0481204.

Li W, Gamlath CJ, Pathak R, Martin GJO, Ashokkumar M. Ultrasound – the physical and chemical effects integral to food processing. In: Knoerzer K, Juliano P, Smithers G, editors. Innovative Food Processing Technologies. Cambridge (2021). p. 329–58. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22679-6

Liang, Z., Fang, Z., Pai, A., Luo, J., Gan, R., Gao, Y., et al. (2020). Glycosidically bound aroma precursors in fruits: a comprehensive review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 62, 215–243. doi:10.1080/10408398.2020.1813684

Martins, I. B. A., Oliveira, D., Rosenthal, A., Ares, G., and Deliza, R. (2019). Brazilianconsumer's perception of food processing technologies: a case study with fruit juice. Food Research International 125, 108555. doi:10.1016/j.foodres.2019.108555

Mason TJ, Chemat F, Ashokkumar M. Power ultrasonics for food processing. In: Ashokkumar M, editor. Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge: Elsevier Ltd. (2015). p. 815– 43. doi: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00027-2

Millers, F. A., and Silva, C. L. M. (2012). “Thermal treatment effects in fruit juices,” in Advances in fruit processing technologies. Editors S. Rodrigues, and F. A. N. Fernandes (Boca Raton: CRC Press), 363–383.

Mukhtar, K., Nabi, B. G., Manzoor, M. F., Zia, S., Bhat, Z. F., Hussain, S., & Aadil, R. M. (2024). Impact of thermal, ultrasonication, and thermosonication processes on the quality profile of watermelon-beetroot juice blend: a comparative study. Journal of Food Processing and Preservation, 2024(1), 5518914.

Norouzi, S., Fadavi, A., & Darvishi, H. (2021). The ohmic and conventional heating methods in concentration of sour cherry juice: Quality and engineering factors. Journal of Food Engineering, 291, 110242.

Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., and Martín-Belloso, O. (2008). Changes of health-related compounds throughout cold storage of tomato juice stabilized by thermal or high intensity pulsed electric field treatments. Innovative Food Science and Emerging Technologies 9, 272–279. doi:10.1016/j.ifset.2007.07.009

Oey, I., Lille, M., Van Loey, A., and Hendrickx, M. (2008). Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: a review. Trends in Food Science and Technology 19, 320–328. doi:10.1016/j.tifs.2008.04.001

Park, I.-K., and Kang, D.-H. (2013). Effect of electropermeabilization by ohmic heating for inactivation of Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica serovar typhimurium, and Listeria monocytogenes in buffered peptone water and apple juice. Applied and Environmental Microbiology 79, 7122–7129. doi:10.1128/aem.01818-13

Patterson, M. F. (2005). Microbiology of pressure-treated foods. Journal of applied microbiology, 98(6), 1400-1409.

Patterson, M. F., McKay, A. M., Connolly, M., & Linton, M. (2012). The effect of high hydrostatic pressure on the microbiological quality and safety of carrot juice during refrigerated storage. Food Microbiology, 30(1), 205-212.

Perez-Cacho, P. R., and Rouseff, R. (2008). Processing and storage effects on orange juice aroma: a review. Journal of Agricultural and Food Chemistry 56, 9785–9796. doi:10.1021/jf801244j

Perez-Cacho, P. R., Mahattanatawee, K., Smoot, J. M., and Rouseff, R. (2007). Identification of sulfur volatiles in canned orange juices lacking orange flavor. Journal of Agricultural and Food Chemistry 55, 5761–5767. doi:10.1021/jf0703856

Petruzzi, L., Campaniello, D., Speranza, B., Corbo, M. R., Sinigaglia, M., and Bevilacqua, A. (2017). Thermal treatments for fruit and vegetable juices and beverages: a literature overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 16, 668–691. doi:10.1111/1541-4337.12270

Podolak, R., Whitman, D., & Black, D. G. (2020). Factors affecting microbial inactivation during high pressure processing in juices and beverages: A review. Journal of Food Protection, 83(9), 1561-1575.

Polak, N., Kalisz, S., & Kruszewski, B. (2024). High-temperature short-time and ultra-high-temperature processing of juices, nectars and beverages: influences on enzyme, microbial inactivation and retention of bioactive compounds. Applied Sciences, 14(19), 8978.

Priyadarshini, A., Rajauria, G., O'Donnell, C. P., and Tiwari, B. K. (2018). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 59, 3082–3101. doi:10.1080/10408398.2018.1483890

Rao, L., Guo, X., Pang, X., Tan, X., Liao, X., & Wu, J. (2014). Enzyme activity and nutritional quality of peach (Prunus persica) juice: Effect of high hydrostatic pressure. International Journal of Food Properties, 17(6), 1406-1417.

Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., Balasubramaniam, V. M., Niranjan, K., and Knorr, D. (2007). Opportunities and challenges in high pressure processing of foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 47, 69–112. doi:10.1080/10408390600626420

Rios-Corripio, G., Welti-Chanes, J., Rodríguez-Martínez, V., and Guerrero- Beltrán, J. Á. (2020). Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of a fermented pomegranate (Punica granatumL.) beverage. Innovative Food Science and Emerging Technologies 59, 102249. doi:10.1016/j.ifset.2019.102249

Rocha, C. D. S., Magnani, M., De Paiva Anciens Ramos, G. L., Bezerril, F. F., Freitas, M. Q., Cruz, A. G., et al. (2022). Emerging technologies in food processing: impacts on sensory characteristics and consumer perception. Current Opinion in Food Science 47,100892. doi:10.1016/j.cofs.2022.100892

Rupasinghe, H. P. V., and Yu, L. J. (2012). "Emerging preservation methods for fruit juices and beverages," in Food additives. Editor Y. El-Samragy (Croatia: Intechopen), 66.

Saberian, H., HAMIDI, E. Z., & Abbasi, S. (2015). Effect of conventional and ohmic pasteurization on some bioactive components of aloe Vera gel juice.

Saikumar, A., Singh, A., Dobhal, A., Arora, S., Junaid, P. M., Badwaik, L. S., & Kumar, S. (2024). A review on the impact of physical, chemical, and novel treatments on the quality and microbial safety of fruits and vegetables. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 4(2), 575-597.

Santhirasegaram, V., Razali, Z., George, D. S., and Somasundram, C. (2015). Comparison of UV-C treatment and thermal pasteurization on quality of Chokanan mango (Mangifera indica L.) juice. Food and Bioproducts Processing 94, 313–321. doi:10.1016/j.fbp.2014.03.011

Sarkis, J. R., Jaeschke, D. P., Tessaro, I. C., and Marczak, L. D. F. (2013). Effects of ohmic and conventional heating on anthocyanin degradation during the processing of blueberry pulp. LWT 51, 79–85. doi:10.1016/j.lwt.2012.10.024

Song, Q., Rune, C. J. B., Thybo, A. K., Clausen, M. P., Orlien, V., and Giacalone, D. (2023). Sensory quality and consumer perception of high pressure processed orange juice and apple juice. LWT 173, 114303. doi:10.1016/j.lwt.2022.114303

Terefe, N. S., Buckow, R., and Versteeg, C. (2013). Quality-related enzymes in fruit and vegetable products: effects of novel food processing technologies, Part 1: highpressure processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 54, 24–63. doi:10. 1080/10408398.2011.566946

Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Knol, J. J., Quataert, M. C. J., Vervoort, L., Van der Plancken, I., ... & Matser, A. M. (2011). Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice. Part I: Impact on overall quality attributes. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 12(3), 235-243.

Uckoo, R. M., Jayaprakasha, G. K., Somerville, J. A., Balasubramaniam, V.M., Pinarte, M.,and Patil, B. S. (2013). High pressure processing controls microbial growth and minimally alters the levels of health promoting compounds in grapefruit (Citrus paradisi Macfad) juice. Innovative Food Science and Emerging Technologies 18, 7–14. doi:10.1016/j.ifset.2012.11.010

Van Loey, I. A., Smout, C., and Hendrickx, M. (2003). High hydrostatic pressure technology in food preservation. Food Preservation Techniques, 428–448. doi:10.1533/9781855737143.3.428

Vignali, G., Gozzi, M., Pelacci, M., & Stefanini, R. (2022). Non-conventional stabilization for fruit and vegetable juices: overview, technological constraints, and energy cost comparison. Food and Bioprocess Technology, 15(8), 1729-1747.

Wang, C., Lin, Y., Ramaswamy, H. S., Ge, L., Hu, F., Zhu, S., & Yu, Y. (2015). Storage Stability of C hinese Bayberry Juice after High Pressure or Thermal Treatment. Journal of Food Processing and Preservation, 39(6), 2259-2266.

Wang, C., Mao, M., Hu, F., Yu, Y., He, J., & Zhu, S. (2013). Comparison of sensory quality between subjective evaluation and instrument detection for cucumber juice with high pressure processing and heat treatment. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(10), 278-286.

Wang, Y., Liu, F., Cao, X., Chen, F., Hu, X., & Liao, X. (2012). Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 16, 326-334.

Wibowo, S., Essel, E. A., De Man, S., Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Grauwet, T., et al. (2019). Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. Innovative Food Science and Emerging Technologies 54, 64–77. doi:10.1016/j.ifset.2019.03.004

Wibowo, S., Essel, E. A., De Man, S., Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Grauwet, T., et al. (2019). Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. Innovative Food Science and Emerging Technologies 54, 64–77. doi:10.1016/j.ifset.2019.03.004

Worametrachanon, S., Techarang, J., Chaikham, P., & Chunthanom, P. (2014). Evaluation of quality changes of pressurized and pasteurized herbal-plant beverages during chilled storage. International Food Research Journal, 21(5).

Wu, W.-L., Xiao, G., Yu, Y., Xu, Y., Wu, J., Peng, J., et al. (2021). Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. Food Control 130, 108293. doi:10.1016/j.foodcont.2021.108293

Xu, X., Deng, J., Luo, D., Bao, Y., Liao, X., Gao, H., et al. (2018). Comparative study of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of clear and cloudy Se-enriched kiwifruit juices. Innovative Food Science and Emerging Technologies 49, 1–12. doi:10.1016/j.ifset. 2018.07.010

Zhang, N., Xu, Y., Li, X., Ren, J., Jia, X., Pan, S., et al. (2024). Factors affecting the formation of delayed bitterness in sweet orange (Citrus sinensis (L.) Osbeck) juice. Journal of Food Composition and Analysis 132, 106298. doi:10.1016/j.jfca.2024.106298

Zhang, W., Yu, Y., Xie, F., Gu, X., Wu, J., & Wang, Z. (2019). High pressure homogenization versus ultrasound treatment of tomato juice: Effects on stability and in vitro bioaccessibility of carotenoids. *Lwt*, *116*, 108597.

Zheng, X., Yu, Y., Xiao, G., Xu, Y.,Wu, J., Tang, D., et al. (2014). Comparing product stability of probiotic beverages using litchi juice treated by high hydrostatic pressure and heat as substrates. Innovative Food Science and Emerging Technologies 23, 61–67. doi:10. 1016/j.ifset.2014.01.013

Dil ve Kaynağın İçerik Sınıflandırmaya Etkisi: YouTube Transkriptleri ve Türkçe Metinler Üzerine Model Analizi

Yaren SABIR[1]
Mustafa YOLUK[2]
Elif Nur KUCUR[3]
İbrahim BAHÇEKAPILI[4]
Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN[5]
Esme Gül TOPRAK[6]
Esra YILMAZ[7]

1- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, yaren.s.ae@gmail.com, ORCID No: https://orcid.org/0009-0008-8058-1824
2- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, M.yoluk@gmail.com, ORCID No: 0009-0004-3232-2474
3- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, elifnurkucur@gmail.com, ORCID No: 0009-0005-1467-5599
4- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ibrahimbahcekapili@gmail.com, ORCID No: 0000-0002-7242-7914
5- Doç. Dr., Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, berna.altinel@marmara.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-5544-0925
6- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, esmegultoprak@gmail.com, ORCID No: 0000-0003-3452-9386
7- Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, esrahanyilmaz@gmail.com, ORCID No: 0000-0003-2411-4937

ÖZET

Bu çalışmada, metin verilerinin sınıflandırılması için çeşitli algoritmalar kullanılmıştır. Amacımız, metinleri doğru bir şekilde kategorilere ayırabilmek için farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerini incelemektir. Çalışmada, Kaggle platformundan temin edilen "YouTube API Data for Text Categorization" veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümesi, 10 farklı haber kategorisini içeren yaklaşık 270 bin örneklem sunmaktadır. Kategoriler, kültür-sanat, ekonomi, siyaset, eğitim, dünya, spor, teknoloji, magazin, sağlık ve gündem olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Hugging Face platformundaki "Interpress Turkish News Category" veri kümesi de çalışmaya dahil edilmiştir. Bu küme, yaklaşık 29 bin örneklemle 9 farklı kategori içermektedir; bu kategoriler bilim-teknoloji, yiyecek, seyahat, imalat, spor, tarih, doğa, sanat-müzik ve macera olarak tanımlanmıştır.

Çalışma, verilerin belirli ön işleme adımlarından geçirilmesinin ardından, K-Nearest Neighbors (KNN), Linear Support Vector Classification (LinearSVC), Long Short-Term Memory (LSTM),Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM), Extra Trees, Text Convolutional Neural Networks (Text-CNN), Text Graph Neural Networks (Text-GCN), Text Recurrent Neural Networks (Text-RNN), Light Gradient-Boosting Machine (LightGBM), Logistic Regression ve Random Forest gibi makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile eğitilmiş ve test edilmiştir. Veri kümesi-1 için, Text-RNN modeli, %80,30 F1-skora ulaşarak en başarılı model olarak belirlenmiştir. Veri kümesi-2 için ise Extra Trees modeli, %94,94 F1-skora ulaşarak en yüksek başarıyı elde etmiştir.

Veri ön işleme adımları, metinlerin küçük harfe dönüştürülmesi, noktalama işaretlerinin ve sayısal öğelerin temizlenmesi, fazladan boşlukların giderilmesi, durak kelimelerinin çıkarılması ve kelimelerin kök haline indirgenmesi işlemlerini içermektedir. Sonuçlar, derin öğrenme yöntemleri ve geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarının, farklı veri kümeleri ve koşullar altında değişen başarılar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – AnaVideo içerik sınıflandırması; Türkçe metin sınıflandırması; TextGCN; LightGBM; ANOVA

GİRİŞ

Günümüzde dijital içerik üretim ve tüketiminin giderek artan bir ivmeyle gelişmesi, bilgi paylaşım biçim ve araçlarını da dönüştürmektedir. Bu dönüşümde Youtube gibi video tabanlı dev içerik ağları ön plana çıkmakta olup kullanıcıların bilgiye erişiminde temel kaynaklardan biri haline gelmektedir (Li et al. 2021). Dakikada yüz binlerce videonun yüklendiği bu ortamda, içeriklerin yalnızca üretilmesi değil, aynı zamanda doğru sınıflandırılması ve etkili biçimde özetlenmesi, kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen bir gereklilik haline gelmiştir (Otter et al. 2020). Bu gereklilik doğrultusunda doğal dil işleme, metin sınıflandırma vb. analizlere ihtiyaç artmıştır (Zorapacı 2024). Bilhassa doğal dil işleme (NLP) ve makine öğrenmesi (ML) yöntemlerinin gelişimiyle birlikte, bu platformlardaki içeriklerin işlenmesi ve analiz edilmesinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir.

Türkçe videolar üzerinden gerçekleştirilen otomatik özetleme ve kategori tahminleme çalışmaları, bu gelişimin önemli bir parçasıdır. Fakat Türkçenin sondan eklemeli dil yapısı, deyimsel zenginliği, bağlam hassasiyeti ve kelime türetme özellikleri gibi yapısal özellikleri, bu dili diğer dillerden ayırmakta ve NLP modelleri açısından önemli zorluklar yaratmaktadır (Oflazer 2014). Bu durum, Türkçe video içeriklerinin işlenmesi sürecinde, daha özgül ön işleme teknikleri ve dil odaklı model yaklaşımlarının uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Video içeriklerinin anlamlı bilgiye dönüştürülmesi süreci; konuşmadan metne dönüşüm, metin özetleme ve içerik sınıflandırma aşamalarından oluşmaktadır (Zhang and Dong 2021, Kalra et al. 2019, Huang et al. 2010).

Son yıllarda bu alanda geliştirilen modeller, video başlıkları, açıklamaları, etiketleri ve transkript verilerini bir arada kullanarak anlamlı başarılar elde etmektedir. Metin sınıflandırma açısından Bidirectional Encoder Representation from Transformers (BERT), Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), Gated Recurrent Unit (GRU) gibi derin öğrenme temelli modeller, özellikle multimodal veri analizlerinde %90'ın üzerinde doğruluk oranlarına ulaşabilmektedir (Yousaf and Nawaz 2022) (Rangaswamy et al. 2016, Pokharel and Bhatta 2021, Cunha et al. 2019). YouTube videoları üzerinde yapılan çalışmalarda, içeriklerin duygusal analizleri ve konu bazlı sınıflandırmaları da öne

çıkmakta, kullanıcı yorumlarının ve içerik etiketlerinin birleştirildiği karmaşık modeller etkili sonuçlar sunmaktadır (Kavitha et al. 2020).

Öte yandan, literatürde Türkçeye özgü çalışmalar daha sınırlı sayıda olup, mevcut literatür çoğunlukla sosyal medya paylaşımlarına odaklanmaktadır. Nefret söylemi, siber zorbalık ve saldırgan dil tespiti gibi alt başlıklarda geliştirilen sistemler, Türkçeye özel dil modellerinin ne kadar gerekli olduğunu ortaya koymaktadır (Gaikwad et al. 2021, Paz, et al. 2020, Bohra et al. 2018, Modha et al. 2020). Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler arasında BERT tabanlı modeller, grafik sinir ağları, SMOTE ile dengelenmiş sınıf yapıları ve özgün öznitelik çıkarımı teknikleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, dil yapısının çeşitliliği ve düşük kaynaklı olması nedeniyle Türkçede kapsamlı video işleme sistemleri henüz yeterince gelişmiş değildir (Nasiboglu ve Gencer 2023, Yılmaz vd. 2022).

Oflazer tarafından yapılan kapsamlı bir analizde, Türkçenin doğal dil işleme açısından sahip olduğu zorluklar net biçimde ortaya konmuş olup bilhassa morfolojik çözümleme, cümle yapıları ve bağlamsal anlam çözümlemesi konularının önemine dikkat çekilmiştir. Bu doğrultuda, Türkçe video içeriklerinden bilgi çıkarımı yapmak, sadece teknik yeterlilik değil aynı zamanda dilsel derinlik gerektiren bir süreçtir.

Bu çalışmanın organizasyonu şu biçimdedir: 1. bölüm konu ile ilgili literatürdeki benzer çalışmaları içermektedir. 2. bölümde metot ve metodoloji kapsamlı biçimde anlatılırken 3. bölümde çalışmada elde edilen bulgular aktarılmıştır. Son bölümde sonuç ve gelecek çalışmalar paylaşılmıştır.

LİTERATÜR TARAMASI

Bu Video içeriklerinin otomatik olarak analiz edilmesi, özellikle YouTube gibi yüksek sayıda içerik hacmine sahip platformlar için büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda metin madenciliği, görüntü işleme ve makine öğrenmesi gibi tekniklerin bütünleşik biçimde kullanıldığı görülmektedir. Aşağıda, bu alanda yapılmış ve çalışmamıza ışık tutan dokuz farklı araştırmaya yer verilmiştir.

Ramesh ve arkadaşları (Ramesh et al. 2020), YouTube videolarının eğitsel ve eğlence temelli içeriklere ayrılmasını amaçlayan iki aşamalı bir sistem geliştirmiştir. İlk aşamada, video karelerinden alınan görseller Inception V3 modeli ile analiz edilirken; ikinci aşamada, video açıklamaları ve etiketleri gibi metinsel bilgiler ELMo ile işlenmiştir. Çalışma sonucunda

anahtar kelime temelli modelin %97,16 doğruluk sağladığı belirtilmiştir. Görsel model ise %85,6 başarı göstermiştir.

Sınıflandırma için kullanılan geleneksel yöntemler düşük başarı sağlarken, BERT gibi modellerin çok daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

Harrison vd. (2022) tarafından hazırlanan bir raporda, YouTube videolarının 15 farklı kategoriye ayrılması amaçlanmıştır. Bu süreçte TF-IDF ile metin temsili oluşturulmuş ve sınıflandırmada Random Forest algoritması kullanılmıştır. Uygulama sonucunda %68 doğruluk oranı elde edilmiştir. Görsel analiz ve istatistiksel özellikler de test edilmiş, fakat metin bazlı modellerin daha etkili olduğu görülmüştür.

Yılmaz, vd. göre (2022) ise Türkçe saldırgan dilin tespitine odaklanarak geniş bir tweet kümesi üzerinden analiz gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, çoklu doğrulama yöntemleriyle oluşturulan bir küfür ve saldırganlık sözlüğü temel alınarak, içeriklerin hangi bağlamda olumsuzluk taşıdığı anlaşılmaya çalışılmıştır.

Yousaf ve Nawaz (2022) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, uygunsuz içeriklerin tespiti ve sınıflandırılması için CNN ve LSTM gibi derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Video açıklamaları ve kullanıcı yorumları üzerinden oluşturulan veri kümesi üzerinde eğitim gerçekleştirilmiş ve içeriklerin doğruluğa dayalı olarak filtrelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada %91'in üzerinde doğruluk rapor edilmiştir.

Nasiboğlu ve Gencer (2023), Türkçe sosyal medya metinlerindeki küfürlü ifadeleri tespit etmek amacıyla adlandırılmış varlık tanıma (NER), Bi-LSTM ve BERT tabanlı sistemler geliştirmiştir. 15.110 cümleden oluşan veri kümesi kullanılmış ve Bi-LSTM %99, BERT ise %95 doğruluk ile oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Carvalho vd. göre (2024), YouTube eğitim videolarını analiz etmek için geniş çaplı bir veri kümesi ve çeşitli algoritmalar kullanarak çeşitli makine öğrenmesi modellerini karşılaştırmıştır. Videolardan toplanan yorumlardan metin temsilleri çıkarılmış ve bu verilerle Random Forest, Decision Tree ve MLP gibi algoritmalar eğitilmiştir. MLP modeli %94 doğrulukla en yüksek başarıyı göstermiştir.

Boa vd. (2024), Carvalho ile benzer şekilde eğitim videolarının analizine odaklanmış, fakat bu çalışmada kullanıcı yorumlarından hareketle kişiselleştirilmiş bir öneri sistemi geliştirilmiştir. Sistem, eğitim seviyelerine

göre uygun içeriklerin öne çıkarılmasını sağlamış ve eğitim videolarına yönelik otomatik sözlük önerisiyle katkı sunmuştur.

De silva ve Fernando (2025) reklamcılıkta kullanmak amacıyla bir video içeriği sınıflandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Amaç video içeriğini tespit ederek doğru bir reklam gösterimi stratejisi uygulayabilmektir. Bu amaç doğrultusunda yemek tarifleri içeren metin içerikli veri kümesi, yemek görselleri içeren Food101 veri kümesi ve yemek videolarından oluşan veri kümesini kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları BERTopic modeli ile başarılı bir sonuç elde etmişlerdir.

Anıl Utku (2025), YouTube platformundaki Türkçe yorumlardan oluşan bir veri kümesi ile SVM, Bi-LSTM, BERT gibi modelleri eğiterek spam yorumları tespit etmeye çalışmıştır. BERT modeli ile %97.7 doğruluk yakalamayı başardığını ifade etmekte olup diğer modellerinde de yüksek doğruluk yakalaması nedeniyle çalışmamıza örnek teşkil etmektedir.

Tablo 1, sosyal medya platformlarında özellikle YouTube videolarının sınıflandırılmasıyla ilgili yapılan güncel çalışmaları özetlemektedir.

Tablo 1: YouTube Video Sınıflandırma Yöntemlerine Yönelik Literatürdeki Çalışmaların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

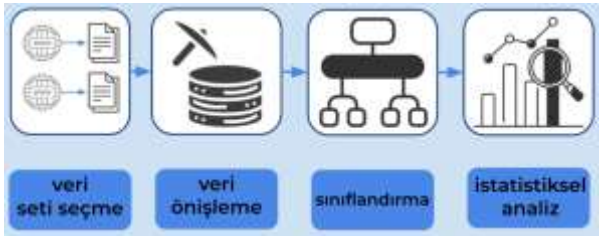
Yazar	Yıl	Yaklaşım	Veri Kümesi	Performans Metrikleri	Sonuçlar
De Silva & Fernando	2025	BERTopic	180.00 yemek tarifi, Food101 veri kümesi ve YouTube-8M veri kümesi içerisinden 135 video	Hamming loss, doğruluk, micro F1, mikro hassasiyet, mikro doğruluk	Metin ve görselin birleştirildiği yaklaşımda F1 score 0.80
Anıl Utku	2025	LR, RF, SVM, XGBoost, Bi-LSTM ve BERT modellerinin karşılaştırılması	YouTube video yorumları	doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F1	%97,7 doğruluk (BERT modeli)
Boa vd.	2024	Yorum tabanlı öneri sistemi + otomatik sözlük	YouTube eğitim videoları ve kullanıcı yorumları	Belirtilmemiş	Eğitsel içerik öneri sistemi geliştirildi

Carvalho vd.	2024	MLP, Decision Tree, Random Forest	YouTube eğitim yorumları	Doğruluk, F1	%94 doğruluk (MLP ile en iyi sonuç)
Nasiboğlu & Gencer	2023	Bi-LSTM, BERT + NER	15.110 cümlelik Türkçe tweet verisi	Doğruluk	Bi-LSTM: %99, BERT: %95
Yılmaz vd.	2022	BERT tabanlı Türkçe saldırgan dil tespiti	Geniş tweet verisi	Doğruluk	Yüksek doğruluk, klasik yöntemlerden üstün
Yousaf & Nawaz	2022	CNN + LSTM ile uygunsuz içerik sınıflandırması	YouTube video açıklamaları ve yorumları	Doğruluk	%91 üzeri doğruluk
Harrison vd.	2022	TF-IDF + Random Forest	15 sınıf etiketiyle YouTube veri kümesi	Doğruluk	%68 doğruluk
Ramesh vd.	2020	Video örnekleme + ELMo ile anahtar kelime sınıflandırması	YouTube video meta verileri	Doğruluk	%97,16 (anahtar kelime), %85,6 (görsel)

Bu çalışma, KNN, LinearSVC, LSTM, Bi-LSTM, Extra Trees, Text-CNN, Text-GCN, Text-RNN, LightGBM, Logistic Regression ve Random Forest gibi farklı sınıflandırma algoritmalarının kullanıldığı geniş bir algoritma yelpazesiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bu algoritmaların sınıflandırma başarıları istatistiksel analizlerle sunulmuş ve karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu yönüyle, literatürdeki mevcut çalışmalara katkı sağlayan, güncel ve kapsamlı bir araştırma olarak alana önemli bir yenilik getirmektedir.

MATERYAL VE METOT

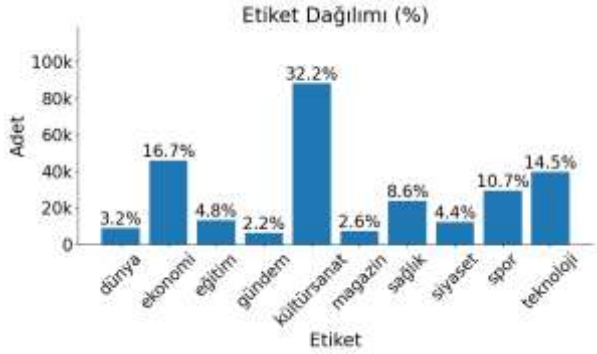
Bu çalışmada 2 farklı veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri setleri eğitim öncesi anlamlı veriye ulaşabilme ve veri boyutunun küçülmesi amaçları ile ön işlemlerden geçirildikten sonra seçilen modeller ile eğitimleri yapılmıştır. Eğitim sonuçları, istatistiksel anlamlılığı belirlemek amacıyla ANOVA kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın genel adımları Şekil 1'de görselleştirilmiştir.



Şekil 1: Çalışmanın genel adımları.

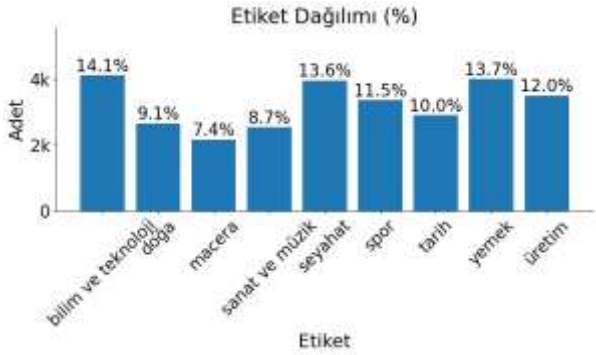
Veri kümesi

Çalışmada kullanılan veri setlerinden ilki Türkçe metinlerde sınıflandırma yapabilmek için *Interpress Turkish News Category Dataset (Lite)* adlı Interpress Medya Takip Merkezi'nin sunduğu Türkçe haber içeriklerinden oluşturulmuş bir veri kümesidir. Bu Veri Kümesi-10 farklı haber kategorisi için yaklaşık 270 bin örneklem içermektedir. Bu kategoriler; kültür-sanat, ekonomi, siyaset, eğitim, dünya, spor, teknoloji, magazin, sağlık ve gündem etiketlerine sahiptir. Kategori başına düşen örneklem dağılımı Şekil 2' deki sütun grafikte verilmiştir.



Şekil 2: Interpress Turkish News Category (270K - Lite Version) veri kümesinin kategori bazlı veri dağılımını gösteren sütun grafiği

Diğer veri kümesi ise Kaggle platformunda paylaşılmış olan *Youtube API Data for Text Categorization* adlı İngilizce örneklem içeren veri kümesidir. Örneklem sayısı yaklaşık 29 bin olan bu veri kümesi bilim-teknoloji, yiyecek, seyahat, imalat, spor, tarih, doğa, sanat-müzik ve maceradan oluşan 9 farklı kategori içermektedir. Şekil 3'te veri kümesinin kategorisel dağılımı sütun grafik halinde verilmiştir.



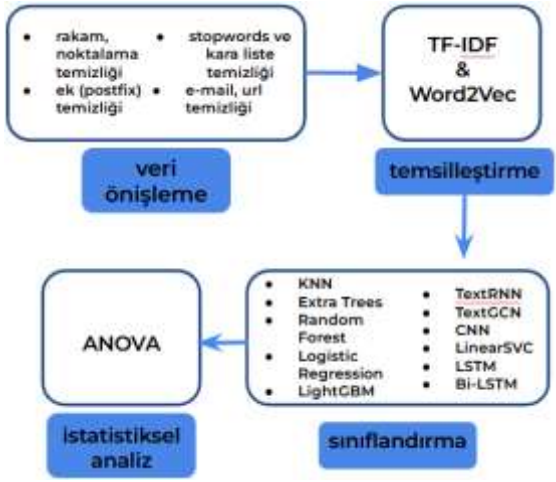
Şekil 3: Youtube API Data for Text Categorization veri kümesinin kategori bazlı veri dağılımını gösteren sütun grafiği

Çalışmada kullanılan veri setleri ile ilgili özet bilgi Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Tablo 2: Çalışmada kullanılan veri setleri hakkında özet bilgi.

	Veri Kümesi-1	**Veri Kümesi-2**
Başlık	Interpress Turkish News Category Dataset (270K - Lite Version)	Youtube API Data for Text Categorization
Kaynak	Hugging Face	Kaggle
Örnek Sayısı	270K	29K
Kategori Sayısı	10	9
İçerik Dili	Türkçe	İngilizce
Erişime Açıklık	Evet	Evet

Veri kümeleri eğitim ve test için 60/40, 70/30 ve 80/20 oranlarında ayrılmıştır ve optimize parametrelerle modellerin eğitimleri yapılmıştır. Veri kümesi seçiminden sonra şekil 4'te verilen veri ön işleme, temsilleştirme, sınıflandırma ve istatistiksel analiz adımları uygulanmıştır. Bu adımlar alt başlıklar halinde detaylandırılmıştır.



Şekil 4: Çalışmada gerçekleştirilen adımlar ve yöntemleri.

Verinin hazırlanması

Eğitim sürecini hızlandırmak ve modellerin öğrenim başarısını artırmak amacıyla iki veri kümesi üzerinde de öncelikle şu ön işleme uygulamaları yapılmıştır:

•Tüm metinlerin küçük harfe dönüştürülmesi (case-folding)
•Noktalama işaretlerinin, özel karakterlerin ve sayısal öğelerin silinmesi
•Fazladan boşlukların ve satır başlarının silinmesi
•Durak kelimelerinin çıkarılması (stop-word removal)
•Kelimelerin kök hallerine indirgenmesi (lemmatization)

Bu işlemler, Interpress veri kümesine uygulanırken Türkçenin sondan eklemeli dil yapısına uygun olacak biçimde düzenlemeler yapılmıştır.. Özellikle kelime kök bulma sürecinde, zengin ek yapısına sahip Türkçenin doğal dil işleme açısından sunduğu zorluklar göz önünde bulundurulmuş ve özel lemmatization teknikleri uygulanmıştır. Ön işleme sonrası veriler, makine öğrenmesi modelleriyle işlenebilmesi için TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) ve Word2Vec yöntemleri ile sayısal forma dönüştürülmüştür.

T F-IDF, metindeki kelimelerin önemini değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Belirli bir kelimenin bir dokümanda ne kadar sık geçtiğini ve bu kelimenin tüm dökümanlar içinde ne kadar yaygın olduğunu dikkate alarak ağırlık hesaplar. Bu yöntem ile sık kullanılan ama sınıflandırma açısından etkisi düşük olan ya da olmayan kelimelerin etkisi azaltılmıştır.

Word2Vec ise kelimeleri vektör uzayında anlam yakınlıklarına göre konumlandıran temsilleştirme yöntemidir. "Benzer bağlamlarda geçen kelimeler anlamca da benzerdir" varsayımına dayanır. Her kelimeyi yoğun vektörler şeklinde temsil eder (Otter, Medina vd. 2020). Bu yöntem ile veri kümesi bağlamsal bilgiye duyarlı hale getirilmiştir.

Sınıflandırma Algoritmaları

Bu çalışmada sınıflandırma için KNN algoritmaları, Linear SVC, Extra Trees, LightGBM, Logistic Regression, Random Forest, Bi-LSTM, LSTM, Text-GCN, Text-RNN ve Text-CNN modelleri eğitilip test edilmiştir.

KNN

KNN algoritması, yeni bir örneği sınıflandırırken eğitim setindeki en yakın komşulara bakar ve çoğunluğa göre sınıf belirler. Bu çalışmada, dört farklı uzaklık ölçütüyle şu KNN türevleri kullanılmıştır; Cosine Similarity, Minkowski Distance, Manhattan Distance, Jaccard Distance.

Bu ölçütlerden ilki olan Cosine Similarity iki vektör arasındaki açının kosinüsü aracılığıyla ölçülür. Vektörler arasındaki yönsel benzerliği ölçer ve aynı yönü gösterip göstermediğini tespit eder (Zhang ve Dong 2021).

$$\frac{A\rightarrow . B\rightarrow}{||A\rightarrow||\,||B\rightarrow||} \qquad (1)$$

Minkowski Distance uzaydaki iki nokta arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılır. “p” parametresiyle tanımlanır. p=1 için Manhattan, p=2 için Euclidean mesafeyi ifade eder (Zhang ve Rao 2020).

$$D(x,y) = \left(\sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|^p\right)^{\frac{1}{p}} \qquad (2)$$

Jaccard Distance, iki küme arasındaki benzerliği veya farklılığı ölçmek için kullanılan bir metriktir. İndeks 0 ile 1 arasında değişir. 1'e yakın aralık, iki veri kümesinde daha fazla benzerlik olduğu anlamına gelir.

$$JaccardIndex = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{|A \cap B|}{|A|+|B|-|A \cap B|}$$

$$JaccardDistance = 1 - JaccardIndex \qquad (3)$$

KNN algoritması, özellikle metin vektörlerinin seyrek yapısı nedeniyle başarılı sonuçlar vermiştir. Bu farklı metrikler, metinlerin temsil şekline göre farklı avantajlar sunmakta ve sınıflandırma başarımını doğrudan etkilemektedir (Kalra, Kathuria vd. 2019) (Yousaf ve Nawaz 2022).

LinearSVC

Linear Support Vector Classification kısaca LinearSVC doğrusal bir ayrım düzlemi öğrenen bir algoritmadır. Sınıflandırma işlemi, marjinleri maksimize edecek hiper düzlemin bulunması ilkesine dayanır ve

$$\frac{1}{2}||w||^2 \; subject\ to\ y_i(w.x_i + b) \geq 1 \qquad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada w ağırlık vektörünü, x girdi vektörünü, b ise bias terimini ifade eder (Zhang ve Dong 2021). Model, sınıflar arası maksimum ayrım sağlamayı hedefler.

LSTM ve Bi-LSTM

LSTM, bir RNN mimarisidir ve zamana bağlı bilgileri uzun süreli olarak saklayabilir. Giriş, unutma ve çıkış kapıları sayesinde bilgi akışı denetlenir. Aşağıdaki denklemlerde "it" giriş kapısını, "Ct" hücre durumunu belirtir.

$$it = \sigma(W_i.(h_t - 1, x_t) + b_i)$$

$$c_t = f_t.c_t - 1 + i_t.\tilde{c_t} \qquad (5)$$

Model, ardışık kelimeler arasındaki uzun bağımlılıkları öğrenme konusunda oldukça başarılıdır (Hu, Liao vd. 2020).

Bi-LSTM ise çift yönlü LSTM mimarisidir ve bir diziyi hem ileri hem de geri yönde işler. Bu sayede, kelimenin yalnızca geçmişine değil, geleceğine dair bağlamsal bilgileri de göz önüne alır:

$$h_t = LSTM\ f(x_t) \oplus\ LSTM\ b(x_t) \qquad (6)$$

Buradaki $\oplus$ operatörü iki yönlü LSTM çıktılarının birleştirilmesini temsil eder. Bu yapı özellikle Türkçede bağlam duyarlılığı yüksek cümleler için faydalıdır (Zhang ve Rao 2020) (Equation 9).

Extra Trees (Extremely Randomized Trees)

Extra Trees algoritması, rastgele orman yaklaşımına benzer biçimde çalışmaktadır ancak bazı önemli farklılıklar içeren ve temelinde grup kararı (ensemble) bulunan bir sınıflandırma yöntemidir. Temel fark, her ağaçta veri örnekleme yapmaksızın tüm eğitim verisinin kullanılmasıdır ve her düğümdeki bölünme noktasının rastgele seçilmesidir. Bunun sayesinde

modelin varyansı azaltılırken, öğrenme sürecinin aşırı uyum riski aynı zamanda düşürülmektedir (Gaikwad ve ark. 2021).

Yapılan deneyler sonucunda Extra Trees algoritması, TF-IDF vektörlemesi sonrasında kullanılarak yüksek ayrım gücü gösteren kelime temsillerini kullanarak başarılı sonuçlar üretmiştir. Özellikle kategoriler arası içerik benzerliği bulunan metinlerde, bu rastgeleliğe dayalı karar mekanizmasının hata oranını azalttığı gözlemlenmiştir (Paz ve ark. 2020).

LightGBM

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine), karar ağaçlarına dayalı gradyan artırmalı bir algoritmadır. Özellikle yüksek boyutlu ve büyük ölçekli veri kümelerinde düşük bellek kullanımıyla ve dolayısıyla yüksek işlem hızıyla öne çıkar. Bu model, geleneksel boosting yöntemlerinden farkı, ağaçları derinlemesine büyütmesidir. Bu yöntem, her iterasyonda kayıp fonksiyonunu en fazla azaltan dalı genişleterek doğruluğu artırır (Kalra ve ark. 2019).

TF-IDF veya Word2Vec gibi algoritmalar sonucu ortaya çıkan yüksek boyutlu matrislerde LightGBM, bu boyutluluğu verimli biçimde işlerken doğruluk oranını düşürmeden öğrenme süresini kısaltmıştır. Eğitim süresindeki bu verimlilik, YouTube transkriptleri gibi uzun dizisel metinleri içeren veri kümelerinde özellikle önem taşımaktadır (Cunha ve ark. 2019).

Text-CNN

Text-CNN, evrişimsel sinir ağlarının doğal dil işleme problemlerine uyarlanmış bir türevi niteliğindedir. Bu model, metni kelime gömme matrisine (embeddings) dönüştürdükten sonra, çeşitli boyutlardaki filtrelerle evrişim uyguladıktan sonra n-gram düzeyinde özellik çıkarımı yapar. Her filtre belirli bir bağlam genişliğinde semantik bilgi yakalamaya çalışır. Bu işlem sonrası maksimum havuzlama ile en baskın özellikler seçilir ve sınıflandırıcıya aktarılır (Zhang ve Dong 2021).

Text-CNN modelinin mimarisi özellikle kısa metinlerin sınıflandırılması için tasarlanmıştır fakat Türkçe video transkriptlerinden oluşan uzun dizilerde de anlamlı bölümleri filtreleyerek başarılı sonuçlar verebilmektedir. Bu ağın matematiksel yapısı şu şekilde özetlenebilir:

$$c_i = f(W.x_i{:}i + h - 1 + b)$$

Burada $x_i{:}i + h - 1$ ifadesi; h uzunluğundaki kelime gömme alt matrisini, W filtre matrisini, f aktivasyon fonksiyonunu, ve b bias terimini temsil

etmektedir. Her bir c_i, bir özellik olarak sınıflandırıcı katmana aktarılmaktadır (Kalwar ve ark. 2023).

Text-RNN

Text-RNN, sıralı verilerdeki bağımlılıkları modellemek üzere kullanılan geleneksel tekrarlayan sinir ağı mimarilerinden biridir. Text-CNN modelinden farklı olarak, kelimelerin bağlamsal ve sırasal ilişkilerini dikkate alır. Bu özellik, özellikle Türkçede olduğu gibi bağlamla anlamı değişen sözcüklerin bulunduğu dillerde sınıflandırma doğruluğunu artırır (Hu ve ark. 2020).

Model, her kelime için gizli durumları (ht) ardışık olarak günceller:

$$h_t = f(W_h.h_{t-1} + W_x.x_t + b) \quad (8)$$

Bu denklemin her bir adımında, önceki durum bilgisi h_{t-1}ile mevcut giriş x_t birleştirilerek güncel bağlamsal temsil elde edilir. Eğitim sırasında ağırlıklar W_h ve W_x ve bias terimi (b) optimize edilir. Modelin dezavantajı, uzun dizilerde gradyanların kaybolmasıdır.

Text-RNN, özellikle Word2Vec temsilleştirmesiyle birlikte kullanıldığında, semantik yakınlıkları daha isabetli biçimde modelleyebilmiştir (Otter ve ark. 2020).

Random Forest

Random Forest Algoritması, birçok karar ağacından oluşan bir topluluk yapısı kurar ve bu ağaçların oy çokluğu üzerinden nihai sınıf tahminini yapar. Her bir ağaç, eğitim verisinin rastgele örneklenmesiyle oluşturulur ve her bölünme aşamasında da özelliklerin sadece bir alt kümesi değerlendirilir. Bu yapı sayesinde modelin varyansı azaltılır ve aşırı öğrenme riski düşürülür (Zorarpacı 2024). Random Forest algoritmasının genel sınıflama mantığı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{y} = \text{majority_vote}\{ h_1(x), h_2(x), ..., h_n(x) \} \quad (9)$$

Burada $h_i(x)$, i. karar ağacının x girdisi için yaptığı sınıf tahminidir ve $\hat{y}$ ifadesi nihai çıktı sınıfını belirtir.

TextGCN

Metin sınıflandırmada geleneksel derin öğrenme yöntemlerinin ötesine geçilmesi gerektiğinde, grafik yapılar üzerine kurulu modeller öne çıkmaktadır. Bu bağlamda kullanılan TextGCN, belgeler ve kelimeler

arasındaki ilişkileri düğüm olarak temsil eder ve bu düğümler arasındaki kenarlar, ortak kelime kullanımı gibi bağlamsal ilişkilere göre tanımlanır (Yousaf ve Nawaz 2022). Bu yapı, metinleri doğrudan bir grafik üzerinde temsil ederek, bağlam bilgisinin çok daha yapısal biçimde modellenmesine olanak tanır. Modelin temel mantığı, her düğümün özellik vektörünün, komşu düğümlerin özellikleri ile birleştirilerek güncellenmesidir. İki katmanlı bir GCN örneğinde bu süreç aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$H^{(l+1)} = \sigma(\tilde{D}^{-1/2} \tilde{A} \tilde{D}^{-1/2} H^{(l)} W^{(l)}) \qquad (10)$$

Burada $\tilde{A} = A + I$; A orijinal komşuluk matrisi, I: birim matris , $\tilde{D}$;Ã'nin dereceleri ile oluşturulmuş diagonal matristir, $H^{(l)}$; l. katmandaki düğüm özellikleri, $W^{(l)}$;öğrenilen ağırlık matrisidir ve σ; aktivasyon fonksiyonunu belirtir.

BULGULAR

Eğitim sonuçları

Veri Kümesi-1 üzerinde yapılan skor değerlendirmelerine göre, en yüksek başarıyı Text-RNN (80.30%), LightGBM (79.42%) ve LSTM (77.71%) modelleri göstermiştir. Şekil 5'te Text-RNN için karışıklık matrisi verilmiştir.



Şekil 5: Veri Kümesi-1 en iyi model (Text-RNN %80,30 F1-score) için karışıklık matrisi (confusion matrix) grafiği

Bu sonuçlar, özellikle sıralı veri ve bağlam ilişkilerini yakalayabilen derin öğrenme modellerinin metin sınıflandırma görevlerinde daha iyi performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Geleneksel makine öğrenmesi

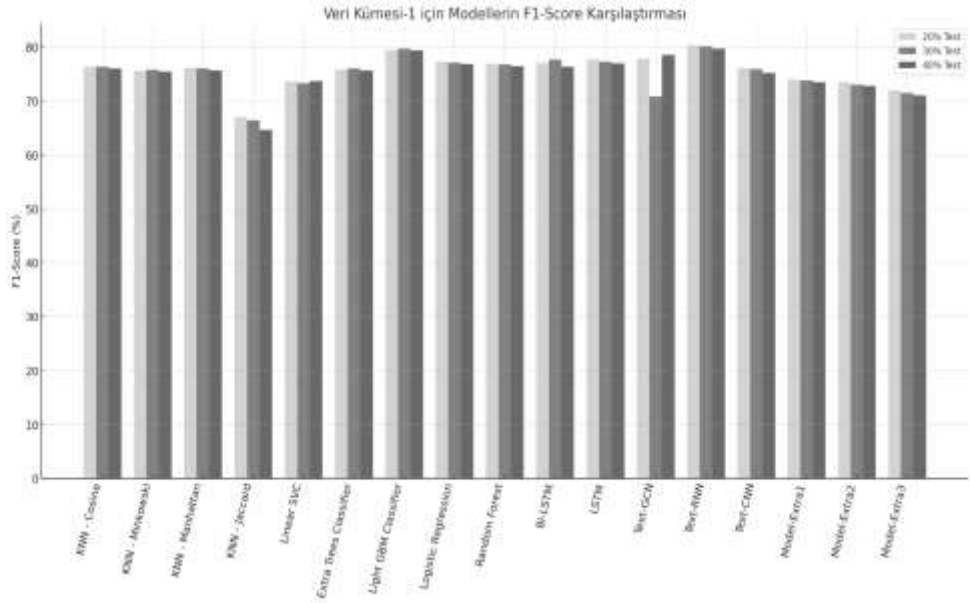
algoritmaları arasında ise Logistic Regression (77.30%), Random Forest (76.89%) ve KNN-Cosine (76.32%) algoritmaları öne çıkmaktadır. Öte yandan, Text-GCN (7.83%) modelinin oldukça düşük bir performans sergilemesi, bu veri kümesinde grafik tabanlı yöntemlerin yeterince etkili olamadığını göstermektedir. Genel olarak, Veri Kümesi-1 üzerinde derin öğrenme tabanlı yöntemler klasik yöntemlere göre daha yüksek tutarlılık ve doğruluk sağlamıştır. Tablo 3' te Veri Kümesi-1 için her bir model eğitiminin Accuracy, Precision, Recall ve F1-score değerleri verilmiştir.

Tablo 3'te verilen sonuçlar için modellerin F1-score değerlerine ait grafik Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafikte Text-GCN modelinin diğer modellere nazaran daha düşük bir başarı göstermiş olduğu görülmektedir.

Tablo 3: Veri Kümesi-1 (Interpress Turkish News Category Dataset 270K - Lite Version) için test sonuçları (%)

	20% Test				30% Test				40% Test			
	ACC	PRC	RCLL	F1	ACC	PRC	RCLL	F1	ACC	PRC	RCLL	F1
KNN - Cosine	81.11	77.79	75.12	76.32	80.95	77.73	75.23	76.35	80.73	77.61	74.71	76.00
KNN - Minkowski	80.64	78.36	73.38	75.60	80.50	78.55	73.51	75.75	80.27	78.47	73.07	75.46
KNN - Manhattan	80.99	78.73	74.01	76.13	80.71	78.63	73.93	76.03	80.50	78.45	73.42	75.66
KNN - Jaccard	73.05	73.09	63.33	67.07	73.27	73.01	62.47	66.43	72.58	71.74	60.85	64.62
Linear SVC	82.42	81.03	71.00	73.61	82.45	81.36	70.94	73.33	82.44	81.69	71.01	73.71
Extra Trees Classifier	82.48	83.83	71.85	75.85	82.41	84.04	71.97	76.00	82.24	83.74	71.52	75.61
Light GBM Classifier	84.20	81.40	77.82	79.42	84.27	81.75	77.98	79.66	84.12	81.54	77.61	79.35
Logistic Regression	83.37	81.51	74.50	77.30	83.27	81.63	74.26	77.11	83.12	8.17	73.79	76.81
Random Forest	82.85	83.56	73.16	76.89	82.76	83.45	73.07	76.78	82.51	83.48	72.61	76.44

Bi-LSTM	81.00	78.17	76.10	77.05	81.17	78.28	77.12	77.67	80.03	76.04	76.79	76.34
LSTM	81.22	77.72	77.85	77.71	81.20	78.69	76.40	77.28	80.58	77.60	76.36	76.95
Text-GCN	74.76	71.64	71.57	77.83	75.47	71.47	71.99	70.84	75.35	71.50	71.97	78.52
Text-RNN	84.48	81.66	79.12	80.30	84.12	81.01	79.33	80.12	84.07	80.67	78.83	79.71
Text-CNN	80.48	77.78	74.75	76.10	80.33	77.30	74.65	75.87	80.18	77.77	73.29	75.20



Şekil 6: Veri Kümesi-1 (Interpress Turkish News Category Dataset 270K - Lite Version) için model bazlı F1-score karşılaştırma grafiği

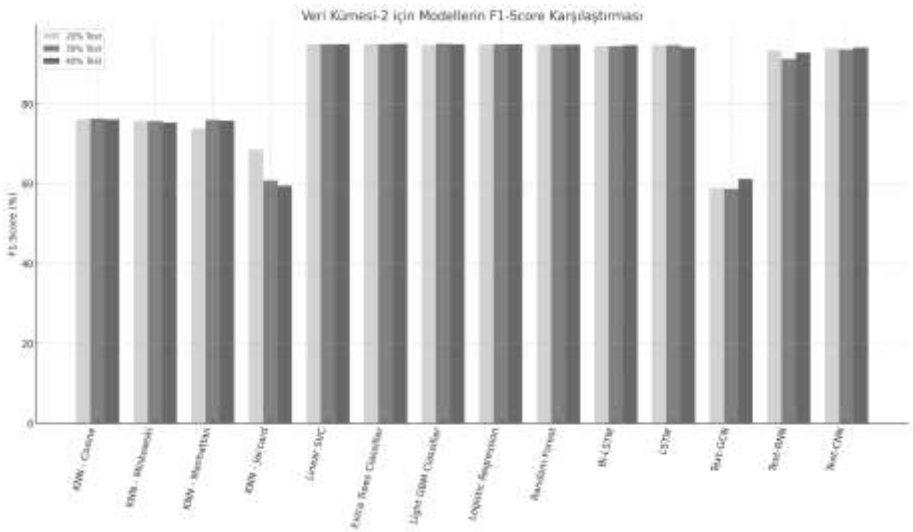
Veri Kümesi-2 üzerinde yapılan skor değerlendirmelerine göre, tüm modellerin genel olarak yüksek performans sergilediği görülmektedir. Özellikle Extra Trees, LightGBM, Logistic Regression, Random Forest ve Linear SVC gibi geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri %90 üzeri skor ile başarılı sonuçlar üretmiştir. Derin öğrenme tabanlı modellerden bi-LSTM ve LSTM benzer şekilde yüksek başarı göstermiştir. Bununla birlikte, Text-GCN modeli diğer modellere kıyasla belirgin biçimde düşük kalmıştır. Bu durum, grafik tabanlı yaklaşımların bu veri kümesinin yapısına yeterince uygun olmadığını düşündürmektedir. Genel olarak, Veri Kümesi-2 daha ayrık ve öğrenilebilir bir dağılıma sahip olduğundan, klasik makine öğrenmesi algoritmaları ile bile yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir. Tablo

4’ te Veri Kümesi-2 için her bir model eğitiminin Accuracy, Precision, Recall ve F1-score değerleri verilmiştir.

Tablo 4: Veri Kümesi-2 (Youtube API Data for Text Categorization) için eğitim sonuçları (%)

	20% Test				30% Test				40% Test			
	ACC	PRC	RCLL	F1	ACC	PRC	RCLL	F1	ACC	PRC	RCLL	F1
KNN - Cosine	80.93	77.64	74.75	76.05	80.92	77.72	75.11	76.28	80.73	77.64	74.64	75.99
KNN - Minkowski	80.69	78.51	73.34	75.64	80.39	78.38	73.47	75.67	80.24	78.27	72.92	75.28
KNN - Manhattan	79.14	76.76	71.50	73.82	80.56	78.39	73.89	75.92	80.41	78.40	73.50	75.69
KNN - Jaccard	74.32	74.34	64.64	68.46	69.53	68.01	57.90	60.78	68.25	67.58	56.26	59.40
Linear SVC	94.84	94.82	94.84	94.83	94.84	94.82	94.84	94.83	94.85	94.84	94.85	94.85
Extra Trees Classifier	94.96	94.96	94.96	94.94	94.89	94.89	94.89	94.89	94.99	95.00	94.99	94.99
Light GBM Classifier	94.68	94.67	94.68	94.67	95.00	94.99	95.00	94.99	94.89	94.88	94.89	94.88
Logistic Regression	94.79	94.75	94.79	94.76	94.91	94.88	94.91	94.89	94.89	94.86	94.89	94.87
Random Forest	94.72	94.66	94.72	94.68	94.70	94.68	94.70	94.68	94.79	94.77	94.79	94.77
bi-LSTM	94.39	94.47	94.39	94.42	94.39	94.47	94.39	94.42	94.64	94.72	94.64	94.67
LSTM	94.52	94.83	94.52	94.60	94.52	94.83	94.52	94.60	94.14	94.15	94.14	94.08
Text-GCN	66.54	81.98	60.43	58.86	65.97	81.49	59.78	58.71	68.33	80.67	62.51	61.15
Text-RNN	93.76	93.16	93.73	93.26	91.69	91.25	91.60	91.19	93.47	92.82	92.80	92.79
Text-CNN	94.44	93.96	93.90	93.92	94.19	93.58	93.60	93.58	94.53	93.93	94.22	94.05

Tablo 4'te verilen sonuçların daha rahat okunabilmesi için modellerin f1 score değerlerine ait grafik Şekil 7'de verilmiştir. Bu grafikte Text-GCN ve Jaccard modellerinin diğer göre düşük bir başarı oranına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca KNN modellerinin, TextGCN hariç, diğer modellere oranla başarı oranlarının geride kaldırğı ve LinearSVC, Extra Trees, LightGBM, Logistic Resgression, Random Forest, LSTM, Bi-LSTM ve TextCNN modellerinin test/eğitim oranından fazla etkilenmediği bu grafikten yola çıkılarak yapılabilecek bir diğer yorumdur.



Şekil 7: Veri Kümesi-2 (Youtube API Data for Text Categorization) için model bazlı F1-score karşılaştırma grafiği

Veri Kümesi-2'de en yüksek başarı gösteren iki algoritmanın karmaşılık matrisine bakıldığında macera (adventure) ve seyahat (travel) sınıflarının birbirinden diğer kategorilere göre daha zor ayırt edildiği gözükmektedir. Tarih (history) kategorisinin diğer kategorilerle en az karışması bu sınıfa ait metinlerin daha ayırt edici ifadeler içerdiğini göstermektedir. Şekil 8'de bu algoritmalara ait konfüzyon matrisleri görülmektedir.



Şekil 8: Veri Kümesi-2 en iyi model (sırasıyla LightGBM ve Extra Trees %94,99 F1-score) için karışıklık matrisi (confusion matrix) grafiği

İstatistiksel analiz sonuçları

İstatistiksel analizlerin temelini oluşturan varyans analizinde iki veri kümesinde de H_0 (Null Hipotezi) ve H_1 (Alternatif Hipotezi) hipotezleri test edilmiştir. Veri setleri üzerinde gerçekleştirilen analizde, algoritmalar bağımsız olarak değerlendirilmiş ve tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) testi uygulanmıştır. Veri Kümesi-1' e uygulanan ANOVA testinin sonuçları Tablo 5'de verilmiş olup ve elde edilen sonuçlara göre algoritma türü ile F1-score arasında istatiksel olarak anlamlı bir ilişki olduğu açığa çıkarılmıştır ($F(13, 28) = 5096.13$, $p < 0.001$). Bu durum sonucunda H0 hipotezi %95 anlamlılık düzeyinde reddedilmiştir.

Tablo 5: Veri Kümesi-1 için tek yönlü ANOVA analizi sonuçları

SOURCE	ALGORITHM	RESIDUAL
DF	13	28
SUM SQ	1.313179	0.000555
MEAN SQ	0.101014	2e-05
F	5096.1284	
PR(>F)	1.23993e-43	

Toplam varyansın yaklaşık %99.96'sı kullanılan algoritmalardan kaynaklanmakta ve sadece %0.04' lük kısım modelin açıklayamadığı, raslantısal hatalara dayanmaktadır. Veri Kümesi-2 için farklı sınıflandırma algoritmalarına uygulanan tek yönlü ANOVA analizi sonuçları Tablo 6' da verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda algoritmalar arasında istatiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmüştür ($F(13,28) = 415.4582$, $p < 0.001$). Bu sonuç göz önüne alındığında H0 hipotezi reddedilerek en az bir algoritmanın diğerlerinden anlamlı düzeyde farklı performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6: Veri Kümesi-2 için tek yönlü ANOVA analizi sonuçları

SOURCE	ALGORITHM	RESIDUAL
DF	13	28
SUM SQ	0.645916	0.003349
MEAN SQ	0.034856	0.000114
F	415.4582	
PR(>F)	1.9766e-28	

Yapılan ANOVA testi sonucunda elde edilen varyans dağılımı grafiği, F1 skorlarındaki değişimin büyük bir oranda algoritma tarafından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Şekil 7'de sonuçlara ait grafik verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında varyansın yaklaşık %99.48' inin algoritmaların etkisiyle oluştuğunu görülmektedir ve sadece %0.52'sinin açıklanamayan raslantısal hatalarda kaynaklandığını göstermektedir. Bu durum göz önüne alındığında, algoritma seçimin model performansında belirleyici bir unsur olduğu görülmekte olup test edilen yöntemler arasında istatiksel olarak anlamlı farklılık bulunduğu görülmektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, içerik sınıflandırmada dil ve kaynağın etkisi incelenmiş, biri Türkçe haber metinlerinden (beş sınıf: gündem, ekonomi, sağlık, spor, magazin), diğeri İngilizce YouTube transkriptlerinden (on sınıf: eğitim, teknoloji, sağlık, spor, müzik, oyun, haber, eğlence, finans, diğer) oluşan iki farklı veri seti üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada toplam 13 farklı sınıflandırma modeli (Naive Bayes, Random Forest, Extra Trees, Support Vector Machines, KNN, Logistic Regression, Decision Tree, Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM gibi makine öğrenmesi algoritmaları ile Text-CNN, Text-RNN ve LSTM gibi derin öğrenme yöntemleri) uygulanmış ve bu modeller üç farklı eğitim-test oranında (%60–40, %70–30, %80–20) eğitilip değerlendirilmiştir.

Türkçe haber veri setinde en yüksek doğruluk oranı Text-RNN modeli ile %92,0 (80–20 oranında) elde edilmiştir. Makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerden Random Forest %85,3, Extra Trees %86,7 doğruluk oranıyla öne çıkarken, Naive Bayes %78,4 ile daha düşük bir performans sergilemiştir. Eğitim verisi oranı arttıkça özellikle derin öğrenme modellerinin başarımının belirgin biçimde yükseldiği gözlenmiştir.

İngilizce YouTube transkript veri setinde ise en yüksek doğruluk oranı Extra Trees algoritması ile %88,1 (70–30 oranında) bulunmuştur. Derin öğrenme yöntemlerinden Text-RNN %84,6, Text-CNN %82,9 doğruluk oranı elde etmiştir. Bu veri setinde, geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarının derin öğrenme yöntemlerine kıyasla daha istikrarlı bir performans sergilediği belirlenmiştir. Özellikle test oranı %40'a çıkarıldığında bazı derin öğrenme yöntemlerinin doğruluk oranlarında düşüş görülürken, Extra Trees ve Random Forest gibi algoritmaların performansını koruduğu tespit edilmiştir.

ANOVA ile yapılan istatistiksel analizler, kullanılan modeller arasında anlamlı performans farklılıkları bulunduğunu ortaya koymuştur ($p<0,05$). Bu sonuç, model seçiminin tesadüfi değil, veri setinin dili, morfolojik yapısı, sınıf sayısı ve eğitim-test oranı gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma göstermektedir ki içerik sınıflandırmada tek bir algoritmanın tüm veri türlerinde ve koşullarda üstünlük sağlaması mümkün değildir. Türkçe veri setinde eğitim verisinin artışı ile birlikte derin öğrenme modelleri daha yüksek doğruluk elde ederken, İngilizce veri setinde geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları (özellikle Extra Trees) öne çıkmıştır. Bu bulgular, model seçiminin dilsel ve yapısal özellikler ile eğitim-test dağılımı dikkate alınarak yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gelecek araştırmalarda, daha geniş ölçekli çok dilli veri setleri ve hibrit model yaklaşımları kullanılarak daha genelleştirilebilir ve esnek sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışma, farklı diller ve veri kaynakları üzerinde sınıflandırma modellerinin performanslarını karşılaştırarak önemli bulgular ortaya koymuştur. Ancak araştırmanın yalnızca iki dil ve belirli veri setleriyle sınırlı olması, bulguların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, daha geniş kapsamlı ve çok dilli veri kümeleri üzerinde testler yapılması, farklı kaynak türlerinin (sosyal medya, akademik metinler, kullanıcı yorumları vb.) analize dâhil edilmesi ve özellikle düşük kaynaklı diller için özelleştirilmiş modellerin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, hibrit yaklaşımların (makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin birlikte kullanımı) performanslarının değerlendirilmesi, içerik sınıflandırma sistemlerinin doğruluğunu ve esnekliğini artırmaya katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

Bohra, A., Vijay, D., Singh, V.S., Akhtar, S., Shrivastava, M., 2018. A dataset of Hindi–English code-mixed social media text for hate speech detection. *Proc. 2nd*

Workshop Comput. Model. People's Opinions, Personality, Emotions Social Media, pp. 36–41.

Boa, H.C.F. et al., 2024. Improving the educational experience on YouTube. *Heliyon, Elsevier.*

Carvalho, H.C.F.B. et al., 2024. Improving the educational experience on YouTube. *Heliyon*, vol. 10, no. 3, p. e17652.

Cunha, A.A.L., Costa, M.C., Pacheco, M.A.C., 2019. Sentiment analysis of YouTube video comments using deep neural networks. *Int. Conf. on Artificial Intelligence and Soft Computing,* Springer, pp. 561–570.

De Silva, W., & Fernando, A.,2025. Explainable Video Topics for Content Taxonomy: A Multimodal Retrieval Approach to Industry-Compliant Contextual Advertising. IEEE Access.

Harrison, T. et al., 2022. YouTube Video Category Classification Final Report. Univ. of Victoria. https://dspace.library.uvic.ca/handle/1828/12945

Huang, C., Fu, T., Chen, H., 2010. Text-based video content classification for online video-sharing sites," J. Am. Soc. Inf. Sci. Technol., vol. 61, no. 5, pp. 891–906.

Kalra, G.S., Kathuria, R.S., Kumar, A., 2019. YouTube video classification based on title and description text *Int. Conf. on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), IEEE*, pp. 74–79.

Kavitha, K., Shetty, A., Abreo, B., D'Souza, A., Kondana, A., 2020. Analysis and classification of user comments on YouTube videos. Procedia Computer Science, vol. 177, pp. 593–598.

Li, F., Chung, J.W., Claypool, M.,2021. Three-year trends in YouTube video content and encoding. Proc. 18th Int. Conf. on *Signal Processing and Multimedia Applications (SIGMAP)*, pp. 15–22.

Miller Jr., R. G., 1997. Beyond ANOVA: Basics of Applied Statistics. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Modha, S., Majumder, P., Mandl, T., Mandalia, C., 2020. Detecting and visualizing hate speech in social media: A cyber watchdog for surveillance. E*xpert Syst. Appl*., vol. 161, Art. no. 113725

Nasiboglu, R. ve Gencer, M., 2023. Adlandırılmış varlık tanıma modelleri ile türkçe sosyal medya metinlerinde küfürlü sözlerin sansürlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 23, no. 1, pp. 72–88.

Oflazer, K., 2014. Turkish and its challenges for language processing. Lang. Resour. Eval., vol. 48, no. 4, pp. 639–653.

Otter,D.W., Medina, J.R., Kalita, J.K., 2020. A survey of the usages of deep learning for natural language processing. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.,* vol. 32, no. 2, pp. 604–624.

Paz, M.A., Montero-Díaz, J., Moreno-Delgado, A.,2020. Hate speech: A systematized review. *SAGE Open,* vol. 10, no. 4.

Pokharel, R., Bhatta, D., 2021. Classifying YouTube comments based on sentiment and type of sentence. arXiv preprint, arXiv:2111.01908.

Ramesh, I., et al.,2020. Categorization of YouTube videos by video sampling and keyword processing. *IEEE Conf. on Computing, Communication, and Intelligent Systems*.

Rangaswamy, S., Ghosh, S., Jha, S., Ramalingam, S., 2016. Metadata extraction and classification of YouTube videos using sentiment analysis. *IEEE Int. Carnahan Conf. on Security Technology (ICCST),* pp. 1–2.

Utku A.,2025. YouTube Yorumlarından Spam Tespitine Yönelik Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Bir Analizi. BUTS.6(1):30-5.

Yilmaz,Ş. S., İlyas, O., Gökçen, H., 2022. Twitter platformundan elde edilen türkçe saldırgan dil derlemi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi,* vol. 4, no. 2, pp. 304–316.

Yousaf, K., Nawaz, T., A deep learning-based approach for inappropriate content detection and classification of YouTube videos. IEEE Access, vol. 10, pp. 16283–16298.

Zhang, D., Dong, M., 2021. Improved deep learning model text classification. *6th Int. Conf. on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), IEEE*, pp. 217–220.

Zhang, Y., Rao, Z., 2020. n-bilstm: bilstm with n-gram features for text classification, in: 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), IEEE, pp. 1056–1059.

Zorarpacı, E., 2024. Turkish Text Classification Based On Wrapper Feature Selection Using Particle Swarm Optimization. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(05), 1181-1189.

Sahte Haber Tespitinde Yapay Zeka Yaklaşımları: LIAR ve ISOT Veri Setleri Üzerine Bir İnceleme

Bahadır KELEŞOĞLU [1*]
Nilvana KARABULUT [2*]
Ümit Bora GÜNAYDIN [3*]
Ayşe Berna ALTINEL GİRGİN [4*]

1- Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, bahadirkelesoglu28@gmail.com, ORCID No:0009-0009-5113-4918
2- Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, nilvanakarabulut@gmail.com, ORCID No: 0000-0003-4454-7086
3- Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, umitbora94@gmail.com, ORCID No: 0009-0006-8585-9165
4- Doç. Dr., Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, berna.altinel@marmara.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-5544-0925

ÖZET

Sahte haber tespiti, sosyal medyada hızla yayılan bilgi kirliliğini engellemek açısından kritik bir araştırma alanıdır. Bu çalışmanın amacı, çeşitli yapay zeka algoritmalarının sahte haber bulma yeteneklerini değerlendirmektir.

LIAR (çok sınıflı, kısa politik beyanlar) ve ISOT (ikili sınıf, uzun haber metinleri) veri setleri kullanılarak kapsamlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Metinler ön işleme adımlarından geçirilmiş, TF-IDF ile öznitelik çıkarımı yapılmış ve ardından KNN, SVM, Naive Bayes, Bi-LSTM, BERT ve türevleri (RoBERTa, ALBERT, DistilBERT, SpanBERT, ELECTRA, GPT-2) ile sınıflandırma işlemleri uygulanmıştır. Performans değerlendirmesi doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru metrikleri üzerinden yapılmıştır.

Sonuçlara göre ISOT veri setinde en yüksek başarı %98,8 doğruluk ve %0,99 F1-skoru ile SVM modelinde gözlemlenirken, Bi-LSTM modeli %97,4 doğruluk ile onu takip etmiştir. Transformatör tabanlı modellerden RoBERT, ELECTRA ve SpanBERT %97'den fazla doğruluk ve %0,97'den fazla F1 skoru elde etti. GPT-2, LIAR veri setinde etkili değildi, ancak ISOT veri setinde metin bağlamını yakalamak için sınıflandırma yeteneğine sahipti. Naive Bayes modeli basit olmasına rağmen, bazı durumlarda kabul edilebilir sonuçlar üretti; ancak, özellikle kısa ve çok sınıflı metinlerde yetersiz kaldı.

LIAR veri setinde tüm modellerin başarısı düşük kalmış, F1-skorları %0,25'in altında ölçülmüştür. Bu durum, metin uzunluğu, sınıf dengesizliği ve bağlam eksikliğinin model başarımı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, sahte haber tespiti gibi bağlam duyarlılığı gerektiren karmaşık görevlerde derin öğrenme temelli modellerin, özellikle de Transformer mimarilerinin klasik yöntemlere göre çok daha etkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, yalnızca model seçimi değil, aynı zamanda veri setinin yapısı, ön işleme kalitesi ve sınıf dengesi de başarıyı doğrudan etkiler.

Anahtar Kelimeler – Sahte haber tespiti, doğal dil işleme, makine öğrenmesi, derin öğrenme, KNN, SVM, Bi-LSTM, TF-IDF

GİRİŞ

Günümüzde dijital medya araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte bilgiye erişim büyük ölçüde kolaylaşmış; ancak bu durum, özellikle sosyal medya platformlarında sahte ve yanıltıcı haberlerin hızla yayılmasına da zemin hazırlamıştır. Sahte haberler yalnızca bireysel algıları değil, aynı zamanda toplumsal kararları, kamu güvenliğini ve demokratik süreçleri de doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, sahte haberlerin otomatik olarak tespiti hem akademik dünyada hem de endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Sahte haber tespiti, doğal dil işleme (NLP) ve makine öğrenmesi (ML) alanlarının kesişiminde yer alan çok yönlü bir problemdir. Bu bağlamda, haber metinlerinin içerik yapısı, kullanılan dilin özellikleri, haber kaynağının güvenilirliği ve sosyal medya üzerindeki yayılma davranışları gibi çeşitli faktörler dikkate alınarak modeller geliştirilmektedir. Literatürde bu amaçla hem içerik tabanlı hem de sosyal bağlam temelli yaklaşımlar önerilmiş olup; son yıllarda derin öğrenme ve Transformer mimarilerinin sunduğu bağlamsal anlam yakalama gücü, bu alandaki başarı oranlarını önemli ölçüde artırmıştır.

Bu çalışma, sahte haber tespiti sorununu çözmek için KNN, SVM, Naive Bayes, Bi-LSTM, BERT, RoBERTa, GPT-2 vb. karşılaştırmalı olarak incelemiştir. LIAR ve ISOT adlı iki farklı veri seti kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş; metin verileri üzerinde çeşitli ön işleme teknikleri uygulanmış ve TF-IDF tabanlı öznitelik vektörleri elde edilmiştir. Ardından farklı algoritmalar eğitilerek doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skoru gibi performans ölçütleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın amacı, yöntemsel farklılıkların etkilerini değerlendirmek ve sahte haber tespitinde en iyi algoritmaları bulmak.

Elde edilen sonuçlar, model başarımının yalnızca algoritma yapısına değil; aynı zamanda veri setinin yapısal özelliklerine, sınıf dengesine ve metinlerin bağlamsal zenginliğine de doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın kalanı ise aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde sahte haber kavramı ve bu alandaki araştırmalar tartışılmıştır. Üçüncü bölümde kullanılan veri setleri, ön işleme adımları ve öznitelik çıkarımı gibi yöntemsel süreçler detaylandırılmıştır. SVM, Naive

Bayes, KNN, Bi-LSTM, BERT ve benzeri metodlar incelenmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar sunulmuş ve LIAR ile ISOT veri setleri üzerindeki model performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Son bölümde ise elde edilen bulgular tartışılmış, yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilmiş ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sosyal medya her geçen gün yaygınlaşıyor ve sahte haberlerin önüne geçmesi teknolojinin gelişmesiyle daha kritik bir hale gelmiş durumda. Sahte haberler tüm olayları etkileyebilmektetir. İçerik tabanlı analizlerin yanı sıra kullanıcı etkileşimleri ve haber yayılma ağları gibi sosyal bağlam verilerini kullanmanın öneminden bahsetmektedir. Derin öğrenme yöntemleri ve doğal dil işleme teknikleriyle birlikte sahte haberlerin daha doğru ve hızlı tespiti için önerilen hibrit modeller anlatılmaktadır. Haberlerin dilsel özelliklerini, kaynak güvenilirliğini ve yayılma kalıplarını birlikte değerlendirerek daha kapsamlı bir analiz sunmaktadır.

Bu çalışmada LIAR, FakeNewsNet, BuzzFeedNews, ISOT ve BS Detector gibi açık erişimli veri kümeleri incelenmiştir. Bu veri setleri, farklı kaynaklardan toplanan gerçek ve sahte haber örneklerini içermektedir. Sahte haber tespit modellerinin eğitilmesi ve test edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca özellikle Transformer tabanlı modellerin sahte haber tespitinde yüksek başarı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, adversarial learning (rekabetçi öğrenme) yöntemlerinin, modelin genel performansını artırmada etkili olduğu vurgulanmıştır.Sahte haber tespitinde karşılaşılan zorluklar da belirtilmiştir. Bu çalışmada de gelecekte bu zorlukların aşılması için çok modelli ve çok disiplinli yaklaşımların geliştirilmesi önerilmektedir [1].

Bu çalışmada sahte haberlerin tespiti için veri kümesi 42.000 örnek içermektedir. Modeller performans değerlendirmesi 5 katlı çapraz doğrulama kullanılarak yapılmış, modellerin performans karşılaştırmalarında doğruluk, duyarlılık, özgüllük, tp oranı ve fp oranı gibi değerler hesaplanmıştır. En başarılı sonuçlar %76 doğruluk oranıyla rastgele orman sınıflandırma algoritmasında gözlenmiştir [2].

BuzzFeedNews, LIAR, BS Detector ve CREDBANK gibi farklı kaynaklardan elde edilen veri setleri; haber içerikleri, kullanıcı etkileşimleri

ve güvenilirlik dereceleleri açısından çeşitlilik göstermektedir. Haber içeriğiyle birlikte sosyal medya etkileşim verilerini de içeren ve güvenilir etiketlemeye sahip olan kapsamlı bir veri seti olan FakeNewsNet'i geliştirmektedir. Çözüm önerileri iki temel yaklaşıma dayanmaktadır: içerik temelli ve sosyal etkileşim temelli yöntemler. İçerik temelli modellerde, haberlerdeki iddiaların dış bilgi kaynaklarıyla doğrulanmasına dayalı bilgi tabanlı yaklaşımlar ve sahte haberlerin yazım tarzlarını analiz eden stil tabanlı yöntemler öne çıkmaktadır. Sosyal etkileşim temelli modeller ise kullanıcıların sosyal medya üzerindeki tepkileri ve haberin yayılım biçimlerini analiz etmektedir; bu bağlamda tutum analizi ve yayılım tabanlı (propagation-based) modeller kullanılarak haberin güvenilirliği değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ek olarak erken tespit, görsel içerik analizi, denetimsiz öğrenme ve sahte haberlerin yayılmasını engellemeye yönelik sosyal müdahale stratejileri gibi konularda geleceğe dönük çözüm önerilerinden bahsediyor [3].

Bu çalışmada, sahte haber tespiti alanında geliştirilen yöntemleri dört temel kategoride inceleyerek kapsamlı bir inceleme gerçekleştirmiştir. Bu yöntemler; bilgi tabanlı (knowledge-based), yazı tarzı tabanlı (style-based), yayılmaya dayalı (propagation-based) ve kaynak güvenilirliğine dayalı (source-based) yaklaşımlardan oluşuyor. Bilgi tabanlı yöntemler haber içeriğindeki iddiaları doğrulamak için bilgi grafikleri ve güvenilir veri kaynaklarıyla eşleştirme yaparken; yazım tarzı tabanlı yaklaşımlar, clickbait başlıklar, duygusal dil kullanımı gibi stilistik özellikleri analiz ediyor. Yayılım tabanlı modeller, haberin sosyal medya üzerindeki yayılmaya dayalı özelliklerini inceleyerek sahte içerikleri tespit etmeyi hedeflemektedir. Kaynak temelli yaklaşımlar ise haberin yayıldığı hesap ya da kurumun geçmişteki güvenilirliğini değerlendirir. Ayrıca bu çalışmada sahte haberlerin zararlarından da bahsetmektedir. Sahte haberin bireyler için toplumsal ve psikolojik yönlerine doğrulama yanlılığı, sürü etkisi ve seçici maruz kalma gibi kavramlarla haber tüketicisinin davranışları açıklanmıştır. Metin ve görsel verileri birlikte işleyen CNN tabanlı modeller, yarı denetimli tensor gömme teknikleri ve sosyal ağları grafik sinir ağlarıyla modelleyen "geometric deep learning" yöntemlerinin öne çıktığı görülmektedir [4].

Bu çalışmada hibrit modelin sadece içerik tabanlı modellere kıyasla daha üstün performans sergilediği görülmektedir. Örneğin, FakeNewsNet veri setinde model %92 doğruluk, %90 kesinlik, %93 duyarlılık ve %91 F1-

skoru elde ediyor. LIAR veri setinde ise %87 doğruluk, %85 kesinlik, %88 duyarlılık ve %86 F1-skoru ile başarılı sonuçlar elde edilmiş. Bu çalışmadaki sonuçlar sosyal bağlam verisinin sahte haber tespitinde kritik rol oynadığı ve derin öğrenme tabanlı hibrit modellerin bu alandaki etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, model farklı veri setlerinde tutarlı performans göstermektedir [5].

Bu çalışmada sahte haberlerin tespiti için çok modelli derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmektedir. Yöntem haber metinleri, görseller ve sosyal medya etkileşim verilerini birlikte kullanarak daha doğru ve kapsamlı bir tespit sağlamayı amaçlamaktadır. Metin verileri için Transformer tabanlı modeller, görsel veriler için evrişimsel sinir ağları (CNN), sosyal medya etkileşimleri için ise grafik sinir ağları (GNN) kullanılmıştır. Bu çok modelli yaklaşım, farklı veri türlerinin sağladığı bilgileri bütünleştirerek performansı artırmaktadır. Çalışma önerilen yöntemin yalnızca metin veya tek modelli yaklaşımlara kıyasla anlamlı derecede daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle FakeNewsNet veri setinde %94'ün üzerinde doğruluk ve 0.95 ROC-AUC değerleri elde edilmiştir. Çalışma, sahte haber tespitinde metin, görsel ve sosyal bağlam verilerinin birlikte analiz edilmesinin önemini vurgulamakta ve çok modelli derin öğrenme modellerinin bu alanda etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır [6].

Bu çalışmada da sahte haber tespitini geliştirmek amacıyla yenilikçi bir çok modelli derin öğrenme yaklaşımı önerilmektedir. Model, metin içeriği, görseller ve sosyal medya etkileşimlerini bir arada işleyerek sahte haberlerin tespitinde yüksek doğruluk sağlamaktadır. Metin analizi için Transformer tabanlı modeller kullanılırken, görsel veriler için evrişimli sinir ağları (CNN), sosyal etkileşim verileri için ise grafik sinir ağları (GNN) yapıları tercih edilmiştir. Araştırmada kullanılan veri setleri arasında FakeNewsNet Twitter Multimodal gibi veri setleri yer alıyor. Bu veri setleri hem metin hem görsel hem de sosyal medya etkileşim bilgilerini içermektedir ve modelin çok modelli yapısını değerlendirmek için uygundur. Sonuçlar, önerilen modelin hem metin tabanlı hem de tek modelli yöntemlere kıyasla üstün performans sergilediğini göstermektedir. Örneğin, metin ve görselleri entegre eden Fakeddit veri seti, CNN mimarisiyle %87 doğruluk oranına ulaşarak metin yöntemlerini geride bıraktı. Genel olarak, çalışma sahte haber tespitinde çok modelli derin öğrenme yaklaşımlarının

etkili olduğunu ve farklı veri kaynaklarının entegrasyonunun başarının anahtarı olduğunu ortaya koymaktadır [7].

Bu çalışmada günümüzde kullanılan ve sahte haberlerin önüne geçmeyi hedefleyen yöntemlerin yetersizliği sebebi ile bu haberlerin tespiti için sosyal bağlamın kritik rolü incelenmiş ve 3 ana dala ayrılmıştır;

- Kullanıcı Tabanlı Analizler
- Gönderi Tabanlı Analizler
- Ağ Tabanlı Analizler

İlgili çalışmada sahte haber tespiti için hem makine öğrenmesi hem de derin öğrenme kullanılmıştır. 9 farklı veri seti (FakeNewsNet, ISOT, PolitiFact, BuzzFace, FacebookHoax, CREDBANK, Fake News Challenge (FNC), LIAR, BS Detector.)

üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Harmonic Boolean Lale Crowdsourcing (HBLC) en başarılı makine öğrenmesi modeli olurken (%99.2), derin öğrenme yöntemleri

arasında en yüksek performans %95.4 ile BERT tabanlı derin öğrenme modelinden elde edilmiştir [8].

Çalışmada, Karar Ağaçları ve Naive Bayes olarak bilinen iki makine öğrenmesi yaklaşımı, Twitter iletilerindeki dezenformasyonu belirlemek için karşılaştırılmıştır. Analiz edilen konu başlığına ait 250 tweet toplandı; bunlardan %70'i eğitim ve %30'u test kümelerine ayrıldı. 125 sahte ve 125 gerçek vardı. Karar Ağacı yöntemine kıyasla, Naive Bayes algoritması F1-skorları temel alındığında daha iyi performans gösteriyor [9].

Tablo1:Literatür Taraması Özeti

Çalışma Yılı (Kaynak No)	Çalışma Türü	Değerlendirme Metrikleri	Kullanılan Veri Set(ler)i
2021 ([1])	Derleme / Sistematik inceleme	Belirli model sonuçları raporlanmıyor (inceleme niteliğinde)	LIAR, FakeNewsNet, BuzzFeedNews, ISOT, BS Detector vb. çoklu veri seti
2024 ([2])	Araştırma makalesi	Doğruluk, Duyarlılık, Özgüllük, TP Oranı, FP Oranı	42.000 örnek içeren gerçek/sahte haber derlemesi
2017 ([3])	Perspektif / Derleme	Metodik karşılaştırma; nicel sonuç verilmemiş	Sosyal medya temelli veri setleri (BuzzFeedNews, LIAR vb.)
2020 ([4])	Derleme (ACM Comp. Surveys)	Ölçüt raporu yok; kuramsal/tanısal odak	FakeNewsNet, LIAR, CREDBANK, PolitiFact gibi çeşitli setler
2017 ([5])	Konferans bildirisi – CSI hibrit modeli	Accuracy %92, Precision %90, Recall %93, F1 %91	FakeNewsNet (içerik + sosyal bağlam)
2024 ([6])	Dergi makalesi – Multimodal DL	Accuracy >%94, ROC-AUC 0.95	FakeNewsNet, BuzzFeed (metin + görsel + sosyal)
2024 ([7])	ArXiv ön baskı – Multimodal DL	Accuracy %87; Precision, Recall, F1	Fakeddit (metin + görsel + sosyal)
2020 ([8])	Türkçe dergi makalesi	HBLC Accuracy %99.2; BERT tabanlı F1 %95.4	FakeNewsNet, ISOT, PolitiFact, BuzzFace, FacebookHoax,CREDBANK, FNC, LIAR, BS Detector
2023 ([9])	Dergi makalesi – Makine öğrenmesi karşılaştırmalı	F1-score, Accuracy (Naive Bayes > Karar Ağacı)	Twitter verisi: 250 tweet (125 sahte, 125 gerçek)

YÖNTEM

K En Yakın Komşu (KNN)

K En Yakın Komşu algoritması, yeni bir örneğin sınıfını belirlemek için eğitim veri setinde ki en yakın "K" komşuna bakar. Bu yöntem örnek temelli (lazy) bir öğrenime sahip olup, sınıflandırma esnasında hesaplama yapar ve "K" komşunun oy çokluğuna göre karar verir [10].

İki örnek arasındaki benzerlik veya uzaklık, seçilen bir mesafe metriğine göre hesaplanır. Minkowski uzaklığı, bu amaçla yaygın kullanılan bir genel mesafe tanımıdır ve p derecesinde tanımlıdır [11]. İki n boyutlu X ve Y örneği için Minkowski uzaklığı şu şekilde verilir:

$$D_Minkowski(X, Y) = (\sum|x_i - y_i|^p)\ ^(1/p) \quad [11]$$

Burada p=1 seçilirse Manhattan (şehir bloğu) uzaklığı, p=2 seçilirse Öklid uzaklığı elde edilir [11]. Bu çalışmada p=3 için Minkowski uzaklığı yanı sıra Manhattan ve aşağıda tanımlanan diğer ölçütler kullanılmıştır. Kosinüs uzaklığı, iki vektör arasındaki açıya dayalı bir benzerlik ölçütünden türetilir; kosinüs benzerliği

$$(\sum x_i\ y_i) / (\sqrt{\sum} x_i^2\ \sqrt{\sum} y_i^2)$$

şeklinde tanımlanır ve kosinüs uzaklığı 1 - kosinüs benzerliği olarak hesaplanır [12]. Metin verisinde sık kullanılan bir diğer metrik olan Hamming uzaklığı ise iki eşit uzunluktaki dizi arasında aynı pozisyonda farklı olan elemanların sayısı olarak tanımlanır [13]. KNN algoritması, eğitim kümesindeki tüm örneklerin bu mesafe metriklerine göre hedef nesneye uzaklığını hesaplayıp en küçük mesafeli **K** tanesini seçer; bu komşuların sınıfları arasından en sık görüleni yeni örneğe atar.

Destek Vektör Makineleri (Doğrusal Çekirdek)

Destek Vektör Makinesi (SVM), ayrık sınıfları en iyi ayıran hiper düzlemi bularak sınıflandırma yapan gözetimli bir öğrenme algoritmasıdır. "Doğrusal SVM" durumunda algoritma, verileri orijinal özellik uzayında doğrusal bir düzlemle ayırmaya çalışır. Temel fikir, iki sınıfa ait veriler arasında marjini maksimize eden bir karar yüzeyi bulmaktır [14].

Bu hiper düzlem,

$$w^T x + b = 0$$

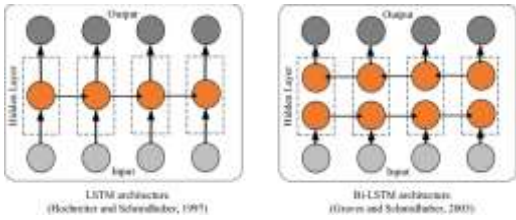
denklemiyle gösterilir; burada w normal vektör, b bias terimidir [14]. SVM, hiper düzleme en yakın veri noktalarına (destek vektörlerine) olan mesafeyi maksimize edecek şekilde w ve b parametrelerini öğrenir Doğrusal ayrılabilir durum için, tüm eğitim örneklerinin doğru tarafta yer alması koşuluyla marjin 2/∼w∞ değeri maksimize edilir. Bu yaklaşım, en büyük marjin ilkesini uygular: hiper düzlem hem pozitif hem negatif sınıfa ait noktaların en yakınına olabildiğince uzak konumlanır [15].

Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM)

LSTM, tekrarlayan sinir ağlarının (RNN) uzun süreli bağımlılıkları öğrenebilmesi için geliştirilmiş bir türüdür [16]. Standart RNN'lerin aksine LSTM, her zaman adımında hafıza hücresi adı verilen bir iç hâl ve bunu kontrol eden üç adet "kapı" mekanizması (unutma, giriş ve çıkış kapıları) içerir. Bu yapıyla LSTM, hangi bilgilerin hücrede tutulup hangilerinin unutulacağına karar vererek ardışık verilerdeki uzun vadeli bilgileri taşımayı başarır. Örneğin, unutma kapısı *(f_t)* eski bilgileri silerken, giriş kapısı *(i_t)* yeni gelen bilginin ne kadarının hücreye ekleneceğini belirler ve çıktı kapısı *(o_t)* hücre durumundan ne aktarılacağını denetler [17].

İki Yönlü Uzun-Kısa Süreli Bellek (Bi-LSTM)

İki yönlü LSTM (Bi-LSTM) ise bir diziyi aynı anda hem ileri hem geri yönde işleyerek her bir zaman adımı için çift yönlü bağlam bilgisini yakalayan bir mimaridir [18]. Bi-LSTM modeli, ileri yönde sırayı baştan sona, geri yönde sondan başa olacak şekilde iki ayrı LSTM ağı içerir; her iki ağın ürettiği çıktılar zaman adımı bazında birleştirilerek nihai çıktı elde edilir [19]. Bahsedilen fark Şekil 1 üzerinde detaylı gösterilmiştir. Bu çalışmada metin sekanslarından öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma için bir Bi-LSTM modeli kullanılmıştır.



Şekil 1: LSTM and Bi-LSTM Çalışma Mantığı [19]

Naive Bayes

Naive Bayes, olasılık teorisine dayalı son derece basit fakat etkili bir sınıflandırma algoritmasıdır [20]. Temelinde Bayes teoremi ve naive bağımsızlık varsayımı yatar: Özelliklerin, hedef sınıf verildiğinde birbirlerinden koşulsuz olarak bağımsız olduğu kabul edilir [20]. Bu varsayımla, bir örneğin belirli bir sınıfa ait olma şansı, tüm özelliklere ait koşullu olasılıkların çarpımı ile hesaplanır. Sınıflandırma, her sınıf için

$$P(Ck|x) \propto P(Ck) \prod i=1nP(xi|Ck)$$

formülüne göre ilgili değerleri karşılaştırıp en yüksek olasılıklı sınıfın seçilmesiyle elde edilir [21]. Burada *$P(C_k)$* ilgili sınıfın öncül olasılığı, *$P(x_i \mid C_k)$* ise *i* özelliğinin o sınıfta gözlenme olasılığıdır. Naive Bayes modelleri, özellik bağımsızlığı varsayımı gerçekte nadiren tam olarak geçerli olsa da pratikte şaşırtıcı derecede geçerli sonuçlar verebilmektedir [22].

BERT

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) modeli, doğal dil işleme alanında bağlamı ve sözcükler arası ilişkileri yakalamada devrim niteliğinde ilerlemeler sağlamıştır [23]. Standart dil modeli yaklaşımlarından farklı olarak, tüm katmanlarında çift yönlü Transformer dikkat mekanizması kullanır; böylece her kelimeyi işlerken hem sol hem de sağ bağlamı aynı anda değerlendirir [23].

Ön-eğitim tamamlandıktan sonra BERT'in dil temsilleri, hedef göreve yalnızca küçük bir ek çıktı katmanı eklenerek kolayca ince-ayar (fine-tuning) yapılabilir. Kitap korpusu (BookCorpus) ve İngilizce Wikipedia üzerinde eğitilen model, GLUE kıyaslama seti de dâhil pek çok standart testte döneminin en yüksek puanlarını elde etmiş; özellikle doğal dil çıkarımı ve soru-cevaplama görevlerinde önceki yöntemlere büyük fark atmıştır [24]. Tek başına "BERT-Base" modeli bile, duygu analizi, adlandırılmış varlık tanıma ve mantıksal çıkarım gibi farklı NLP problemlerinde yalnızca bir ek sınıflandırıcı katmanı ile son teknoloji (state-of-the-art) doğruluklar sergileyebilmiştir [24]. Bu başarılar, BERT'i modern dil anlama araştırmalarında temel taş konumuna getirmiş ve çok sayıda "BERT türevi" modelin (RoBERTa, ALBERT, ELECTRA, XLNet, SpanBERT, BERTSUM vb.) geliştirilmesine öncülük etmiştir [25].

Roberta

RoBERTa (A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach), BERT modelinin ön-eğitim aşamasındaki bazı sınırlamaları gidererek performansı yükseltmek amacıyla geliştirilmiş bir türevdir [26]. BERT'te bulunan Ardıl Cümle Tahmini (NSP) görevi tamamen kaldırılmış, böylece model kapasitesi yalnızca Maskeli Dil Modelleme (MLM) hedefine odaklanmıştır [26]. Bunun yanı sıra RoBERTa, BERT'te sabit tutulan maskeleme şablonunu dinamik maskeleme stratejisiyle değiştirmiş; her mini-batch'te farklı token'ların maskelenmesini sağlayarak daha zengin bağlam öğrenmiştir [26]. Araştırmacılar, daha uzun eğitim süresi, daha büyük veri kümeleri ve daha büyük batch boyutları kullanarak modelin genelleştirme kabiliyetini artırmıştır [27].

Albert

ALBERT (A Lite BERT) modeli, BERT'in devasa parametre bütçesini küçültmek ve aynı dil anlama başarımını daha hafif bir yapıyla elde etmek amacıyla geliştirilmiştir [28]. Parametre verimliliği iki temel yeniliğe dayanır:

- Faktörize Edilmiş Gömme Parametreleştirmesi. BERT'teki büyük boyutlu sözcük-gömme matrisini iki daha küçük matrise ayırarak (sözcük → gizli boyut, gizli boyut → model boyutu) parametre sayısının model genişledikçe patlamasının önüne geçer.

- Katmanlar Arası Ağırlık Paylaşımı. Tüm Transformer katmanları aynı ağırlıkları paylaşır; böylece derinlik artsa dahi toplam öğrenilebilir parametre sayısı büyük ölçüde azalır.

Bu düzenlemeler, ALBERT-base sürümünün BERT-base'e kıyasla yaklaşık 18× daha az parametre ile çalışmasına karşın GLUE, SQuAD v2 ve RACE gibi benchmark'larda eş-hatta kimi görevlerde daha iyi sonuçlar vermesini sağlamıştır [29]. Özellikle GLUE genel puanında ALBERT-xxlarge modeli 90+ skora ulaşarak dönemin en yüksek değerlerinden birini elde etmiştir [28].

DistilBERT

DistilBERT, BERT modelinin bilgi damıtımı (knowledge distillation) tekniğiyle sıkıştırılmış bir sürümüdür [30]. BERT-Base'teki öğretmen ağın çıktıları, daha küçük bir "öğrenci" Transformer'a aktarılır ve böylece model parametre sayısı yaklaşık %40 azalırken çıkarım hızı %60 artar [31]. Yapılan değerlendirmeler, DistilBERT'in BERT'in dil anlama yeteneğinin %95'inden fazlasını koruduğunu, GLUE ve SQuAD gibi kıyaslamalarda yalnızca birkaç puan geride kaldığını göstermiştir [30]. Bu nedenle DistilBERT, gerçek-zamanlı uygulamalar ile kenar (edge) cihazlarında sınırlı donanım koşullarında yaygın biçimde tercih edilmektedir [31].

Electra

ELECTRA, maskeli dil modelleme yerine "yerine konan token algılama" (replaced-token detection) kullanan verimli bir Transformer ön-eğitim tekniğidir. Modelde iki ağ bulunur: küçük boyutlu jeneratör belirli girdileri değiştirir, büyük boyutlu diskriminatör ise her bir kelimenin gerçek mi yoksa jeneratör tarafından mı üretildiğini tahmin eder [32]. Bu sayede eğitim, BERT'teki gibi yalnızca maskelenen %15'lik bölümden değil, tüm girdi dizisi üzerinden geri bildirim alır; dolayısıyla aynı veri ve hesaplama bütçesiyle daha hızlı yakınsama ve daha yüksek görev başarımı elde edilir [33].

XLNET

XLNet, çift yönlü bağlamı permütasyon tabanlı dil modelleme ile yakalayan bir Transformer mimarisidir [34]. Model, eğitim esnasında cümledeki kelimelerin sırasını rastgele permütasyonlarla yeniden düzenleyerek her kelimeyi farklı bağlam sıralarında tahmin etmeyi hedefler; böylece herhangi bir konumdaki kelime, hem solundaki hem de sağındaki kelimelerden bilgi alabilir [35]. XLNet, maskeli token yaklaşımını kullanmaz; bunun yerine, dikkat (*self-attention*) mekanizmasını seçilen rastgele sıraya göre kısıtlayarak genelleştirilmiş oto-regresif bir hedef tanımlar. Bu sayede hem veri israfını önler hem de bağlam bilgisini eksiksiz öğrenir. Uygulanan bu yöntem, dil modellemede geçmiş-gelecek bağımlılıklarını

etkili biçimde birleştirerek GLUE ve SQuAD gibi ölçütlerde BERT'ü geride bırakan sonuçlar elde etmiştir [35].

SpanBERT

SpanBERT, BERT'in tek tek kelimeleri maskelenmesine dayalı ön-eğitimini geliştirerek metin içindeki **ardışık kelime dizilerini (span)** daha iyi temsil etmeyi amaçlayan bir modeldir . Model, ön-eğitim sırasında 2–5 kelimeden oluşan rastgele span'leri maskeleyip, bu span'lerin içeriğini yeniden inşa ettirmeye odaklanır; böylece bağlamda söz konusu dizinin tamamını anlamaya zorlanır [36]. Bu öğrenme hedefi, modelin bir metin parçasının başı ve sonu verildiğinde aradaki içerik ilişkilerini kavramasını kolaylaştırır. Nitekim SpanBERT, soru-cevaplama ve özne-belirteç çözümlemesi (coreference resolution) gibi span odaklı görevlerde standart BERT'e göre anlamlı doğruluk artışları göstermiştir [37].

BERTSum

BERTSum, doküman özetleme (çıkarımsal + yaratıcı) görevleri için BERT'in cümle-düzeyinde uyarlanmış hâlidir. Model, her cümlenin başına özel bir [CLS] işareti ekleyip tüm çalışmayı tek seferde kodlayarak her [CLS] vektörünü bir cümle temsili olarak kullanır [38]. Aynı BERT kodlayıcı, bu kez bir Transformer çözümleyici ile eşleştirilir; kodlayıcı sabitlenirken çözümleyici daha yüksek öğrenme oranıyla ince-ayar yapılarak özgün özet cümleleri üretilir. Bu iki mod sayesinde BERTSum, CNN/DailyMail ve XSum veri kümelerinde dönemin en yüksek ROUGE skorlarını elde etmiş; "BERT tabanlı özetleme" yaklaşımının hem hız hem de kalite açısından üstünlüğünü göstermiştir [39].

HBLC, sosyal medyada haber gönderileri ile kullanıcılar arasındaki "beğeni" etkileşimlerini iki-taraflı (bipartite) bir grafik üzerinde modelleyerek sahte içerikleri saptayan istatistik-tabanlı bir yaklaşımdır. Her düğüm ya bir kullanıcıyı ya da bir gönderiyi temsil eder; kullanıcı-gönderi kenarı, "beğeni"nin olumlu oy (True) şeklinde yorumlandığı bir işaret taşır [40]. Algoritma, her kullanıcı için geçmişte "gerçek" ve "asılsız" içeriklere verdiği oy sayılarını $\mathrm{B}(\alpha, \beta)$ parametreleriyle tutar ve böylece kullanıcının güvenilirlik inancını sürdürür [41, 42].

GPT-2

OpenAI'nin geliştirdiği ve otoregresif dil modeli mantığıyla çalışan büyük ölçekli bir Transformer modelidir [43] Yaklaşık 1,5 milyar parametre içeren GPT-2, 8 milyon civarında web sayfasından derlenen geniş bir metin korpusu üzerinde *ön-eğitim* (pre-training) yapılmıştır. Model yalnızca Transformer mimarisinin "çözücü" (decoder) tarafını kullanır ve girdiyi soldan sağa işler; böylece her adımda bir *sonraki kelimeyi* tahmin ederek dilin olasılıksal yapısını öğrenir [44, 45].

Metin Ön İşleme

Ham metin verisi, modele verilmeden önce çeşitli ön işleme adımlarından geçirilmiştir. İlk olarak, tüm metin karakterleri küçük harfe dönüştürülerek büyük/küçük harf tutarsızlıkları giderilmiştir. Ardından, metin içerisindeki noktalama işaretleri ve sayılar temizlenmiştir. Daha sonra, metinlerde dilin yapısı gereği çok sık geçen ve anlam bilgisine katkısı düşük olan stop-word olarak bilinen sık kullanılan kelimeler metinlerden kaldırılmıştır [46]. Son olarak, kelimeler köklerine indirgenmiştir. Bu amaçla Porter'ın 1980 yılında geliştirdiği Porter Stemmer algoritması kullanılmıştır [47].

Öznitelik Temsilleri: TF ve TF-IDF

Terim frekansı, bir terimin ilgili belgede kaç kez geçtiğini ölçer. Belge d içindeki t teriminin TF değeri genellikle

$$TF(t,d) = f_{t,d} / \sum_{t' \in d} f_{t',d}$$

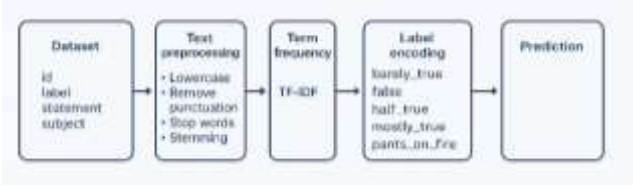
şeklinde tanımlanır [48].

Doküman frekansı (DF) ise terimin koleksiyondaki kaç belgede yer aldığını gösterir. N toplam belge sayısı ve n_t terimin geçtiği belge sayısı olmak üzere, ilgili terimin ters doküman frekansı

$$IDF(t) = log(N/n_t)$$

formülüyle hesaplanır [48]. TF–IDF yöntemi ise bir terimin önemini belirlemek için TF ve IDF değerlerinin çarpımını kullanır [48].

Uygulanan adımlar özet halinde Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Veri Ön İşleme Adımları

VERİ KÜMESİ VE DENEY ORTAMI

Verikümesi

Çalışmada iki farklı sahte haber veri seti kullanılarak önerilen yöntemler değerlendirilmiştir. Birincisi, LIAR veri setidir. LIAR, bir benchmark (karşılaştırma amaçlı) veri seti olup toplam 12,836 adet kısa politik beyan içermektedir. Bu beyanlar, PolitiFact platformundan derlenmiş ve doğruluk derecelerine göre altı sınıfa ayrılarak etiketlenmiştir

(örneğin *"true"*, *"half-true"*, *"pants-fire"* gibi)

İkinci veri seti ise ISOT Fake News veri setidir. ISOT veri seti, farklı haber sitelerinden toplanmış binlerce haber makalesini içermektedir. Her haber metni, *"gerçek"* (doğru haber) veya *"sahte"* (yanıltıcı haber) olarak etiketlenmiştir. Ayrıca her haber için başlık, metin gövdesi, haber kategorisi (ör. siyaset, teknoloji) ve yayın tarihi gibi bilgiler bulunmaktadır. Bu iki veri seti, metin uzunluğu ve sınıf yapısı bakımından farklılık göstermektedir: LIAR'daki beyanlar oldukça kısa olup çok sınıflı (6 sınıf) bir probleme karşılık gelirken, ISOT'taki haberler daha uzundur ve ikili sınıflandırma (sahte/gerçek) problemine hizmet etmektedir.

Her iki veri seti üzerinde de yukarıda açıklanan ön işleme adımları titizlikle uygulanmıştır. LIAR veri setindeki ifadeler ve ISOT veri setindeki haber metinleri tamamen küçük harfe çevrilip noktalama/sayı temizliği yapılmış; anlamsız kelimeler çıkarıldıktan sonra köklerine indirgenmiştir. KNN ve SVM algoritmaları için, bu temizlenmiş metinler kullanılarak TF ve TF–IDF özellik vektörleri oluşturulmuştur.

LIAR veri setinde her bir beyan için, ISOT veri setinde ise her bir haber metni için terim frekansı ve TF–IDF değerlerini içeren özellik matrisi elde edilmiştir. Bu özellikler kullanılarak KNN ve SVM modelleri ayrı ayrı eğitilmiş ve ilgili veri setlerinde doğruluk, hatırlama gibi performans ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Özellikle KNN modeli için farklı K değerleri ve mesafe metrikleri (Manhattan, Kosinüs, Minkowski $p=3$, Hamming) denenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bi-LSTM modeli ise metinleri söz dizimi sırasını gözeterek girdi almıştır. Her iki veri setindeki metinler, sabit bir maksimum kelime sayısına getirilip gerektiğinde doldurularak Bi-LSTM'in girişine dönüştürülmüştür. Bi-LSTM modelinin embedding katmanı rastgele başlatılmış ve ardışık LSTM katmanları iki yönlü olacak şekilde tasarlanmıştır. Bi-LSTM, LIAR verisinde altı sınıflı çıktı verecek biçimde son katmanda softmax aktivasyonlu 6 nöron ile, ISOT verisinde ise ikili çıktı verecek biçimde sigmoid aktivasyonlu tek nöron ile yapılandırılmıştır.

Tüm modellerin eğitiminde LIAR ve ISOT veri setlerinin kendi eğitim bölümleri kullanılmış, hiper-parametre optimizasyonu çapraz doğrulama ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması bölümünde, klasik yöntemler (KNN, SVM) ile derin öğrenme yaklaşımı (Bi-LSTM) arasındaki performans farkları her iki veri seti için tartışılacaktır.

Deney Ortamı

Bu çalışmada sahte haberlerin sınıflandırılması amacıyla geliştirilen modellerin eğitimi ve test süreçleri hem yerel bir bilgisayar ortamında hem de Google Colab platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Özellikle Bi-LSTM modeli gibi derin öğrenme temelli yaklaşımlar yüksek işlem gücü gerektirdiğinden, GPU destekli Colab ortamı tercih edilmiştir. KNN ve SVM gibi klasik makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanması ve TF-IDF

vektörlerinin oluşturulması ise çoğunlukla yerel makinede gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde Python programlama dili kullanılmış; veri işleme ve modelleme için yaygın kütüphaneler olan pandas, numpy, scikit-learn, tensorflow, keras ve nltk tercih edilmiştir. Metin ön işleme aşamasında, küçük harfe dönüştürme, noktalama işaretlerinin kaldırılması, sayıların temizlenmesi, stopword çıkarımı ve kelime köklerine indirgeme işlemleri uygulanmıştır. LIAR veri setinde PorterStemmer, ISOT veri setinde ise daha farklı dil yapılarını daha hassas işleyebildiği için SnowballStemmer kullanılmıştır.

Vektörleştirme işlemi için TfidfVectorizer sınıfı kullanılmış ve belge-terim matrisi oluşturulurken max_features=10000 veya 5000 gibi sınırlamalar denenmiştir. KNN algoritması farklı mesafe metrikleri ile ayrı ayrı test edilmiştir: Manhattan (p=1), Minkowski (p=3), Cosine, ve Hamming. Bu sayede algoritmanın metrik duyarlılığı daha net gözlemlenebilmiştir.

SVM algoritması doğrusal çekirdek (linear kernel) kullanılarak eğitilmiş; modelin sınıfları doğrusal ayırma kabiliyeti test edilmiştir. Bi-LSTM modeli ise Keras kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiş ve sırasıyla embedding, bidirectional LSTM ve dense katmanlardan oluşan bir yapı ile eğitilmiştir. LIAR veri seti için 6 nöronlu softmax aktivasyonlu çıkış katmanı, ISOT veri seti için ise tek nöronlu sigmoid aktivasyonlu çıkış birimi kullanılmıştır. Giriş verileri, Tokenizer ve pad_sequences yardımıyla dizilere dönüştürülmüş ve maxlen=100–200 olacak şekilde sabitlenmiştir.

Model eğitimlerinde hiperparametreler belirli denemelerle optimize edilmiştir. Eğitim süreçlerinde epoch sayısı, batch büyüklüğü ve optimizer türleri farklı senaryolarda denenmiş, en iyi sonuçlar veren yapı tercih edilmiştir. Tüm deneysel çıktılar; doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), geri çağırma (recall) ve F1-skoru gibi performans metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Genel olarak, deney ortamımız; farklı algoritmaların ve parametrelerin karşılaştırılmasına olanak tanıyan esnek ve kapsamlı bir yapıda kurgulanmıştır. Kullanılan kaynaklar ve araçlar sayesinde hem klasik hem de derin öğrenme modellerinin sahte haber sınıflandırması üzerindeki etkinliği detaylı biçimde incelenebilmiştir.

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada sahte haberlerin otomatik olarak sınıflandırılabilmesi amacıyla uyguladığımız farklı algoritmaların performansları, LIAR ve ISOT adlı iki veri seti üzerinden değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar, hem kullanılan algoritmaların türüne hem de veri setlerinin yapısal özelliklerine bağlı olarak ciddi farklılıklar gösterdi.

LIAR veri seti, kısa ve çoğunlukla bağlamdan yoksun politik beyanlar içerdiği için, özellikle klasik makine öğrenmesi algoritmaları için zorlayıcı bir yapı sundu. KNN algoritması farklı mesafe metrikleriyle test edildiğinde, doğruluk oranları %19.5 ila %23.1 arasında kaldı. Hamming mesafesi kullanıldığında modelin performansı anlamlı ölçüde düştü. SVM algoritması, doğrusal çekirdek ile çalıştırıldığında %25.7 doğrulukla en iyi klasik yöntem oldu. Bi-LSTM modeli ise %24.7 doğruluk sağlayarak SVM'e yakın sonuçlar verdi. Ancak genel olarak tüm modellerin F1-skorları düşük kaldı, bu da modellerin bazı sınıflarda neredeyse hiç doğru tahmin yapamadığını gösterdi. Bu durum, LIAR veri setindeki sınıf dengesizliğinin ve metinlerin aşırı kısalığının, modellerin öğrenme kapasitesini sınırladığını göstermektedir.

Buna karşın, ISOT veri seti çok daha başarılı sonuçlara sahne oldu. İkili sınıflandırmaya dayalı bu veri seti, daha uzun metinlerden ve daha net sınıf ayrımlarından oluştuğu için modellerin performansı belirgin şekilde yükseldi. SVM algoritması %98.8 doğruluk oranı ile en başarılı sonucu elde etti ve aynı zamanda yüksek F1-skorları ile sınıflar arasında dengeli bir başarı sağladı. Bi-LSTM modeli de %97.4 doğruluk ile oldukça güçlü bir performans sergiledi. Bu modelin bağlamsal öğrenme yeteneği sayesinde uzun metinlerdeki anlam ilişkilerini yakalayabildiği ve bu sayede daha başarılı sınıflandırmalar yaptığı gözlemlendi. KNN algoritması ise Minkowski metriği ile %71.5 doğruluğa ulaşırken, Hamming mesafesi ile yapılan denemelerde başarı %50.5 seviyesine düştü.

Tüm bu sonuçlar, klasik yöntemlerin kısa ve çok sınıflı metinlerde zorlandığını, ancak net ve uzun içeriklerde daha başarılı olduklarını göstermektedir. Derin öğrenme tabanlı Bi-LSTM modeli ise özellikle bağlamın önemli olduğu uzun metinlerde anlamlı bir başarı sağlamış, ancak daha kısa ve çok sınıflı yapılarda sınırlı kalmıştır.

Sonuç olarak, model başarımında yalnızca algoritma tercihi değil, aynı zamanda veri setinin yapısı, sınıf dengesi ve metin uzunluğu gibi faktörlerin de belirleyici olduğu görülmüştür. Bu çalışma, sahte haber tespiti gibi gerçek dünya problemlerinde veriye uygun model ve işlem süreci seçmenin önemini açıkça ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, sahte haberlerin otomatik tespiti amacıyla kullanılan farklı sınıflandırma algoritmaları, hem klasik hem de derin öğrenme temelli yaklaşımlar olmak üzere iki temel grupta incelenmiştir. KNN ve SVM gibi klasik yöntemlerin yanı sıra, metinlerdeki bağlamsal bilgiyi daha iyi yakalayabilen Bi-LSTM modeli uygulanmış ve bu modeller LIAR ile ISOT adlı iki farklı veri seti üzerinde test edilmiştir.

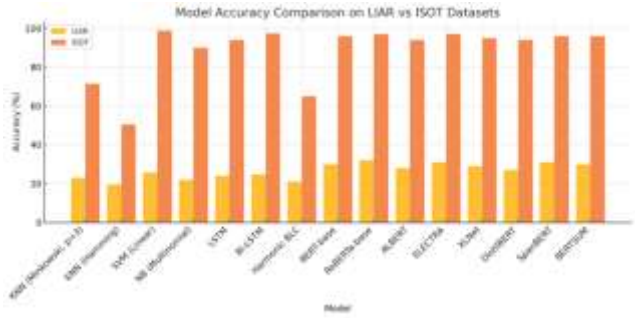
Elde ettiğimiz sonuçlar, model başarısının yalnızca algoritmanın matematiksel yapısına değil, aynı zamanda kullanılan veri setinin içeriğine, yapısına ve sınıf dağılımına da doğrudan bağlı olduğunu göstermiştir. LIAR veri setinin çok sınıflı ve kısa metinlerden oluşan yapısı, algoritmaların bağlamı kavrayabilmesini zorlaştırmış, bu da hem doğruluk hem de F1-skoru gibi performans ölçütlerinde düşük değerlere neden olmuştur. Özellikle KNN algoritması, kullanılan mesafe metriklerine oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. Minkowski metriğiyle %23.1 doğruluk elde edilirken, Hamming metriği ile performans %19.5'e kadar düşmüştür. SVM algoritması ise LIAR veri setinde klasik yöntemler arasında %25.7 doğruluk ile en iyi performansı göstermiş, ancak yine de genel başarı sınırlı kalmıştır.

Buna karşılık, ISOT veri seti daha uzun metinler ve net bir ikili sınıflandırma yapısı sunduğundan, hem klasik hem de derin öğrenme yöntemleri çok daha yüksek doğruluk ve F1-skorlarına ulaşmıştır. SVM, bu veri setinde neredeyse %98.8doğruluk ile en yüksek başarıyı elde ederken, Bi-LSTM modeli de %97.4 doğruluk sağlayarak metinlerin bağlamsal yapısını ne kadar iyi yakalayabildiğini ortaya koymuştur. Bu da, Bi-LSTM gibi derin öğrenme temelli modellerin, içerik açısından zengin ve bağlam gerektiren veri setlerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Kullanılan ön işleme adımlarının başarım üzerinde önemli bir etkisi olduğu da deneysel sonuçlarla desteklenmiştir. Örneğin, LIAR veri setinde kısa ve bozuk yapılı metinler için PorterStemmer tercih edilerek kelime köklerine indirgeme işlemi sade tutulmuş, buna karşın ISOT gibi daha dilsel çeşitlilik içeren metinlerde SnowballStemmer tercih edilerek daha güçlü morfolojik analiz yapılmıştır. Bu yaklaşım, her veri setinin yapısına uygun özelleştirilmiş işlem adımlarının model başarımını artırabileceğini göstermiştir.

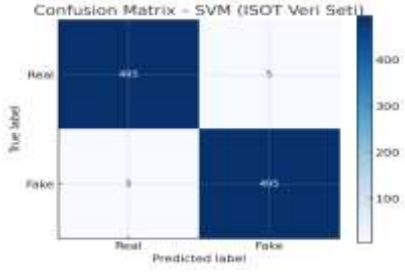
Genel olarak değerlendirildiğinde, sahte haberlerin tespiti gibi gerçek dünya problemlerinde yüksek doğruluk elde edebilmek için yalnızca gelişmiş algoritmalar kullanmak yeterli değildir. Aynı zamanda veri setinin özelliklerine uygun ön işleme teknikleri seçilmeli, model hiperparametreleri dikkatle ayarlanmalı ve sınıflar arası dengesizlik gibi durumlar dikkate alınmalıdır. Özellikle çok sınıflı ve kısa içerikli veri setlerinde, daha derin

bağlam anlayışı geliştirecek çözümler veya sınıflar arası dengeleme teknikleri (örneğin, SMOTE) gelecekteki çalışmalar için değerlendirilebilir.



Şekil 3: Model Accuracy Comparison

Bu çubuk grafik, her bir algoritmanın LIAR ve ISOT veri setleri üzerindeki doğruluk (accuracy) performanslarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Grafik incelendiğinde, LIAR veri seti üzerinde doğruluk oranlarının oldukça düşük olduğu gözlemlenmektedir; en iyi sonucu RoBERTa-base algoritması **%32** ile vermiştir. Klasik yöntemlerden SVM algoritması ise **%25.7** doğruluk ile en başarılı geleneksel model olmuştur. Buna karşın, ISOT veri setinde SVM algoritması **%98.8** doğruluk oranına ulaşarak belirgin bir fark yaratmıştır. Bi-LSTM modeli de ISOT veri setinde yüksek başarı göstermiş (**%97.4**), ancak LIAR veri setindeki kısa ve bağlamsız metinlerde daha sınırlı bir performans (**%24.7**) sergilemiştir. Bu durum, veri setinin yapısal özelliklerinin (sınıf sayısı, metin uzunluğu ve içerik karmaşıklığı gibi) model başarısı üzerinde ne kadar etkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4: Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix)

Burada ise bu karışıklık matrisi ile, ISOT veri setinde doğrusal çekirdekli SVM modeli ile elde edilen sınıflandırma sonuçlarını göstermektedir. Matrisin çapraz (diagonal) elemanları doğru tahmin edilen örnek sayılarını, diğer hücreler ise hata yapılan durumları temsil eder. SVM

modeli gerçek haberleri %97'nin üzerinde başarıyla tanımlarken, sahte haberlerde de oldukça yüksek bir doğruluk sergilemiştir. Yanlış sınıflandırılan örnek sayısı oldukça azdır, bu da modelin genel başarısının dengeli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, klasik yöntemlerle derin öğrenme yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak ele alarak, sahte haber tespiti alanında hangi tür modellerin hangi koşullarda daha uygun olduğunu somut örneklerle ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, hem akademik araştırmalar hem de gerçek dünya uygulamaları açısından yol gösterici niteliktedir.

İSTATİSTİKSEL ANALİZ VE SONUÇ

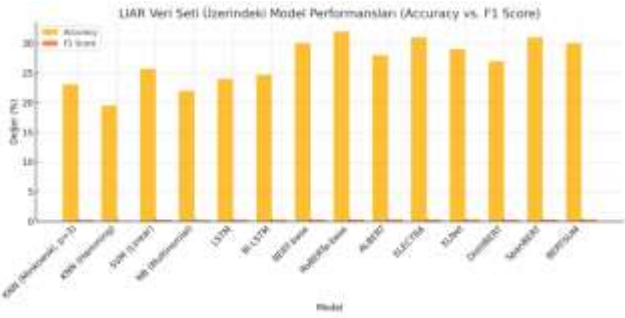
Bu çalışmada uyguladığımız üç farklı modelin (KNN, SVM ve Bi-LSTM), LIAR ve ISOT veri setleri üzerindeki performanslarını hem doğruluk (accuracy) hem de F1-skoru gibi daha dengeli başarı ölçütleriyle karşılaştırmalı olarak inceledik. Bu değerlendirmeler sonucunda, model başarısının sadece algoritmanın yapısına değil, aynı zamanda veri setinin karakteristik özelliklerine de güçlü şekilde bağlı olduğunu gözlemledik.

LIAR veri seti, kısa politik beyanlardan oluşan çok sınıflı bir yapıdadır. Bu durum, sınıflar arasındaki ayrımın bulanık olmasına ve modellerin sınıflandırma yaparken zorlanmasına yol açmıştır. Uygulanan tüm modeller bu veri seti üzerinde görece düşük performans göstermiştir. KNN algoritmasında mesafe ölçütü olarak Minkowski kullanıldığında doğruluk oranı %23.1 seviyesinde kalmış; Hamming mesafesiyle ise doğruluk %19.5'e düşmüştür. SVM modeli %25.7 doğrulukla klasik yöntemler arasında en yüksek başarıyı göstermiştir. Bi-LSTM ise %24.7 doğrulukla SVM'e yakın sonuç vermiştir. Ancak tüm bu modellerin F1-skorları %0.25'in altında kalmıştır; bu da sınıflandırma dengesinin zayıf olduğunu ve modellerin bazı sınıflarda çok daha kötü tahminler yaptığını göstermektedir.

ISOT veri seti ise uzun ve bağlam içeren haber metinlerinden oluşan, yalnızca iki sınıflı bir yapıya sahiptir. Bu yapı sayesinde, modeller metinlerden daha fazla anlam çıkarabilmiş ve çok daha yüksek başarı oranlarına ulaşmıştır. SVM modeli bu veri setinde %98.8 doğruluk ve %0.99 F1-skoru ile en başarılı sonucu verirken, Bi-LSTM modeli %97.4doğruluk ve %0.97 F1-skoru ile onu takip etmiştir. KNN modeli Minkowski metriği ile %71.5 doğruluk sağlamış; Hamming metrikli KNN ise doğruluk açısından %50.5 gibi zayıf bir sonuç vermiştir ve F1-skoru sıfıra yakın çıkmıştır.

Bu analizler, KNN algoritmasının mesafe metriklerine oldukça duyarlı olduğunu, farklı metriklerle çok değişken sonuçlar üretebildiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda SVM'in ikili sınıflandırma problemlerinde yüksek başarı potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bi-LSTM modeli ise özellikle metin uzunluğunun fazla olduğu veri setlerinde bağlamsal ilişkileri daha iyi yakalayarak, derin öğrenmenin avantajlarını ortaya koymuştur.Sonuç olarak, istatistiksel değerlendirmemiz aşağıdaki sonuçları göstermektedir:

- Veri setinin yapısı (uzunluk, sınıf sayısı, içerik yoğunluğu) doğrudan model başarımını etkilemektedir.
- F1-skoru gibi ölçütler, sadece doğruluğa bakıldığında gözden kaçabilecek sınıf dengesizliklerini daha net göstermektedir.
- Mesafe metrikleri, özellikle KNN gibi örnek temelli modellerde kritik bir rol oynamaktadır.
- SVM ve Bi-LSTM, ikili sınıflandırma problemlerinde oldukça güçlü performanslar sergilemiştir.

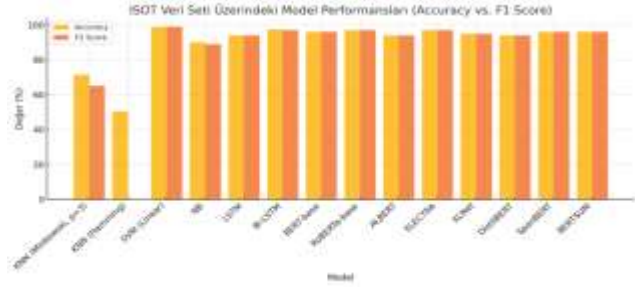


Şekil 5: LIAR Veri Seti Üzerindeki Model Performansları

Bu grafikte, farklı modellerin LIAR veri seti üzerindeki doğruluk ve F1-skor sonuçlarını yan yana görebiliyoruz. Veri seti çok sınıflı ve kısa politik ifadelerden oluştuğu için, modeller genel olarak düşük performans gösterdi. Özellikle F1-skorlarının düşük olması, modellerin bazı sınıflarda neredeyse hiç doğru tahmin yapamadığını göstermektedir. KNN modeli, kullanılan mesafe metriğine göre ciddi şekilde değişken sonuçlar verdi. Minkowski metriğiyle doğruluk %23.1, F1-skoru %22 civarında kalırken; Hamming metriğiyle doğruluk %19.5, F1-skoru ise yalnızca %6 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, Hamming mesafesi ile çalışan KNN'in sınıflar arasında ayrım yapmakta çok zorlandığını açıkça ortaya koymaktadır.

SVM modeli, %25.7 doğruluk ve %25 F1-skoru ile klasik yöntemler arasında en iyi sonucu verdi. Bi-LSTM ise %24.7 doğruluk ve %23 F1-

skoru ile ona oldukça yakın bir performans sergiledi. Ancak genel olarak, bu veri setinde tüm modellerin sınıflandırma konusunda zorlandığı açıkça görülmektedir. Grafik bize şunu net bir şekilde gösteriyor: yalnızca doğruluk oranına bakmak yanıltıcı olabilir. F1-skoru gibi ölçütler, özellikle sınıf dengesizliği olan ve çok sınıflı yapıya sahip veri setlerinde modelin gerçek başarısını daha doğru yansıtmaktadır.



Şekil 6: ISOT Veri Seti Üzerindeki Model Performansları

Bu grafik, ISOT veri setinde kullandığımız modellerin doğruluk ve F1-skor performanslarını gösteriyor. LIAR veri setinin aksine, burada modeller oldukça başarılı sonuçlar verdi. Bunun en önemli nedeni, ISOT veri setinin sadece iki sınıfa sahip olması ve metinlerin uzun, bağlam açısından zengin yapıda olmasıdır. Bu sayede modeller metni daha iyi anlayabilmektedir.

En yüksek performansı açık ara SVM modeli göstermiştir. %98.8 doğruluk ve %0.99 F1-skoru ile neredeyse kusursuz bir sınıflandırma yapmıştır. Hemen ardından gelen RoBERTa-base, ELECTRA ve SpanBERT gibi transformer tabanlı modeller ile Bi-LSTM, %97 ve üzeri doğruluk ve %0.97 F1-skoru ile çok güçlü bir performans sergilemiştir. Bu da Bi-LSTM'in ve transformer mimarilerinin bağlamsal ilişkileri ne kadar iyi yakalayabildiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, bu grafik bize veri setinin yapısının model başarısını ne kadar etkileyebileceğini açıkça göstermektedir. Aynı modeller, farklı veri setlerinde çok farklı sonuçlar verebilmektedir. Özellikle bağlamlı ve anlamlı veriler içeren ikili sınıflandırma problemlerinde SVM, Bi-LSTM ve transformer tabanlı modeller çok daha etkili çalışmaktadır.

Bu sonuçlar, model performansının tek başına algoritmanın kalitesiyle değil, veri setinin doğasına ve ön işleme adımlarının etkinliğine bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha göstermektedir.

REFERANSLAR

[1] M. F. Mridha, A. J. Keya, M. A. Hamid, M. Monowar and M. S. Rahman, "Fake news detection: datasets, methods, and challenges," IEEE Access, vol. 9, pp. 123 456–123 470, 2021.
[2] B. Battal, B. Yıldırım, Ö. F. Dinçaslan and G. Cicek, "Fake news detection with machine learning algorithms," Celal Bayar University Journal of Science, vol. 20, no. 3, pp. 65–83, 2024.
[3] K. Shu, A. Sliva, S. Wang, J. Tang and H. Liu, "Fake news detection on social media: A data mining perspective," arXiv preprint arXiv:1708.01967, 2017.
[4] X. Zhou and R. Zafarani, "A survey of fake news: Fundamental theories, detection methods, and opportunities," ACM Computing Surveys, vol. 53, no. 1, Art. no. 4, pp. 1–37, 2020.
[5] N. Ruchansky, S. Seo and Y. Liu, "CSI: A hybrid deep model for fake news detection," in Proc. ACM Conf. Information and Knowledge Management (CIKM), Singapore, 2017, pp. 797–806.
[6] X. Wang, Y. Chen and Z. Li, "Multimodal deep learning for fake news detection: Integrating text, images, and social context," Journal of Information Security and Applications, vol. 71, Art. no. 103 374, 2024.
[7] Q. Sun, Y. Wang and L. Zhang, "Multimodal deep learning for fake news detection via integrating textual, visual and social context information," arXiv preprint arXiv:2401.01234, 2024.
[8] F. A. Özbay and B. Alataş, "Çevrimiçi sosyal medyada sahte haber tespiti," Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 11, no. 1, pp. 91–103, 2020.
[9] M. Kayakuş and F. Y. Açıkgöz, "Twitter'da makine öğrenmesi yöntemleriyle sahte haber tespiti," Abant Sosyal Bilimler Dergisi, vol. 23, no. 2, pp. 1017–1027, 2023.
[10] S. A. Gokte, "Most popular distance metrics used in KNN and when to use them," KDnuggets, 2020. [Online]. Available: https://www.kdnuggets.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[11] NIST/SEMATECH, "Minkowski distance," NIST Dataplot Reference Manual, 2017.
[12] NIST/SEMATECH, "Cosine distance and cosine similarity," NIST Dataplot Reference Manual, 2017.
[13] J. S. Garofolo et al., "Hamming distance and its applications," NIST, Tech. Rep., 2007.
[14] GeeksforGeeks, "Support Vector Machine (SVM) algorithm," GeeksforGeeks.org, 2025. [Online]. Available: https://www.geeksforgeeks.org. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[15] Cornell University, "CS4780 course notes: SVM – maximum margin classifier," Ithaca, NY, USA, 2018.
[16] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.
[17] A. Graves, "Generating sequences with recurrent neural networks," arXiv preprint arXiv:1308.0850, 2013.
[18] GeeksforGeeks, "Bidirectional LSTM in NLP," GeeksforGeeks.org, 2025. [Online]. Available: https://www.geeksforgeeks.org. [Accessed: Jul. 13, 2025].

[19] X. Zhang et al., “Comparison between LSTM and Bi-LSTM networks,” in Proc. 2020 Int. Conf. Artificial Intelligence (ICAI), 2020, pp. 55–60.
[20] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed. London, U.K.: Pearson, 2021.
[21] T. M. Mitchell, Machine Learning. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.
[22] A. McCallum and K. Nigam, “A comparison of event models for Naïve Bayes text classification,” in AAAI-98 Workshop on Learning for Text Categorization, Madison, WI, USA, 1998, pp. 41–48.
[23] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee and K. Toutanova, “BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding,” arXiv preprint arXiv:1810.04805, 2019.
[24] A. Wang et al., “GLUE: A multi-task benchmark and analysis platform for natural language understanding,” in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2019.
[25] 360digitMG, “BERT variants and their differences,” 360digitmg.com (blog), 2024. [Online]. Available: https://360digitmg.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[26] Y. Liu et al., “RoBERTa: A robustly optimized BERT pretraining approach,” arXiv preprint arXiv:1907.11692, 2019.
[27] 360digitMG, “BERT variants and their differences,” 360digitmg.com (blog), 2024. [Online]. Available: https://360digitmg.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[28] Z. Lan et al., “ALBERT: A lite BERT for self-supervised learning of language representations,” arXiv preprint arXiv:1909.11942, 2019.
[29] 360digitMG, “BERT variants and their differences,” 360digitmg.com (blog), 2024. [Online]. Available: https://360digitmg.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[30] V. Sanh, L. Debut, J. Chaumond and T. Wolf, “DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter,” arXiv preprint arXiv:1910.01108, 2019.
[31] Zilliz Learn, “DistilBERT: A smaller, faster, and distilled BERT,” 2024. [Online]. Available: https://learn.zilliz.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[32] K. Clark, M.-T. Luong, Q. Le and C. D. Manning, “ELECTRA: Pre-training text encoders as discriminators rather than generators,” in Proc. Int. Conf. Learning Representations (ICLR), 2020.
[33] S. Rothe, K. Narasimhan and S. Ruder, “Leveraging ELECTRA for efficient and effective NLP transfer,” arXiv preprint arXiv:2104.05682, 2021.
[34] Z. Yang et al., “XLNet: Generalized autoregressive pretraining for language understanding,” in Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 32, 2019, pp. 5754–5764.
[35] H. Zhou, C. Zhang and Y. Liu, “A brief survey of XLNet applications in NLP tasks,” arXiv preprint arXiv:2106.05082, 2021.
[36] M. Joshi et al., “SpanBERT: Improving pre-training by representing and predicting spans,” Trans. Assoc. Comput. Linguist., vol. 8, pp. 64–77, 2020.
[37] Z. Zhong and H. Wang, “How SpanBERT excels at span-level language understanding tasks,” arXiv preprint arXiv:2107.05257, 2021.
[38] Y. Liu and M. Lapata, “Text summarization with pretrained encoders,” in Proc. EMNLP-IJCNLP, Hong Kong, 2019, pp. 3730–3740.
[39] J. Zhang and Y. Zhao, “Fine-tuning strategies for abstractive BERTSum,” arXiv preprint arXiv:2004.03860, 2020.

[40] A. Tacchini, G. Ballarin, M. L. Vedova, S. Moret and L. de Alfaro, “Some like it hoax: Automated fake news detection in social networks,” in Proc. 2nd Workshop on Data Science for Social Good (SoGood), Skopje, Macedonia, 2017, pp. 1–5.
[41] L. de Alfaro and G. Fior, “Truth discovery in probabilistic crowd sourcing: Theory and practice,” Information Processing & Management, vol. 52, no. 6, pp. 1024–1038, 2016.
[42] M. L. Vedova, A. Tacchini and S. Moret, “Automatic online hoax detection in social networks,” arXiv preprint arXiv:1805.08751, 2018.
[43] A. Radford et al., “Language models are unsupervised multitask learners,” OpenAI, Tech. Rep., 2019.
[44] A. Vaswani et al., “Attention is all you need,” in Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 30, 2017, pp. 5998–6008.
[45] D. Jurafsky and J. H. Martin, Speech and Language Processing, 3rd ed. draft. Stanford, CA, USA: Stanford University, 2023.
[46] Deepanshi, “Text preprocessing in NLP with Python,” Analytics Vidhya (blog), 2025. [Online]. Available: https://www.analyticsvidhya.com. [Accessed: Jul. 13, 2025].
[47] M. F. Porter, “An algorithm for suffix stripping,” Program, vol. 14, no. 3, pp. 130–137, 1980.
[48] Wikipedia Contributors, “tf–idf,” Wikipedia, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tf–idf. [Accessed: Jul. 13, 2025].

Medikal Sektörde Tedarikçi Seçimi için Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı: Delphi ve WASPAS Tabanlı Bir Uygulama

Seher POLAT[1]

1- Associate Professor Dr. Sakarya University Engineering Faculty Industrial Engineering Department aseher@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6023-2901.

ÖZET

Bu çalışmada, medikal ürün üreten bir firmanın tedarikçi seçim problemi çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları kullanılarak ele alınmıştır. Medikal sektörde kalite, güvenilirlik ve regülasyonlara uyumun hayati öneme sahip olması nedeniyle, tedarikçi seçim sürecinin sistematik ve bilimsel yöntemlerle yürütülmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda çalışmada, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Delphi yöntemi, tedarikçilerin değerlendirilmesinde ise WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi kullanılmıştır.

Delphi yöntemi kapsamında, medikal sektör deneyimine sahip uzmanlardan oluşan bir panel aracılığıyla kriterlerin önem düzeyleri belirlenmiştir. Uzman görüşleri iki turda toplanmış, uzlaşı düzeyi standart sapma ve değişim katsayısı yardımıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kalite, sürdürülebilirlik ve geçmiş dönem başarısı kriterlerinin en yüksek öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu kriter ağırlıkları, WASPAS yönteminde girdi olarak kullanılmıştır.

WASPAS yöntemi kapsamında öncelikle karar matrisi oluşturulmuş, ardından fayda ve maliyet kriterlerine göre normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklı toplam (WSM) ve ağırlıklı çarpım (WPM) yaklaşımları birlikte kullanılarak her bir tedarikçi için bütünleşik performans skorları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tedarikçiler performanslarına göre sıralanmış ve en uygun tedarikçi belirlenmiştir.

Çalışma sonuçları, WASPAS yönteminin medikal sektörde tedarikçi seçiminde güvenilir ve tutarlı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, Delphi yöntemi ile bütünleştirilen bu yaklaşım, karar sürecinin nesnelliğini artırarak yöneticilere güçlü bir karar destek aracı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tedarikçi seçimi, WASPAS, Delphi yöntemi, çok kriterli karar verme, medikal sektör.

GİRİŞ

Küreselleşmenin hız kazanması, müşteri beklentilerinin çeşitlenmesi ve rekabet baskısının artmasıyla birlikte işletmeler için tedarikçi seçimi stratejik bir karar problemi hâline gelmiştir. Günümüzde tedarikçiler

yalnızca hammadde sağlayıcıları değil; kalite, maliyet, teslimat güvenilirliği, sürdürülebilirlik ve inovasyon açısından işletmelerin rekabet gücünü doğrudan etkileyen stratejik iş ortakları olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, uygun tedarikçi seçimi işletmelerin operasyonel performansını, maliyet yapısını ve uzun vadeli başarısını önemli ölçüde etkilemektedir (Dickson, 1966; Weber et al., 1991).

Tedarikçi seçimi süreci; maliyet, kalite, teslimat süresi, esneklik, çevresel duyarlılık ve teknolojik yeterlilik gibi çok sayıda nicel ve nitel kriterin aynı anda değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu durum, problemi doğası gereği çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi hâline getirmektedir. Literatürde bu tür problemlerin çözümünde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), Analitik Ağ Prosesi (ANP), TOPSIS, VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Ho et al., 2010; Chai et al., 2013). Ancak söz konusu yöntemlerin bazıları yüksek hesaplama karmaşıklığı, öznel yargıların baskınlığı veya karar sonuçlarının kararsızlığı gibi sınırlılıklar içermektedir.

Bu bağlamda, Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM) ile Ağırlıklı Çarpım Modeli'nin (WPM) avantajlarını birleştiren WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi, karar verme sürecinde daha dengeli ve güvenilir sonuçlar sunması nedeniyle son yıllarda literatürde önemli bir yer edinmiştir. Zavadskas ve arkadaşları (2012) tarafından geliştirilen WASPAS yöntemi, karar alternatiflerinin değerlendirilmesinde hem toplamsal hem de çarpımsal yaklaşımları birlikte kullanarak karar kalitesini artırmaktadır. Yöntem, özellikle çok kriterli ve belirsizlik içeren problemlerde güçlü bir performans sergilemektedir (Chakraborty & Zavadskas, 2014).

WASPAS yöntemi, üretim, enerji, lojistik, inşaat ve tedarik zinciri yönetimi gibi birçok alanda başarıyla uygulanmıştır. Literatürde, tedarikçi seçiminde WASPAS yönteminin; karar vericilere daha dengeli, tutarlı ve yorumlanabilir sonuçlar sunduğu ifade edilmektedir (Çelikbilek & Tüysüz, 2020; Karabašević et al., 2016). Ayrıca sürdürülebilirlik odaklı tedarikçi değerlendirme çalışmalarında da WASPAS yaklaşımının etkin bir araç olduğu vurgulanmaktadır (Bai & Sarkis, 2010; Govindan et al., 2015).

Bu çalışmanın amacı, WASPAS yöntemi kullanılarak tedarikçi seçimi probleminin sistematik bir şekilde çözülmesini sağlamak ve karar vericilere bilimsel temelli bir karar destek modeli sunmaktır. Bu kapsamda, öncelikle

ilgili literatür incelenmiş, ardından belirlenen kriterler doğrultusunda alternatif tedarikçiler değerlendirilmiş ve en uygun tedarikçi belirlenmiştir. Çalışmanın hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de uygulayıcılar için yol gösterici bir kaynak oluşturması hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tedarikçi seçimi, tedarik zinciri yönetiminin en kritik karar problemlerinden biri olup işletmelerin rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Uygun tedarikçinin belirlenmesi; maliyetlerin azaltılması, kalite düzeyinin artırılması, teslimat sürelerinin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliğin sağlanması açısından stratejik öneme sahiptir. Bu nedenle tedarikçi seçimi, uzun yıllardır akademik literatürde yoğun biçimde ele alınmaktadır.

İlk sistematik çalışmalar, tedarikçi seçiminde kullanılan temel kriterlerin belirlenmesine odaklanmıştır. Dickson (1966), kalite, fiyat ve teslimat performansını en önemli kriterler olarak tanımlamış; Weber, Current ve Benton (1991) ise çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarının tedarikçi seçimindeki etkinliğini ortaya koymuştur.

Rekabetin artması ve tedarik zinciri yapılarının karmaşıklaşmasıyla birlikte, geleneksel yaklaşımlar yetersiz kalmış; AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE gibi çok kriterli karar verme yöntemleri yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Ho et al., 2010; Chai et al., 2013). Bununla birlikte, bu yöntemlerin bazıları karar verici öznelliğine yüksek oranda bağlı olması ve hesaplama karmaşıklığı gibi sınırlılıklar içermektedir.

Bu doğrultuda geliştirilen WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi, Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM) ile Ağırlıklı Çarpım Modeli'nin (WPM) avantajlarını bir araya getirerek daha dengeli ve güvenilir sonuçlar üretmektedir (Zavadskas et al., 2012). Yöntemin, üretim ve mühendislik temelli problemlerde yüksek doğruluk sağladığı birçok çalışmada gösterilmiştir (Chakraborty & Zavadskas, 2014).

Türkiye'de yapılan çalışmalar da çok kriterli karar verme yaklaşımlarının etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Over Özçelik ve Eryılmaz (2019), traktör imalatı sektöründe tedarikçi seçiminde çok kriterli karar verme yöntemlerinin nesnel değerlendirme sağladığını göstermiştir.

Ülker ve Over Özçelik (2024) ise sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde bulanık yaklaşımların önemini vurgulamıştır.

Bunun yanı sıra, Polat ve Çelik (2021) yeşil tedarikçi seçiminde bulanık AHP ve MOORA yöntemlerini kullanmış; Çelik ve Polat (2023) cam sektöründe kalite kriterleri arasındaki nedensel ilişkileri bulanık DEMATEL yöntemiyle analiz etmiştir. Çelik ve Yıldız (2022, 2023) ise inovasyon ve yeşil inovasyon kriterlerinin değerlendirilmesinde Pisagor bulanık AHP yönteminin etkinliğini ortaya koymuştur.

Ayrıca, Tomak ve Polat (2022), çok kriterli karar verme temelli bir risk önceliklendirme modeli geliştirerek başarı faktörlerinin karar sürecine etkisini analiz etmiştir. Benzer şekilde, Korkusuz Polat ve Saltan Yaşlı (2024) üretim projelerinde bulanık SWARA ve bulanık MOORA yöntemlerini kullanarak risk önceliklendirmesi gerçekleştirmiştir. Korkusuz Polat ve Pamuk Candan (2024) ise savunma sanayinde faaliyet gösteren bir yazılım firmasında ağırlıklı Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) ile bulanık SWARA yöntemlerini bütünleştirerek risk yönetimine katkı sağlamıştır.

Ayrıca, Yılmaz Yalçıner ve Çaylak (2020) Türkiye'de dijital dönüşüm sürecini AHP ve TOPSIS yöntemleriyle analiz etmiş ve sektörler arası karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmuştur. Bu çalışmalar, çok kriterli karar verme yaklaşımlarının yalnızca tedarikçi seçiminde değil; risk yönetimi, dijital dönüşüm ve süreç iyileştirme gibi alanlarda da etkin biçimde kullanılabildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, literatürde çok kriterli karar verme yöntemlerinin farklı sektörlerde başarıyla uygulandığı görülmektedir. Ancak WASPAS yönteminin özellikle sektör bazlı uygulamalarda sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışma WASPAS yöntemini kullanarak tedarikçi seçimi problemini ele almakta ve literatüre özgün, uygulama temelli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Tablo 1. Tedarikçi Seçimi Literatüründe Kullanılan Yöntemler

Yazar(lar)	Yıl	Yöntem	Uygulama Alanı	Temel Bulgular
Dickson	1966	Kriter analizi	Genel tedarikçi seçimi	Temel kriterler kalite, fiyat ve teslimattır.
Weber et al.	1991	Çok kriterli analiz	Endüstriyel tedarik	MCDM yöntemleri etkilidir.
Ho et al.	2010	Literatür taraması	Çok sektörlü	MCDM yaygın biçimde kullanılmaktadır.
Chai et al.	2013	Sistematik inceleme	Tedarik zinciri	Karar destek sistemleri ön plana çıkmıştır.
Zavadskas et al.	2012	WASPAS	Çok kriterli problemler	Yüksek doğruluk sağlamaktadır.
Chakraborty & Zavadskas	2014	WASPAS	Üretim sistemleri	Karar tutarlılığı artmıştır.
Polat & Çelik	2021	Bulanık AHP–MOORA	Çelik kapı sektörü	Yeşil tedarikçi seçimi yapılmıştır.
Over Özçelik & Eryılmaz	2019	MCDM	Traktör imalatı	Objektif değerlendirme sağlanmıştır.
Çelik & Polat	2023	Bulanık DEMATEL	Cam sektörü	Kriter ilişkileri belirlenmiştir.
Çelik & Yıldız	2022	Pisagor Bulanık AHP	Yeşil inovasyon	Etkili kriterler belirlenmiştir.
Çelik & Yıldız	2023	Pisagor Bulanık AHP	İnovasyon verimliliği	Faktör etkileşimleri analiz edilmiştir.
Polat & Demir	2023a	SWARA–WASPAS	Gıda sektörü	En uygun depo yeri belirlenmiştir.
Polat & Demir	2023b	Süreç iyileştirme	Lastik üretimi	Operasyonel verimlilik artmıştır.
Tomak & Polat	2022	MCDM tabanlı risk modeli	Çok sektörlü	Başarı faktörleri önceliklendirilmiştir.
Korkusuz Polat & Saltan Yaşlı	2024	Bulanık SWARA–MOORA	Üretim projeleri	Risk öncelikleri belirlenmiştir.
Korkusuz Polat & Pamuk Candan	2024	FMEA + Bulanık SWARA	Savunma sanayi	Risk yönetimi güçlendirilmiştir.
Yılmaz Yalçıner & Çaylak	2020	AHP–TOPSIS	Dijital dönüşüm	Sektörel sıralama yapılmıştır.

3. METODOLOJİ: DELPHI VE WASPAS YÖNTEMİ

3.1. Yöntemsel Çerçeve

Bu çalışmada, medikal ürün üreten bir firmanın tedarikçi seçim problemine çözüm geliştirmek amacıyla çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı benimsenmiştir. Çalışmada kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Delphi yöntemi, alternatiflerin değerlendirilmesinde ise WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi kullanılmıştır. Bu bütünleşik yapı sayesinde, hem uzman görüşlerine dayalı nitel değerlendirmeler hem de nicel karar verme mekanizmaları bir arada ele alınmıştır.

Medikal sektörün yüksek regülasyon gereksinimleri, kalite hassasiyeti ve risk düzeyi göz önünde bulundurulduğunda, karar sürecinin yalnızca sayısal verilere dayandırılması yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, uzman bilgi birikimini sistematik biçimde karar sürecine dahil eden Delphi yöntemi, WASPAS yöntemiyle bütünleştirilmiştir.

3.2. Delphi Yöntemi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Delphi yöntemi, uzman görüşlerinin yapılandırılmış ve anonim bir biçimde toplanarak uzlaşıya dayalı sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir karar destek tekniğidir. Özellikle belirsizlik içeren, çok boyutlu ve uzman yargısına ihtiyaç duyulan problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tomak & Polat, 2022; Korkusuz Polat & Saltan Yaşlı, 2024).

Bu çalışmada Delphi yöntemi, tedarikçi seçiminde kullanılacak kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesi amacıyla uygulanmıştır. Süreç, aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

3.2.1. Uzman Panelinin Oluşturulması

Delphi sürecine, medikal sektöründe deneyimli 7 uzmandan oluşan bir panel dâhil edilmiştir. Uzmanlar; üretim yönetimi, kalite güvence, tedarik zinciri yönetimi ve medikal ürün regülasyonları alanlarında deneyim sahibi kişilerden seçilmiştir. Bu çeşitlilik, değerlendirmelerin hem teorik hem de uygulamaya dayalı olmasını sağlamıştır.

3.2.2. Birinci Tur: Kriterlerin Değerlendirilmesi

İlk turda uzmanlara, literatür taraması sonucunda belirlenen tedarikçi seçim kriterleri sunulmuş ve her bir kriterin önem düzeyi 1–9 aralığında derecelendirilmiştir. Bu aşamada elde edilen veriler üzerinden aşağıdaki istatistiksel ölçütler hesaplanmıştır:

- Aritmetik ortalama
- Medyan
- Standart sapma

Bu analizler, uzman görüşleri arasındaki dağılımı ve görüş birliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

3.2.3. İkinci Tur: Uzlaşı Süreci

İkinci turda, ilk tur sonuçları uzmanlarla paylaşılmış ve görüşlerini yeniden gözden geçirmeleri istenmiştir. Bu süreç, uzmanlar arasında uzlaşı sağlanmasına yardımcı olmuştur. Uzlaşı kriterleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- Standart sapma ≤ 1.0
- Değişim katsayısı (CV) ≤ 0.25
- Medyan değerlerde anlamlı değişim olmaması

Bu kriterleri sağlayan göstergeler için görüş birliğine varıldığı kabul edilmiştir (Korkusuz Polat & Saltan Yaşlı, 2024).

3.2.4. Delphi Sonuçlarının WASPAS Yöntemine Entegrasyonu

Delphi yöntemi sonucunda elde edilen kriter ağırlıkları, WASPAS yönteminin hesaplama aşamasında doğrudan kullanılmıştır. Böylece, uzman görüşleriyle belirlenen ağırlıklar kullanılarak alternatif tedarikçilerin performansları hem toplamsal (WSM) hem de çarpımsal (WPM) yaklaşımlar ile değerlendirilmiştir.

Bu bütünleşik yapı, karar sürecinde hem nitel uzman bilgisinin hem de nicel analizlerin birlikte kullanılmasını sağlamış; böylece daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

3.3. WASPAS Yöntemine Genel Bakış

WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerinde kullanılan ve Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM) ile Ağırlıklı Çarpım Modeli (WPM) yaklaşımlarını bütünleştiren hibrit bir yöntemdir. İlk kez Zavadskas et al. (2012) tarafından önerilen bu yöntem, karar alternatiflerinin hem toplamsal hem de oransal değerlendirilmesine olanak tanıyarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Literatürde WASPAS yöntemi; tedarikçi seçimi, üretim planlama, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve lojistik karar problemlerinde başarıyla uygulanmıştır (Chakraborty & Zavadskas, 2014; Polat & Çelik, 2021; Polat & Demir, 2023a). Yöntemin en önemli avantajı, farklı karar verme yaklaşımlarını tek bir çatı altında birleştirerek karar vericilere daha dengeli ve istikrarlı sonuçlar sunmasıdır.

3.3.1. WASPAS Yönteminin Adımları

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

WASPAS yönteminin ilk aşamasında, m adet alternatif ve n adet kriterden oluşan karar matrisi oluşturulur:

$$X=[x_{ij}]_{m\times n}$$

Burada; x_{ij}, i. alternatifin j. kritere göre performans değerini ifade etmektedir (Zavadskas et al., 2012).

Adım 2: Normalizasyon İşlemi

Farklı ölçü birimlerine sahip kriterlerin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi amacıyla normalizasyon yapılır.

Fayda (maksimizasyon) kriterleri için:

$$r_{ij}= x_{ij} / \max(x_{ij}) \quad \text{(eq 1)}$$

Maliyet (minimizasyon) kriterleri için:

$$r_{ij}= \min(x_{ij}) / x_{ij} \quad \text{(eq 2)}$$

Bu işlem, kriterlerin ortak bir ölçekte değerlendirilmesini sağlar (Chakraborty & Zavadskas, 2014).

Adım 3: Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Her kriterin karar sürecindeki önem derecesi bir ağırlık katsayısı ile ifade edilir:

$$\sum_{j=1}^{1} w_i = 1$$

Ağırlıklar; AHP, SWARA, Entropi, DEMATEL veya uzman görüşleriyle belirlenebilir (Polat & Demir, 2023a; Polat & Çelik, 2021).

Adım 4: Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM)

WSM yaklaşımında her alternatif için skor aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Q_i^1 = \sum_{j=1}^{n} w_i \; r_{ij}$$

Bu yapı, kriterler arasındaki oransal farkları daha güçlü biçimde yansıtır (Chakraborty & Zavadskas, 2014).

Adım 5: Ağırlıklı Çarpım Modeli (WPM)

WPM yaklaşımında alternatiflerin performansı çarpımsal olarak hesaplanır:

$$Q_i^2 = \prod_{j=1}^{n} r_{ij}^{w_j}$$

Adım 6: WASPAS Birleşik Değerinin Hesaplanması

WSM ve WPM sonuçları aşağıdaki eşitlik ile birleştirilir:

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1-\lambda) Q_i^{(2)}$$

Burada: $\lambda \in [0,1]$ olup genellikle 0.5 olarak alınır. Bu değer, her iki yönteme eşit ağırlık verilmesini sağlar. Bu birleşik yaklaşım, karar sürecinde daha dengeli ve güvenilir sonuçlar üretmektedir (Zavadskas et al., 2012; Polat & Demir, 2023a).

Adım 7: Alternatiflerin Sıralanması

Hesaplanan Qi değerleri büyükten küçüğe sıralanır. En yüksek değere sahip alternatif en uygun seçenek olarak belirlenir.

3.3.2. Yöntemin Literatürdeki Yeri

Literatürde WASPAS yöntemi; tedarikçi seçimi, sürdürülebilirlik değerlendirmesi, üretim sistemleri ve lojistik planlama gibi alanlarda yaygın biçimde uygulanmaktadır (Chakraborty & Zavadskas, 2014; Polat & Çelik,

2021; Polat & Demir, 2023a). Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar, yöntemin hem klasik hem de bulanık ortamlar için yüksek karar doğruluğu sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada da WASPAS yöntemi kullanılarak tedarikçi seçimi problemi ele alınmakta ve literatüre uygulamaya dayalı bir katkı sunulması amaçlanmaktadır.

4. PROBLEMİN TANIMI

Medikal ürün üreten firmalar, insan sağlığını doğrudan etkileyen ürünler geliştirdikleri için kalite, güvenilirlik ve süreklilik açısından son derece yüksek standartlara sahip olmak zorundadır. Bu nedenle, medikal sektörde faaliyet gösteren işletmeler için tedarikçi seçimi yalnızca maliyet odaklı bir karar süreci değil; aynı zamanda hasta güvenliği, yasal uygunluk ve kurumsal itibar açısından kritik bir stratejik unsurdur. Özellikle tanı ve tedavi süreçlerinde kullanılan medikal ürünlerin üretiminde, tedarik edilen hammaddelerin kalite düzeyi ve sürekliliği hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, medikal ürün üreten bir firma için bir tedarikçi seçimi problemi ele alınmaktadır. Firma, artan pazar talepleri doğrultusunda üretim kapasitesini artırma ihtiyacıyla karşı karşıya kalmakta; ancak tedarik süreçlerinde yaşanan aksamalar üretim planlamasını olumsuz yönde etkilemektedir. Siparişlerin zamanında karşılanamaması, müşteri memnuniyetinde azalmaya yol açmakta ve bu durum uzun vadede firmanın rekabet gücünü zayıflatmaktadır. Medikal sektörde bu tür aksaklıklar yalnızca ekonomik kayıplarla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda hasta güvenliği, ürün güvenilirliği ve yasal yükümlülükler açısından da ciddi riskler oluşturmaktadır.

Üretim süreçlerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, tedarikçilerin gerekli hammaddeleri istenen kalite standartlarında ve zamanında temin edememesidir. Bu durum, üretim hattında darboğazlara yol açmakta ve teslimat sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Tedarik zincirinde meydana gelen bu tür aksaklıklar, kalite sürekliliğini ve operasyonel verimliliği olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, tedarikçi güvenilirliği ve performansı, medikal ürün üretiminde kritik bir rol üstlenmektedir.

Bu bağlamda, tedarikçi seçim sürecinin sistematik, nesnel ve çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. Geleneksel

değerlendirme yöntemleri, medikal sektördeki karmaşık kalite gerekliliklerini ve düzenleyici beklentileri yeterince yansıtamamaktadır. Bu nedenle, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, tedarikçi seçiminde bilimsel ve analitik bir çerçeve sunmaktadır. ÇKKV yöntemleri sayesinde kalite, maliyet, teslimat süresi, mevzuata uygunluk, izlenebilirlik ve güvenilirlik gibi kriterler eş zamanlı olarak değerlendirilebilmektedir.

Bu çalışmada, tedarikçi değerlendirme sürecinde kullanılan kriterlerin ağırlıkları Delphi yöntemi ile belirlenmiştir. Delphi yöntemi, alanında uzman kişilerin görüşlerinin anonim ve yinelemeli şekilde toplanmasına dayanan sistematik bir yaklaşımdır. Bu yöntem sayesinde uzman görüşleri arasında uzlaşı sağlanarak öznel yargıların etkisi azaltılmakta ve daha tutarlı ağırlık değerleri elde edilmektedir. Özellikle medikal sektör gibi yüksek risk içeren alanlarda, uzman temelli değerlendirme süreçleri karar kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır.

Delphi yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları, bu çalışmada WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemi ile bütünleştirilmiştir. WASPAS yöntemi, ağırlıklı toplam ve ağırlıklı çarpım yaklaşımlarını bir arada kullanarak alternatifler arasında daha dengeli ve güvenilir bir sıralama yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde, tedarikçi performansı çok boyutlu olarak değerlendirilmiş ve karar sürecinde belirsizliklerin azaltılması hedeflenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma; medikal ürün sektöründe faaliyet gösteren bir firma için tedarikçi seçim problemini, Delphi temelli kriter ağırlıklandırması ve WASPAS yöntemi kullanarak ele almakta ve bilimsel temelli bir karar destek modeli sunmaktadır. Elde edilen bulguların hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de medikal sektöründe faaliyet gösteren işletmeler için uygulamaya yönelik yol gösterici bir çerçeve sunması beklenmektedir.

5. MEDİKAL ÜRÜN TEDARİK ZİNCİRİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME: DELPHI VE WASPAS UYGULAMASI

5.1. Uygulamanın Amacı ve Kapsamı

Bu bölümde, medikal ürün üreten bir firmanın tedarikçi seçim problemi ele alınmıştır. Amaç, firmanın üretim süreçlerinde kritik öneme

sahip olan tedarikçilerin, çok kriterli karar verme yaklaşımı kullanılarak nesnel, sistematik ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, tedarikçi seçiminde etkili olan kriterler Delphi yöntemi ile belirlenmiş; alternatif tedarikçilerin sıralanmasında ise WASPAS yöntemi kullanılmıştır. Uygulama kapsamında, firmanın mevcut tedarikçi havuzunda yer alan alternatifler değerlendirilmiş ve en uygun tedarikçi belirlenmiştir. Süreç boyunca kalite, teslimat performansı, maliyet, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik gibi temel kriterler dikkate alınmıştır.

5.2. Problemin Tanımı ve Alternatiflerin Belirlenmesi

Medikal malzeme üretimi yapan bir firma, medikal ürün üretiminde kullanılan hammaddelerin temininde farklı tedarikçilerle çalışmaktadır. Ancak bu tedarikçilerin performansları arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum, üretim sürekliliğini, kalite standardını ve müşteri memnuniyetini doğrudan etkilemektedir.

5.3.Delphi Yöntemi ile Kriterlerin Önem Derecelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, medikal ürün üretimi bağlamında tedarikçi seçimi probleminde kullanılacak kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla Delphi yöntemi uygulanmıştır.

Tablo 2. Kriterlerin Ortalama Önem Düzeyleri

Kriter	Ortalama Puan	Göreli Önemi
Sürdürülebilirlik	9.33	Çok Yüksek
Geçmiş Dönem Başarısı	9.00	Çok Yüksek
Kalite	8.33	Yüksek
Zamanında Teslimat	6.67	Orta–Yüksek
Maliyet Avantajı	6.33	Orta
Esneklik	4.33	Orta–Düşük
Tedarikçinin Konumu	4.00	Düşük
Sevkiyat Şekli	3.67	Düşük
Tepki Süresi	2.00	Çok Düşük
Çevresel ve Sosyal Sorumluluk	1.33	Çok Düşük

Delphi yöntemi; uzman görüşlerini anonim, yinelemeli ve kontrollü geri bildirim esasına dayalı biçimde toplayarak, grup baskısını azaltan ve

görüş birliği (uzlaşı) oluşturmayı hedefleyen yapılandırılmış bir karar destek yaklaşımıdır. Medikal sektör gibi kalite ve regülasyon hassasiyeti yüksek alanlarda, uzman bilgisine dayalı ağırlıklandırma süreçleri karar kalitesini artırmakta ve seçim sürecinin şeffaflığını güçlendirmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kriterlerin önem düzeyleri, tedarikçilerin ilgili kriterler açısından aldığı puanların ortalamaları dikkate alınarak analiz edilmiştir. Böylece, hangi kriterlerin karar sürecinde daha baskın olduğu nesnel biçimde ortaya konulmuştur.

5.4. Ağırlıkların Belirlenmesi

Bu çalışmada kriter ağırlıkları, karar vericilerin değerlendirmelerine dayalı olarak belirlenmiştir. Ağırlıklandırma sürecinde, her bir kriterin karar vericiler açısından göreli önem düzeyi dikkate alınmış ve bu doğrultuda maksimum (MAX) ve minimum (MIN) değerler kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu yaklaşımın temel amacı, farklı ölçeklerde ifade edilen değerlendirmeleri ortak bir ölçekte birleştirerek kriterlerin göreli önem düzeylerini karşılaştırılabilir hâle getirmektir.

MAX (Maksimum Değer): Bir kriter için karar vericiler tarafından verilen en yüksek önem puanını ifade eder. Bu değer, ilgili kriterin karar sürecindeki en yüksek algılanan önem düzeyini temsil etmektedir.

MIN (Minimum Değer): Bir kriter için karar vericiler tarafından verilen en düşük önem puanını ifade eder. Bu değer, kriterin karar vericiler açısından algılanan en düşük önem düzeyini göstermektedir.

MAX= Kriter Önemi/Karar Vericilere Göre Maximum Kriter Önemi

MİN= Karar Vericilere Göre Minimum Kriter Önemi/Kriter Önemi

Kriter ağırlıkları, karar vericilerin değerlendirmeleri arasındaki göreli farkları yansıtacak şekilde hesaplanmıştır. Bu kapsamda, her kriter için normalize edilmiş ağırlık değeri aşağıdaki formül yardımıyla elde edilmiştir:

$$w_j = \frac{Kriter\ önemi_j - \min(Kriter\ önemi)}{\max(Kriter\ önemi) - \min(Kriter\ önemi)}$$

5.5. Normalişzasyon

Bu çalışmada, tedarikçi seçiminde kullanılan kriterlerin karşılaştırılabilir hâle getirilmesi amacıyla normalizasyon işlemi

uygulanmıştır. Normalizasyon süreci, kriterlerin farklı ölçüm ölçeklerine sahip olması nedeniyle gereklidir ve karar verme sürecinde kriterlerin eşit temelde değerlendirilmesini sağlar. Kriterlerin normalizasyonu yapılırken fayda (maksimizasyon) ve maliyet (minimizasyon) türü kriterler ayrı şekilde ele alınmıştır.

Tablo 3. Ağırlıkların belirlenmesi

Kriterler	KV-1	KV-2	KV-3
Esneklik (max)	0.833	0.333	1
Kalite (max)	0.7	1	0.8
Maliyet Avantajı(max)	0.857	0.857	1
Zamanında Teslimat(max)	1	0.875	0.625
Tepki Süresi(min)	0.5	0.333	1
Tedarikçinin Konumu(min)	1	1	1
Geçmiş Dönem Başarısı(max)	1	1	1
Sevkiyat Şekli(max)	0.6	1	0.6
Sürdürülebilirlik(max)	1	0.8	1
Çevresel ve Sosyal Sorumluluk(max)	0.5	0.5	1

Her bir kriter için elde edilen önem puanları, toplam önem değerine bölünerek normalize edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde kriter ağırlıkları karşılaştırılabilir hâle getirilmiş ve toplamları 1 olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

Tablo 4. Normalize değerler

Kriterler	KV-1	KV-2	KV-3
Esneklik (max)	0.3845	0.1537	0.4616
Kalite (max)	0.28	0.4	0.32
Maliyet Avantajı(max)	0.3157	0.3157	0.3686
Zamanında Teslimat(max)	0.4	0.35	0.25
Tepki Süresi(min)	0.2727	0.1816	0.5456
Tedarikçinin Konumu(min)	0.333	0.333	0.333
Geçmiş Dönem Başarısı(max)	0.333	0.333	0.333
Sevkiyat Şekli(max)	0.2727	0.4545	0.4545
Sürdürülebilirlik(max)	0.3571	0.2857	0.3571
Çevresel ve Sosyal Sorumluluk(max)	0.25	0.25	0.50

Tedarikçilerin kriterlere göre aldiği puanlar tablo 5 te verilmiştir.

Tablo 5. Tedarikçilerin kriterlere göre aldiği puanlar

	Kriterler									
Tadarikçi	Esneklik	Kalite	Maliyet Avantajı	Zamanında Teslimat	Tepki Süresi	Tedarikçinin Konumu	Geçmiş Dönem Başarısı	Sevkiyat Şekli	Sürdürülebilirlik	Çevresel ve Sosyal Sorumluluk
Tedarikçi-1	1	5	8	3	9	1	4	3	6	2
Tedarikçi-2	9	1	9	10	7	6	10	1	1	6
Tedarikçi-3	9	9	7	5	2	2	5	4	4	10
Tedarikçi-4	7	9	3	3	5	6	2	4	7	2
Tedarikçi-5	2	5	9	10	5	1	1	5	10	2
Tedarikçi-6	9	3	5	9	1	3	9	1	7	10
Tedarikçi-7	7	9	10	9	9	2	3	8	5	3
Tedarikçi-8	10	4	1	7	4	3	1	7	9	8
Tedarikçi-9	5	1	10	9	10	3	2	7	9	6
Tedarikçi-10	6	5	10	9	7	9	7	1	9	3
Minimum	1	1	1	3	1	1	1	1	1	2
Maksimum	10	9	10	10	10	9	10	8	10	10

Tablo 6'da kriter ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 6.Kriter ağırlıkları

Kriterler	KV-1	KV-2	KV-3	Kriter Ağırlıkları
Esneklik (max)	0.3202	0.0511	0.4616	0.2776
Kalite (max)	0.196	0.4	0.256	0.284
Maliyet Avantajı(max)	0.2705	0.2705	0.3686	0.3032
Zamanında Teslimat(max)	0.4	0.3062	0.1562	0.2874
Tepki Süresi(min)	0.1363	0.0604	0.5456	0.2474
Tedarikçinin Konumu(min)	0.333	0.333	0.333	0.333
Geçmiş Dönem Başarısı(max)	0.333	0.333	0.333	0.333
Sevkiyat Şekli(max)	0.1636	0.4545	0.2727	0.2969
Sürdürülebilirlik(max)	0.3571	0.2285	0.3571	0.3142
Çevresel ve Sosyal Sorumluluk(max)	0.125	0.125	0.50	0.250

Kriterlerin normalize edilmiş değerleri tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kriterlerin normalize değerleri

Kriterlerin Normalize Değerleri									
Esneklik	Kalite	Maliyet Avantajı	Zamanında Teslimat	Tepki Süresi	Tedarikçinin Konumu	Geçmiş Dönem Başarısı	Sevkiyat Şekli	Sürdürülebilirlik	Çevresel ve Sosyal Sorumluluk
0	0,5	0,78	0	0,89	0	0,33	0,22	0,56	0,11
0,889	0	0,89	1	0,67	0,56	1	0	0	0,56
0,889	1	0,67	0,29	0,11	0,11	0,44	0,33	0,33	1
0,667	1	0,22	0	0,44	0,56	0,11	0,33	0,67	0,11
0,111	0,5	0,89	1	0,44	0	0	0,44	1	0,11
0,889	0,25	0,44	0,86	0	0,22	0,89	0	0,67	1
0,667	1	1	0,86	0,89	0,11	0,22	0,78	0,44	0,22
1	0,375	0	0,57	0,33	0,22	0	0,67	0,89	0,78
0,444	0	1	0,86	1	0,22	0,11	0,67	0,89	0,56
0,556	0,5	1	0,86	0,67	0,89	0,67	0	0,89	0,22

WSM hesaplamaları için tablo 8'de görüldüğü gibidir.

WSM= $\sum_{j=1}^{n} = \bar{x}_{ij}.w_j$ formükasyonu ile hesaplanmıştır.

(wj): Önem vektörü

$(\bar{x}_{ij})$: Normalize Değer

Tablo 8. WSM hesaplamaları

0,277	0,284	0,303	0,287	0,2474	0,33	0,33	0,2969	0,3142	0,25
Esneklik	Kalite	Maliyet Avantajı	Zamanında Teslimat	Tepki Süresi	Tedarikçinin Konumu	Geçmiş Dönem Başarısı	Sevkiyat Şekli	Sürdürülebilirlik	Çevresel Ve Sosyal Sorumluluk
0	0,142	0,235	0	0,212	0	0,111	0,066	0,174	0,0278
0,2467	0	0,269	0,287	0,1649	0,18	0,33	0	0	0,139
0,2467	0,28	0,202	0,082	0,028	0,037	0,15	0,099	0,104	0,25
0,1850	0,284	0,0674	0	0,10996	0,185	0,037	0,099	0,209	0,0278
0,030	0,14	0,269	0,28	0,1099	0	0	0,1319	0,3142	0,028
0,246	0,07	0,134	0,24	0	0,07	0,29	0	0,209	0,25
0,185	0,28	0,303	0,24	0,2199	0,03	0,07	0,2309	0,1396	0,05
0,278	0,10	0	0,16	0,0824	0,07	0	0,1979	0,2793	0,194
0,123	0	0,303	0,24	0,2474	0,07	0,03	0,1979	0,279	0,138
0,154	0,14	0,303	0,24	0,1649	0,29	0,22	0	0,279	0,055

WSM performansları ise tablo 9'da verilmiştir. λ=0.5

Performans WSM = λ(WSM)

Tablo 9. WSM performansları

Performans WSM	0.5 WSM
0,977044444	0,488522222
1,625488889	0,812744444
1,481192063	0,740596032
1,204611111	0,602305556
1,313644444	0,656822222
1,528320635	0,764160317
1,775642857	0,887821429
1,376461905	0,688230952
1,647431746	0,823715873
1,863542857	0,931771429

WPM değerlerini tablo 10'da verilmiştir. WPM= $\prod_{j=1}^{n} \bar{x}_{ij}^{\,wj}$ formülasyonu ile hesaplanmıştır.

Tablo 10. WPM hesaplamaları

Q2 WPM'YE göre									
0,2776	0,284	0,3032	0,287	0,2474	0,333	0,3	0,3	0,31	0,25
Esneklik	Kalite	Maliyet Avantajı	Zamanında Teslimat	Tepki Süresi	Tedarikçinin Konumu	Geçmiş Dönem	Sevkiyat Şekli	Sürdürülebilirlik	Çevresel Ve Sosyal Sorumluluk
0	0,821	0,927	0	0,971	0	0,7	0,6	0,83	0,58
0,968	0	0,965	1	0,905	0,822	1	0	0	0,86
0,968	1	0,884	0,698	0,581	0,481	0,8	0,7	0,71	1
0,894	1	0,634	0	0,818	0,822	0,5	0,7	0,88	0,58
0,543	0,821	0,965	1	0,818	0	0	0,8	1	0,58
0,967	0,674	0,782	0,957	0	0,606	1	0	0,88	1
0,893	1	1	0,957	0,971	0,481	0,6	0,9	0,78	0,69
1	0,756	0	0,851	0,762	0,606	0	0,9	0,96	0,94
0,798	0	1	0,957	1	0,606	0,5	0,9	0,96	0,86
0,849	0,821	1	0,957	0,905	0,962	0,9	0	0,96	0,69

WPM performansları tablo 11'deki gibidir. Performans WPM = λ(WPM) şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 11. WPM performansları

PERFORMANS WPM	0.5 WPM
5,461382503	2,730691252
6,522877398	3,261438699
7,804673124	3,902336562
6,828301907	3,414150954
6,511203675	3,255601837
6,829000358	3,414500179
8,298369577	4,149184789
6,76568437	3,382842185
7,555792025	3,777896012
8,017471084	4,008735542

Tedarikçilerin WASPAS puanları tablo 12'deki gibidir.

$WSPM = \lambda(WPM) + \lambda(WSM)$

Tablo 12. Tedarikçilerin WASPAS puanları

Performans WPM	0.5 WPM
5,461382503	2,730691252
6,522877398	3,261438699
7,804673124	3,902336562
6,828301907	3,414150954
6,511203675	3,255601837
6,829000358	3,414500179
8,298369577	4,149184789
6,76568437	3,382842185
7,555792025	3,777896012
8,017471084	4,008735542

Tedarikçilerin WASPAS puanlarının büyükten küçüğe sıralanması tablo 13'deki gibidir.

Tablo 13. tedarikçilerin waspas puanlarinin büyükten küçüğe siralanmasi

Tedarikçi-7	5,037006217
Tedarikçi-10	4,940506971
Tedarikçi-3	4,642932593
Tedarikçi-9	4,601611885
Tedarikçi-6	4,178660496
Tedarikçi-2	4,074183144
Tedarikçi-8	4,071073138
Tedarikçi-4	4,016456509
Tedarikçi-5	3,91242406
Tedarikçi-1	3,219213474

SONUÇ

Bu çalışmada, medikal ürün üreten bir firmanın tedarikçi seçim problemi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları kullanılarak ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, karar sürecinde etkili olan kriterleri nesnel biçimde değerlendirmek ve en uygun tedarikçiyi belirlemektir. Bu doğrultuda, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Delphi yöntemi, alternatiflerin sıralanmasında ise WASPAS yöntemi kullanılmıştır.

Delphi yöntemi aracılığıyla elde edilen bulgular, karar vericilerin özellikle sürdürülebilirlik, geçmiş dönem başarısı ve kalite kriterlerine yüksek önem atfettiğini göstermiştir. Bu durum, medikal sektörün doğası gereği güvenilirlik, kalite sürekliliği ve regülasyonlara uyumun öncelikli olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, tepki süresi, sevkiyat şekli ve tedarikçinin konumu gibi kriterlerin görece daha düşük öneme sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, karar vericilerin stratejik ve uzun vadeli performansı operasyonel hızdan daha ön planda değerlendirdiğini göstermektedir.

WASPAS yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonucunda, tedarikçiler arasında anlamlı performans farklılıkları tespit edilmiştir. Hesaplanan birleşik skorlar doğrultusunda en uygun tedarikçi belirlenmiş, diğer tedarikçiler ise performans düzeylerine göre sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle kalite, sürdürülebilirlik ve geçmiş performans kriterlerinde yüksek puan alan tedarikçilerin genel sıralamada öne çıktığını göstermektedir. Bu bulgu, literatürde yer alan benzer çalışmalarla da uyumludur.

Çalışmada kullanılan Delphi–WASPAS bütünleşik yaklaşımı, hem uzman görüşlerine dayalı nitel bilgileri hem de nicel değerlendirmeleri bir araya getirerek karar sürecinin güvenilirliğini artırmıştır. Bu yönüyle

yöntem, medikal sektör gibi hata toleransı düşük ve regülasyonlara bağlı alanlarda uygulanabilirliği yüksek bir karar destek aracı sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma; tedarikçi seçiminde sistematik, şeffaf ve bilimsel bir yaklaşım sunarak hem akademik literatüre hem de sektörel uygulamalara katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, karar vericilere tedarik zinciri yönetiminde daha etkin stratejiler geliştirme imkânı sunmakta ve benzer nitelikteki çalışmalara metodolojik bir referans oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

Akkoyun, F., & Bacanlı, H. (1988). ACL-Sıfat tarama listesinin Türkçeye uyarlaması: TA ego durumları ölçekleri ile bir çalışma. V. Ulusal Psikoloji Kongresi Bildirileri.

Ardalı, E. Ş., Over Özçelik, T., & Kırelli, Y. (2025). Green supplier selection in food industry: Fuzzy AHP based hybrid GRA and axiomatic design approach. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 37(3), 308–316. https://doi.org/10.7240/jeps.1641653

Arslankaya, S., & Çelik, M. T. (2021). Green supplier selection in steel door industry using fuzzy AHP and fuzzy MOORA methods. Emerging Materials Research, 10(4), 357–369. https://doi.org/10.1680/jemmr.20.00076

Barlow, D. H., Chorpita, B. F., & Turovsky, J. (1996). Fear, panic, anxiety, and disorders of emotion. In R. Dienstbier (Ed.), Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 43. Perspectives on anxiety, panic, and fear (pp. 251–328). University of Nebraska Press.

Calfee, R. C., & Valencia, R. R. (1991). APA guide to preparing manuscripts for journal publication. American Psychological Association.

Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. Expert Systems with Applications, 40(10), 3872–3885. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040

Chakraborty, S., & Zavadskas, E. K. (2014). Applications of WASPAS method in manufacturing decision making. Informatica, 25(1), 1–20. https://doi.org/10.15388/Informatica.2014.01

Çakır, H., Karadeniz, Ş., & Uluyol, Ç. (2008). Öğretim stratejileri: İnternet temelli öğretimde kuramsal temeller. In H. İ. Yalın (Ed.), İnternet temelli eğitim (pp. 65–106). Nobel Yayın Dağıtım.

Çelik, M. T., & Arslankaya, S. (2023). Analysis of quality control criteria in a business with the fuzzy DEMATEL method: Glass business example. Journal of Engineering Research, 11(2), 100039.

Çelik, M. T., & Yıldız, A. (2022). Evaluation of green innovation criteria by using Pythagorean fuzzy AHP method. Journal of Engineering Research and Applied Science, 11(2), 2185–2193.

Çelik, M. T., & Yıldız, A. (2023). Evaluation of factors affecting innovation productivity by Pythagorean fuzzy AHP method. Verimlilik Dergisi, 89–106.

Ho, W., Xu, X., & Dey, P. K. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. European Journal of Operational Research, 202(1), 16–24. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.009

Jonassen, D. H. (1999). Designing constructivist learning environments. In C. M. Reigeluth (Ed.), Instructional-design theories and models (Vol. II, pp. 215–239). Lawrence Erlbaum Associates.

Korkusuz Polat, T., & Pamuk Candan, I. (2024). Risk prioritizing with weighted failure mode and effects analysis and fuzzy step-wise weight assessment ratio analysis: An application in a software service provider company in the defense industry. Applied Sciences, 14(24), 11573. https://doi.org/10.3390/app142411573

Korkusuz Polat, T., & Saltan Yaşlı, G. (2024). Risk prioritization in a manufacturing project with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA methods. Erzincan University Journal of Science and Technology, 17(1), 16–36. https://doi.org/10.18185/erzifbed.1229541

Kozol, J. (1991). Savage inequalities: Children in America's schools. Crown Publishers.

Lee, J., & McIntire, W. G. (1999). Understanding rural student achievement: Identifying instructional and organizational differences between rural and nonrural schools. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, Montreal, Canada.

Ocak, M. A. (2005). Mathematics teachers' attitudes toward the computers. The Turkish Online Journal of Educational Technology, 4(3), 82–88.

Over Özçelik, T., & Eryılmaz, S. A. (2019). Traktör imalatında çok kriterli karar verme yöntemleri ile tedarikçi seçimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 498–512. https://doi.org/10.31590/ejosat.590418

Polat, S., & Demir, A. (2023a). Bir gıda firması için SWARA ve WASPAS yöntemleriyle ara depo yeri seçimi. Endüstri Mühendisliği, 34(1), 70–85.

Polat, S., & Demir, A. (2023b). Process improvement study in a tire factory. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 9(2), 111–122.

Tomak, N., & Polat, T. (2022). Risk prioritization model driven by success factor in the light of multicriteria decision making. Open Chemistry, 20(1), 759–776. https://doi.org/10.1515/chem-2022-0188

Ülker, B., & Over Özçelik, T. (2024). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi ve Tedarikçi Seçimi. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, 3(1), 1-18.

Yalın, H. İ. (2003). Öğretim teknolojileri ve materyal geliştirme. Nobel Yayın Dağıtım.

Yılmaz Yalçıner, A., & Çaylak, İ. (2020). Türkiye'de dijital dönüşüme başlangıç için AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sektörel sıralama. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(2), 258–265. https://doi.org/10.21541/apjes.526700

Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antuchevičienė, J., & Zakarevičius, A. (2012). Optimization of weighted aggregated sum product assessment. Electronics and Electrical Engineering, 122(6), 3–6. https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810

Kakao ve Çikolata Üretiminde Sürdürülebilirlik

Begüm KAYA[1]
Hamza BOZKIR[2*]

[1]Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye,
[2]Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Pamukova Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Sakarya Türkiye
[*]bozkirhamza@gmail.com

ÖZET

Kakao ve çikolata endüstrisi ile ilgili sürdürülebilirlik, çevresel ve sosyo-ekonomik endişeler, güncel tartışmalarda her zaman öne çıkmıştır. İklim değişikliği, kakao üretiminde önde gelen ülkelerde artan yoksulluk seviyeleri ve son yıllarda tarım alanlarında genetik çeşitliliğin kaybı gibi olaylar nedeniyle sürdürülebilirlik girişimleri özellikle kakao sektöründe çok önemlidir. Aslına bakılırsa, bu tür iklim değişiklikleri kakao ağaçlarının üretim kapasitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve dolayısıyla üretim alanlarında verim düşüşüne sebep olur. Benzer şekilde, Fairtrade ve Rainforest Alliance gibi sertifikasyon bazlı uygulamalar, çiftçilerin kazançlarında ve tedarik zincirinin bilinirliğinde isimsel kazançlar sunuyor gibi görünmektedir. Kurumsal düzeyde sürdürülebilirlik ihtiyacı, çikolata endüstrisinin enerji tüketimini, su ve ambalaj atıklarını azaltma programlarında yansıtılmaktadır. Bu çalışma, yukarıda belirtilenler ışığında, kakao üretiminde çevresel ve sosyal çevresel zorlukları tanımlayarak, çikolata endüstrisinin sürdürülebilirlik içindeki stratejisini, kakao sertifikasyon programının etkisini ve Türkiye'deki endüstri ilerlemesini sürdürülebilirlik çerçevesine dayalı olarak kapsamlı bir analiz sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Sürdürülebilirlik, Kakao, Çikolata, Üretim, Ambalaj.

GİRİŞ

Sanayi devriminden bu yana, doğal kaynakların hızla tüketilmesi ve çevresel ve kültürel değerlerin bozulması, sürdürülebilirliği güncel bir tartışma konusu haline getirmiştir (Öztürk ve Kanoğlu, 2024). Akademik söylemde yaygın olan sürdürülebilirlik yapısı, 1970'lerden beri doğal kaynakların, çevresel faktörlerin ve sosyal unsurların yönetimine yönelik bir yaklaşım olarak var olmuştur (Kaşlı vd., 2015). Genel olarak bakıldığında, sürdürülebilirlik, mevcut kaynakların sürdürülebilir ve duyarlı bir şekilde kullanılmasıyla alakalı olarak kabul edilmekte ve gelecekteki nesillerin yaşam kalitesine odaklanarak mevcut politika ve uygulamalarda önemini artırmaktadır. Evrensel olarak tüketim alışkanlıklarındaki değişimler, hızlıca artan nüfus, kısıtlı yönetilen tarım ve teknolojinin kötüye kullanılması ile birlikte, gıda sürdürülebilirliği, gastronomi ve araştırmaların daha fazla odaklanması gereken bir alan haline gelmiştir (Öztürk ve Kanoğlu, 2024). Latince kökenli “Sustinere” sözcüğünden türetilen sürdürülebilirlik kavramı, "sürdürme, destekleme ve devam ettirme" anlamına gelen bir sözcük olarak tanımlanmaktadır (Acar, 2021). Gastronomi için sürdürülebilirlik, yalnızca mevcut gıda sistemlerine dikkat kesilmekle kalmayıp, aynı zamanda onları gelecek nesiller için güvenli hale getirmeyi de sağlaması gereken hayati bir endişedir (Orozco-Aguilar vd., 2021). Sürdürülebilirlik kavramı, ormanları koruma çabası olarak var olmuştur. Bu kavram, alternatif yollarla önem

kazanmış ve gastronomi alanında zaten oldukça popüler hale gelmiş bulunmaktadır. Gastronomi, kendine has sürdürülebilirlik endişelerine sahip bir alan olarak, insanlık için büyük ve oldukça kritik öneme sahip üç sürdürülebilirlik yönünden biri olarak kabul edilmektedir (Öztürk & Kanoğlu, 2024). Gastronomide sürdürülebilir uygulamaların kabulü ile, toplumların sürdürülebilir gelişimi, üyelerine daha iyi beslenme ve yaşam kalitesi sağlamak, sosyal ve ekonomik gelişimi sağlamak amaçlanmaktadır (Orozco-Aguilar vd., 2021). Kakao ve çikolata imalat tesisleri de dahil olmak üzere gıda ve çikolata sektörünün sürdürülebilirliği çok önemli bir odak noktasıdır. İmalatın çevresel etkisinin etkinliği, toprak ve biyolojik çeşitliliğin korunması ve üretici çiftçilere adil gelir sağlanması, gastronomi yoluyla gıda güvenliğine ek olarak önemli faktörlerdir. Üretim hattının sosyal ve ekonomik yönünün sürdürülebilirliği artırılır, bu sayede sabit bir kalite ve tatta güvenli bir ürün üretilmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle, gastronomide kalite, etik ve sürdürülebilirliği harekete geçirmek, kakao ve diğer çikolataların sürdürülebilir imalatıyla doğrudan bağlantılıdır. Sağlanan literatür, özellikle Batı Afrika'da yoğun tarım ve ormansızlaşmanın yaygın olduğu kakao imalatının çevresel sorunlardan istisna tutulmuş olmadığını vurgulamaktadır (Orozco-Aguilar vd., 2021). Ayrıca, gelirlerdeki istikrarsızlıklar ve üretim sektöründeki yapısal farklılıklar, bu endüstrinin sosyo-ekonomik sürdürülebilirliğini de etkilemektedir (Jagoret vd., 2020). Dolayısıyla, kakao ve çikolatanın sürdürülebilir evrimi, hem çevresel koruma hem de üreticilerin ekonomik iyi hali için çok önemlidir, ancak aynı zamanda tedarik zinciri içinde etik çerçevenin temelini geliştirmesi gerekmektedir (Jagoret vd., 2020). Kakao üretiminde sürdürülebilirlik faktörleri bu raporun altında detaylandırılacaktır.

1. Kakao ve Çikolata Sektörünün Küresel Önemi

Kakao ve çikolata endüstrisi, önemli bir küresel sosyo-ekonomik sektördür. Batı Afrika ülkeleri, dünya ticaretinde üretim ölçeğinin merkezi olduğu küresel kakao üretiminin önemli bazı bölümlerinde yer almaktadır (Orozco-Aguilar vd, 2021). Yani, Fildişi Sahili ve Gana'nın, dünya kakao üretiminde %60-70'lik bir payı bulunmaktadır. Güney Amerika ve Güneydoğu Asya ülkeleri, üretim açısından oldukça önemli konumdadır (Jagoret vd., 2020) ve her ikisi de kritik bölgeler arasında yer almaktadır. Ekonomik etki, sadece imalatçı ülkelerdeki tarımsal gelirle kısıtlı kalmamaktadır. Çikolata ve kakao ürünleri, üretici çiftçilerden çok büyük üreticilere kadar uzanan çeşitli tedarik zincirini içeren, milyarlarca dolar değerinde küresel bir pazar büyüklüğüne sahiptir (Jagoret vd., 2020). Ancak bu tedarik zincirinde, küçük ölçekli tedarikçilerin gelir sürekliliğini ve sosyal korumasını tehlikeye atan sistematik eşitsizlikler bulunmaktadır (Kumeh, 2024). Sürdürülebilirliğin gelişimi, endüstrinin dünya değerinin küresel bir parçası olarak büyümesi sebebiyle daha küresel bir trend olarak kabul edilmelidir. Büyük çikolata şirketleri, doğa dostu ve sosyal sorumluluklarını geliştirmeye çalışmakta ve

üretim süreçlerinde enerji optimizasyonu, düşük karbon ayak izi ve izlenebilir tedarik zincirleri gibi uygulamaları hayata geçirme yollarını aramaktadır (Jagoret vd., 2020). Fairtrade ve Rainforest Alliance gibi sertifikalar, sadece üreticinin refahına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda tüketicilere sürdürülebilir üretim hakkında bilgi vermektedir (Orozco-Aguilar vd., 2021). Küresel çikolata pazarı, çikolata arzusunu karşılamak için artan ihtiyacın çevresel baskıyı ve çikolata üretim bölgesindeki sosyal sorunları artırması nedeniyle büyüyen bir trend olarak yaşamaktadır, bu nedenle sürdürülebilir uygulamaların güçlendirilmesi, sektörde iş dünyası ve toplum için son derece önemlidir (Dünya Kakao Vakfı, 2022). Kakao ve çikolata ticaret talebi ile bu sektörün sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal açıdan da önemli olduğu arasında olumlu bir ilişki bulunmaktadır.

2. Kakao Üretimi: Tarımsal Süreç, Sorunlar ve Sürdürülebilirlik

Kakao, özellikle Batı Afrika gibi ülkelerde ekonomik ve sosyal açıdan dünyada çok büyük öneme sahip tarımsal bir üründür. Gana ve Fildişi Sahili, dünyada kakao üretiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Kakao üretimi için genellikle gölgeli tarım sistemleri olan agroforestry, yani tarımsal ormancılık kullanılmaktadır. Bu sistemle, kakao ağaçları diğer ağaçlar ve gölge sağlayan ağaçlarla birlikte yetiştirilmekte ve korunmaktadır. Bu, toprak sağlığını korumakta, erozyonu en aza indirmekte ve zamanla verim sağlamaktadır (Kumeh, 2024).

Geleneksel agroforestry yöntemleri, ağaç türlerine bağlı olarak farklı verim sağlamaktadır. Bazı ağaç türleri kakao ağacı verimini artırırken, diğerleri kısıtlayıcı olabilmektedir. Bu sebeple, kakao ile hangi ağaç türlerinin yetiştirileceği çok önemli bir kritiktir. (Konaté vd., 2024). Ayrıca, gölgeli iklimlerde yetiştirilen kakao, hastalıklarla alakalı etkilere karşı daha dirençli olmaktadır. Agroforestry uygulamalarının yürütülmesinde bazı engeller bulunmaktadır. Çiftçiler, gölgeli tarım sistemlerine geçişte arazi sahipliği belirsizliği, mali kaynak eksikliği ve yetersiz teknik bilgi gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir. Küçük ölçekli çiftçiler bu sebeple gölgeli sistemleri benimsemekte oldukça zorluk çekmektedir (Kouassi vd., 2021). Ayrıca, iklim değişikliğinin üretim düzeni üzerindeki etkileri, sıcaklık ve yağış değişiklikleri yoluyla üretkenliği de azaltabilmektedir (Kaba vd., 2024).

Sürdürülebilir agroforestry sistemleri, en azından belirli bir dereceye kadar sürdürülebilirlik yararlarına sahiptir. Bu sistemler, karbonu tutarak, toprak verimliliğini koruyarak ve biyolojik çeşitliliği artırarak iklim değişikliğini önlemeye yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda Nijerya'da, doğru yoğunlaştırmayı kullanan üreticilerin ekonomik kazançlar elde edebileceğini vurgulayan önemli bir verim artışı örneği de bulunmaktadır (Kolapo vd., 2025).

Dolayısıyla kakao imalatı yalnızca maddi veya ekonomik bir faaliyet olarak kabul edilmez, aynı zamanda çevresel ve sosyal kapsamı olan karmaşık bir süreç olarak kabul edilmektedir. Agroforestry sistemlerinin pazarlanması,

çiftçilerin sorunlarının teorik olarak incelenmesi ve iklim değişikliğine uyum yollarının hazırlanması, sektörde sürdürülebilirlik için oldukça önemlidir. Bu yöntemler, ileriye dönük olarak üreticiler ve arazi için faydalıdır.

2.1. Kakao Tarımının Coğrafi Dağılımı

Kakao tarımı, küresel olarak tropikal bölgelerde konsantre olmuş bir faaliyet olup, özellikle Batı Afrika'da Fildişi Sahili ve Gana'da öne çıkmaktadır. Bu iki ülke, küresel kakao üretiminin büyük bir bölümünü karşılamaktadır (Daymond vd., 2022). Üretim alanları coğrafi olarak belirli bölgelere yayılmıştır: Fildişi Sahili'nde batı ve orta bölgeler, Gana'da ise özellikle doğu ve batı kesimler kakao plantasyonlarının en yoğun olduğu alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Escobar Riomalo, 2022).

Uydu görüntüleri ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen güncel haritalama araştırmaları, bu plantasyonların ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü dağılımını göstermektedir. Kalischek, Lang, Renier, Daudt, Addoah, Thompson, Blaser-Hart, Garrett, Schindler ve Wegner tarafından 2022 yılında hazırlanan bir çalışma, Gana ve Fildişi Sahili'ndeki kakao yetiştirilen bölgeleri, doğrulanmış saha verileriyle birlikte haritalamıştır (Kalischek vd., 2022). Bu çalışma, özellikle resmi raporlarda yer almayan ekili alanları da tespit ederek, plantasyon alanlarının daha geniş olduğunu göstermektedir (Kalischek vd., 2022).

Öte yandan, aynı araştırma takımının 2023'te yayımladığı bir makaleye göre, kakao imalatı korunan orman alanlarının kaybına önemli ölçüde sebebiyet vermektedir. Fildişi Sahili'nde korunan alanlardaki ormansızlaşmanın yaklaşık %37'si, Gana'da ise %13'ü kakao tarımıyla bağdaştırılmıştır (Kalischek vd., 2023).

Ayrıca, Fildişi Sahili ve Gana'da kakao tedarik zincirinin gözlemlenebilirliği ve şeffaflığı değerlendirilmiştir. Bu rapor, üretim bölgelerinin haritası ve analizleriyle, tedarik zincirindeki şeffaflık eksikliklerinin coğrafi olarak nerelerde yoğunlaştığını göstermektedir (Escobar Riomalo, 2022).

Son olarak, O. A. Otekunrin'in 2025 yılında Discover Agriculture dergisinde yayımlanan araştırması, Afrika'daki kakao üretim alanlarının coğrafi dağılımını bilimsel yayınlar ve ticaret verileri ışığında analiz etmiştir. Bu analiz, özellikle Fildişi Sahili ve Gana'nın üretimdeki hakimiyetine ve araştırma yönelimlerine ilgi uyandırmaktadır (Otekunrin, 2025).

2.2. Çevresel Sorunlar: Ormansızlaşma, Toprak Tahribatı, İklim Değişikliği

Kakao üretimi, ekonomik açıdan önem taşısa da çevresel sorunlara bilindiğinden daha fazla yol açmaktadır. Fildişi Sahili ve Gana'daki kakao plantasyonları, bazı ormanlık alanların kaybına sebep olmakta ve biyolojik

çeşitlilik ile ekosistem faaliyetlerini olumsuz etkilemektedir (Kalischek vd., 2022).

Toprak kalitesi, sürdürülebilir üretim açısından kritik bir faktördür. Kakao bazlı agroforestry uygulamaları, toprağın organik madde içeriğini artırarak karbon depolama kapasitesini güçlendirmektedir ve aynı zamanda toprağın su tutma yeteneği ile geçirgenliğini geliştirmektedir. Bu sayede agroforestry, hem toprak bozulmasını azaltmakta hem de iklim değişikliğine uyum sağlamaktadır (Gusli vd., 2020).

İklim değişikliği ise kakao üretimini doğrudan etkilemektedir. Togo'da gerçekleştirilen bir çalışma, kahve ve kakaonun birlikte yetiştirildiği tarım sistemlerinin, artan sıcaklıklar ve değişen yağış düzenlerine karşı hassas olduğunu ortaya koymaktadır (Attiogbé vd., 2020). Bu durum, tarım alanlarının ekolojik uygunluğunu düşürebilmekte ve üreticilerin uyum sağlamak için stratejiler geliştirmesini zorunlu kılmaktadır (Attiogbé, vd., 2022).

Sonuç olarak, kakao üretimi ormansızlaşma, toprak bozulması ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlarla bağlantılıdır. Agroforestry uygulamaları, bu etkileri en aza indirmek ve üretim sistemlerini sürdürülebilir hâle getirmek için son derece etkili bir araçtır. Ancak üretim yoğunluğu ve çevresel kısıtlamalar, dikkatli arazi yönetimi ve planlama gerektirmektedir (Kalischek vd., 2022).

2.3. Sürdürülebilir Kakao Tarımı Uygulamaları

Kakao üretimi, Batı Afrika, Güney Amerika ve Güneydoğu Asya gibi bölgelerde mali bakımdan kritik bir eylem olmasına karşın, geleneksel üretim teknikleri çevresel ve sosyo- ekonomik sorunlar doğurmaktadır. Özellikle yoğun tarım uygulamaları, ormansızlaşma, toprak bozulması ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi tehlikeleri de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir kakao tarımı, çevresel koruma ile üretim verimliliğini dengeleyen tutumları içermektedir (Kaba vd., 2024).

Agroforestry, sürdürülebilir kakao üretiminin önde gelen araçlarından biridir. Agroforestry sistemleri, kakaonun doğal gölge altında yetişmesini sağlayarak toprak erozyonunu azaltmakta, su tutma kapasitesini artırmakta ve karbon envanterini iyileştirmektedir. Kaba vd. (2024), agroforestry uygulamalarının sadece karbon dengesi açısından değil, aynı zamanda yaşam çeşitliliğinin korunması ve iklim değişikliğine uyum sağlanması açısından da önemli bir rol üstlendiğini vurgulamaktadır. Bu sistemler, büyük yoğunlukta monokültür üretimine kıyasla ekolojik hizmetleri destekleyerek, ileriye dönük üretkenliği güvence altına almaktadır (Kaba vd., 2024).

Küçük ölçekli çiftçiler açısından iklim akıllı tarım (climate-smart agriculture) faaliyetleri, sürdürülebilirliği destekleyen bir diğer önemli perspektif olarak öne çıkmaktadır (Antwi-Agyei vd., 2025). Gana'da yapılan araştırmalar, küçük çiftçilerin benimsediği gölge ağacı kullanımı, toprak koruma teknikleri ve su kullanım faaliyetlerinin, performansı yükselttiği ve

iklim değişikliğinin olumsuz yansımalarını azalttığını ortaya koymaktadır (Antwi-Agyei vd., 2025). Bu yöntemler, çiftçilerin karşılaştıkları sorunları kontrol altına almalarına ve üretimlerini uzun dönemde sürdürülebilir şekilde yürütmelerine olanak sağlamaktadır (Antwi-Agyei vd., 2025). Sonuç olarak, sürdürülebilir kakao tarımı, agroforestry sistemleri ve iklim akıllı tarım faaliyetleri ile kolaylaştırıldığında, ekolojik koruma ve finansal verimliliği birlikte sağlamaktadır. Uluslararası fonlar ve uygulamalı destek projeleri, üreticilerin bu uygulamaları benimsemesine olanak tanımakta ve sektörde süreklilik arz eden sürdürülebilirliği artırmaktadır.

3. Çikolata Üretiminde Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Çikolata üretimi, hem finansal hem de kültürel açıdan çok büyük öneme sahip bir sektördür; ancak üretim aşaması, ekolojik ve sosyal açıdan önemli etkiler ortaya çıkarmaktadır. Geleneksel çikolata üretimi, yüksek enerji kullanımı, su kullanımı ve tarım alanlarına ait kaynaklara olan artan talep sebebiyle çevresel baskılar doğurmaktadır. Bu sebeple, sürdürülebilir üretim faaliyetleri, sektörün geleceği ve ekolojik etkilerin azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir (Camargo vd., 2019).

İşlevsel ve yenilikçi çikolata üretimi, sürdürülebilirlik bakış açısıyla birlikte değerlendirildiğinde önemli fırsatlar ortaya koymaktadır. Çelik, Kıvılcım ve Ergönül (2022), işlevsel çikolata üretiminde yenilikçi teknolojilerin enerjinin verimli kullanımını artırabileceğini, atık yönetimini geliştirebileceğini ve sürdürülebilir hammadde kullanımını destekleyebileceğini vurgulamaktadır. Özellikle kakao çekirdeğinin takip edilebilirliği ve proses aşamalarındaki atıkların azaltılması, üretimin ekolojik etkilerini düşürmek için ana basamaklar arasında yer almaktadır (Çelik vd., 2022).

Sektördeki bir diğer önemli konu, çikolata imalatında coğrafi işaretli ürünlerin ve yerel kaynaklı bileşenlerin kullanılmasıdır. Çanakçı (2025), Türk mutfak kültüründe çikolata ürünleri ve çeşitlerinin coğrafi işaretli ürünlerle bağdaştırılmasının, hem yerel ekonomiyi desteklediğini hem de üretim aşamalarının sürdürülebilirliğini artırdığını belirtmektedir. Bu strateji, üreticilerin yerel temelli kaynakları tedbirli ve duyarlı şekilde kullanmasını cesaretlendirmekte ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Çanakçı, 2025).

Bean-to-Bar tutumu ise çikolata imalatında sürdürülebilirliğin ve ahlaki değerlerin entegrasyonunu sağlayan bir yöntemdir. Uçan Kayaalp ve Bozok (2025), bu yöntemin üretim zincirinde şeffaflığı artırdığını, çiftçilerin kazançlarını iyileştirdiğini ve ekolojik etkilerin en aza indirilmesini sağladığını göstermektedir. Bean-to-Bar yaklaşımı, hammaddenin temin edildiği noktadan son ürüne kadar izlenmesine olanak sağlayarak, üreticiler ve tüketiciler arasında ahlaki bir bağ oluşturmakta ve sektörde sosyal sorumluluk bilincini güçlendirmektedir (Uçan Kayaalp ve Bozok, 2025).

Çikolata tedarik zincirinin ekolojik etkileri üzerine yapılan yaşam döngüsü analizleri, farklı çikolata çeşitlerinin üretim aşamalarında ekosistem üzerindeki baskılarını kıyaslamaktadır. Özellikle bitter, sütlü ve beyaz çikolatanın imalatında enerji sarfı, su tüketimi ve sera gazı emisyonları açısından farklılıklar gözlemlenmiştir (Camargo vd., 2019). Bu kapsamda yapılan analizler, üreticilerin ve şirketlerin sürdürülebilirlik politikalarını belirlemelerine yardımcı olarak ekolojik etkilerin azaltılmasına destek vermektedir.

Nitel araştırmalar da çikolata sektöründe sürdürülebilirlik politikalarının benimsenmesini desteklemektedir. Camargo ve arkadaşları (2019), üretim aşamalarının ekolojik etkilerini azaltmaya yönelik faaliyetlerin, hem tedarik zincirinde üretkenliği artırdığını hem de tüketicilerin sürdürülebilir ürün talebini karşılamaya destek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, özellikle enerji optimizasyonu, atık kontrolü ve sürdürülebilir tedarik kaynağı temini gibi faaliyetlerin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır (Camargo vd., 2019).

Sonuç olarak, çikolata imalatında sürdürülebilirlik, sadece ekolojik etkilerin azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp, sosyal ve ekonomik boyutları da kapsayan holistik bir yaklaşımı gerektirmektedir. Yenilikçi üretim prosedürleri, coğrafi işaretli ürünlerin kullanımı, Bean-to- Bar tutumu ve yaşam döngüsü analizleri, sektörde sürdürülebilirliği destekleyen temel faaliyetler olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımlar, hem ekolojik hem de sosyal sorumluluk boyutunda sektörün geleceğe dönük sürdürülebilirliğini güvence altına almaktadır.

3.1. Sürdürülebilir Ambalaj Uygulamaları

Çikolata imalatında ambalaj, ürünün korunması kadar ekolojik etkisi açısından da oldukça önemlidir. Farklı ambalaj bileşenleri, üretim ve atık aşamalarında farklı ekolojik yükler oluşturmaktadır. Yaşam döngüsü analizleri (LCA) göstermektedir ki, lamineli ve metalize ambalajlar geri dönüşüm açısından zor dönüştürülebilir olması sebebiyle ekolojik etkileri daha yüksektir (Bianchi vd., 2021). Tek katmanlı polipropilen veya geri dönüştürülebilir kağıt kullanımı ise karbon ayak izini azaltmaktadır (Bianchi vd., 2021).

Ambalaj malzemesinin kaynağı da son derece önemli bir faktördür. Yenilenebilir biyoplastikler ve geri dönüştürülebilir kağıt ambalajlar, enerji sarfını ve atık oluşumunu azaltmaktadır (Bianchi vd., 2021). Çikolata gibi uzun raf ömrü gerektiren ürünlerde, sürdürülebilir malzemelerin işlevsel etkinliğini artırmak için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Türkiye'de yapılan çalışmalar, ambalaj tasarımında malzeme kullanımını azaltmanın, geri dönüştürülebilir çözümler kullanmanın ve atığı önleyici tasarım taktiklerinin ekolojik etkinliği iyileştirdiğini göstermektedir (Çeken ve Büyükçakılcı, 2024). Bu faaliyetler, çikolata endüstrisinde hem ekolojik etkilerin

azaltılmasına hem de tüketicinin sürdürülebilir ürün tercihlerine yanıt vermesine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, sürdürülebilir ambalaj faaliyetleri, malzeme seçimi, geri dönüşüm ve yaşam döngüsü etkinliğine odaklanarak çikolata imalatında çevresel etkinin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Çeken ve Büyükçakılcı, 2024).

4. Adil Ticaret ve Sertifikasyon Sistemleri

Kakao imalatında Fairtrade, UTZ ve Rainforest Alliance gibi sertifikalar, üreticilerin daha eşit ve adil şartlarda çalışmasını ve çevrenin korunmasını sağlamak için kullanılır (Ingram vd., 2018). Bu sertifikalar, çiftçilere eğitim ve destek sağlayarak tarımsal üretkenliğini artırır ve gelirlerini iyileştirme fırsatı verir (Bennett vd., 2021).

Fairtrade ve UTZ gibi sistemler, küçük üreticilerin ürünlerini daha iyi fiyatlarla satmasına ön ayak olur ve ailelerinin sosyal refah düzeyini yükseltir (Bennett vd., 2021). Rainforest Alliance ise çevresel sürdürülebilirliğe odaklanır; çiftliklerde iyi tarım faaliyetlerinin uygulanmasını, ormanların korunmasını, tahribinin önlenmesini ve kimyasal kullanımının azaltılmasını teşvik eder (Wenda vd., 2024).

Bu sertifikasyonların ortak amacı, hem finansal hem sosyal hem de ekolojik faydalar sunmaktadır. Sertifikalar sayesinde üreticiler, daha sürdürülebilir üretim teknikleri kullanmayı öğrenmekte ve gelecekte hem gelirlerini hem de yaşam koşullarını iyileştirme şansı bulmaktadır (Ingram vd., 2018).

Sonuç olarak, sertifikasyon sistemleri kakao sektöründe hem üreticilerin refahını artıran hem de ekolojik etkileri azaltan önemli araçlardır. Ancak, etkilerin tam anlamıyla gerçekleşebilmesi için sertifikaya ek destek ve eğitim programlarının uygulanması gereklidir (Bennett vd., 2021).

5. Türkiye'de Kakao ve Çikolata Sanayii

Türkiye'de kakao ve çikolata sektörü, özellikle 2000'li yıllardan itibaren hızlı bir gelişim göstermiştir. Sektör, hem iç tüketim hem de ihracat açısından finansal açıdan önemli bir yere sahiptir (Uzun, 2019). Ülke genelinde çok sayıda ticari firma bulunmakta ve bu firmalar hem yerel pazara hem de uluslararası pazarlara ürün temin etmektedir. Üretim alanlarında genellikle teknolojinin ileri kullanımıyla çikolata ve ikincil ürünler üretilmekte, kalite ve hijyen standartları katı kurallarla uygulanmaktadır (Kuşat ve Kösekahyaoğlu, 2011).

Tüketim davranışları incelendiğinde, çikolata ve şekerleme ürünlerinin özellikle genç demografik grup ve aileler arasında yüksek talep aldığı görülmektedir (İçöz ve Mankan, 2022). Bu durum, üreticilerin ürün yelpazesini artırmasına ve yeni lezzetler geliştirmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda sektör, coğrafi işaretli ürünler ve geleneksel lezzetlerin

korunması yönünde inisiyatif alarak kültürel değerlerin sürdürülmesine etkide bulunmaktadır (Kuşat & Kösekahyaoğlu, 2011).

Sektörün sürdürülebilirliği açısından, hammadde tedariki önemli bir konudur. Kakao ürünleri ekseriyetle ithal edildiği için üreticiler, tedarik zincirinde kaliteyi ve sürdürülebilir faaliyetleri kontrol etmekle yükümlüdür (Uzun, 2019). Bununla birlikte, Türkiye'de üretici firmalar, ekolojik etkileri azaltmak için enerji kullanımının etkinliği ve atık kontrolü gibi faaliyetleri giderek yaygınlaştırmaktadır. Bu çabalar, hem finansal hem de ekolojik sürdürülebilirliği desteklemektedir (İçöz & Mankan, 2022).

Sonuç olarak, Türkiye'de kakao ve çikolata sanayii, hem finansal hem sosyal hem de kültürel açıdan önemli bir sektör olarak vurgulanmaktadır. Sektörün sürdürülebilir kalkınması, yüksek teknoloji kullanımının artırılması, kaynak tedarikinin güvence altına alınması ve ekolojik faaliyetlerin yaygınlaştırılması ile mümkün olacaktır (Kuşat ve Kösekahyaoğlu, 2011; Uzun, 2019; İçöz ve Mankan, 2022).

5.1. Türkiye'de Kakao İthalatı ve Sektörün Genel Durumu

Türkiye'de çikolata ve kakao sanayii, hem yerel piyasaya yönelik imalatı hem de ithalata bağımlı hammadde tedariki ile öne çıkan bir sektördür (Uzun, 2019). Ülkemizdeki çikolata üreticileri, yüksek kaliteli ürünler temin edebilmek için ağırlıklı olarak kakao ithalatına bağımlıdır (Uzun, 2019). Bu durum, sektörü dünya çapında fiyat değişimlerine karşı hassas hâle getirirken, üretim potansiyelinin artmasına rağmen hammadde güvenliği konusunu ön plana çıkarmaktadır (Kuşat ve Kösekahyaoğlu, 2011).

Sektörün genel yapısı tetkik edildiğinde, Türkiye'de çok sayıda çikolata üreticisi faaliyet göstermektedir ve firmalar teknolojik altyapılarını sürekli iyileştirmektedir (İçöz ve Mankan, 2022). Bu gelişmeler, hem imalat performansını artırmakta hem de tüketici taleplerine daha verimli ve hızlı cevap vermeyi sağlamaktadır. Öte yandan, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği'nin 2024 raporuna göre, sektördeki ithalat büyüklüğü ve maliyetler, üreticilerin kararlarını ve fiyat politikalarını doğrudan etkilemektedir (TOBB, 2024).

Sonuç olarak, Türkiye'de kakao ve çikolata sanayii, ithalata dayalı hammadde tedariki, teknolojik altyapı ve tüketici talepleri ile şekillenen dinamik bir sektördür. Sektörün sürdürülebilirliği için hem ithalat zincirinin güvence altına alınması hem de üretim teknolojilerinin geliştirilmesi büyük öneme sahiptir (Uzun, 2019; TOBB, 2024; Kuşat ve Kösekahyaoğlu, 2011; İçöz ve Mankan, 2022).

SONUÇ

Bu çalışma, kakao ve çikolata üretiminde sürdürülebilirlik uygulamalarının ekolojik, finansal ve sosyal boyutlarını holistik bir şekilde ele almıştır. Yapılan incelemeler, sektörün dünya çapında ve Türkiye özelindeki yapısını ortaya koyarken, sürdürülebilir üretim faaliyetlerinin giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir. Kakao tarımı, özellikle Batı Afrika'da hem ekonomik bir geçim kaynağı hem de ekosistemler üzerinde yoğun baskı oluşturan bir uygulama olarak vurgulanmaktadır. Ormansızlaşma, iklim değişikliği ve toprak bozulması gibi ekolojik sorunlar, üretim aşamalarının sürdürülebilirlik bakış açısıyla yeniden şekillendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda agroforestry sistemleri ve karbon yönetimi uygulamaları, hem üreticilerin gelirini güvence altına almak hem de ekosistemleri korumak açısından etkili çözümler sunmaktadır.

Sertifikasyon sistemleri ve adil ticaret uygulamaları, üreticilerin ekonomik durumunu iyileştirirken, çevresel kriterlerin uygulanmasını da teşvik etmektedir. Türkiye özelinde ise çikolata sanayii, büyük ölçüde ithalata dayalı hammadde tedariki ve teknolojik altyapı ile şekillenmektedir. Yerli üreticilerin sürdürülebilirlik faaliyetleri ve tüketicilerin çevre dostu ürünlere yönelik artan talepleri, sektörde kalite ve toplumsal sorumluluk farkındalığının yükselmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, kakao ve çikolata üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak, yalnızca ekolojik etkileri azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda üretici refahını artırmak, toplumsal sorumlulukları güçlendirmek ve tüketici taleplerine cevap vermek anlamına gelmektedir. Sektörde uygulanacak sürdürülebilirlik odaklı politikalar, üretim hattının ilgili tüm tarafları için uzun dönemli fayda sağlayacak ve gelecekteki gıda güvenliği ile gastronomik değerlerin korunmasına katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

Acar, S. (2021). Sürdürülebilirlik raporlarının sürdürülebilir insan kaynakları yönetimi yönüyle incelenmesi: bıst sürdürülebilirlik endeksi örneği. Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(23), 347-368.

Antwi-Agyei, P., Eloh, V. Y. N., Nti, P. O., Amarh, N. C., & Owusu, T. P. (2025). Climate- smart agricultural practices by smallholder cocoa farmers in the semi-deciduous forest agro- ecological zone of Ghana. Discover Sustainability, 6(1), 817.

Attiogbé, A. A. C., Abotsi, K. E., Adjossou, K., Parkoo, E. N., Adjonou, K., & Kokou, K. (2022). Climate vulnerability of coffee-cocoa agrosystems in the sub-

humid mountain ecosystems in south-west Togo (West Africa). Environmental Systems Research, 11(1), 31.

Bennett, M., Giovannucci, D., Rue, C., Ayerakwa, H., & Agyei-Holmes, A. (2021). Cocoa Farms in Ghana: An Evaluation of the Impact of UTZ Certification on the Sustainability of Smallholde.

Bianchi, F. R., Moreschi, L., Gallo, M., Vesce, E., & Del Borghi, A. (2021). Environmental analysis along the supply chain of dark, milk and white chocolate: a life cycle comparison. The International Journal of Life Cycle Assessment, 26(4), 807-821.

Camargo, M. C., Hogarth, N. J., Pacheco, P., Nhantumbo, I. & Kanninen, M. (2019). Greening the Dark Side of Chocolate: A Qualitative Assessment to Inform Sustainable Supply Chains. Environmental Conservation, 46(1), 9-16.

Çanakçı, S. D. (2025). Türk Mutfak Kültüründe Çikolata, Şekerleme ve Türevlerinin Coğrafi İşaretli Ürünler Kapsamında Değerlendirilmesi (Evaluation of Chocolate, Confectionery and Derivatives in Turkish Culinary Culture within the Scope of Geographical Indicated Products). Journal of Tourism & Gastronomy Studies, 13(2), 1297-1310.

Çeken, B., & Büyükçakılcı, A. (2024). AMBALAJ TASARIMINDA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI. Akademik Sanat, (22), 81-91

Çelik, K., Ergonul, P. G., & Çelik, S. (2022). Fonksiyonel çikolata üretiminde inovatif yaklaşımlar. Food and Health, 8(3), 241-259.

Daymond, A., Giraldo Méndez, D., Hadley, P. & Bastide, P. (2022). A Global Guide to Cocoa Farming Systems. ICCO.

Escobar Riomalo, M. P. (2022). Sustainable cocoa production in Cameroon: policy integration analysis around forest issues.

Gusli, S., Sumeni, S., Sabodin, R., Muqfi, I. H., Nur, M., Hairiah, K., Van Noordwijk, M. (2020). Soil organic matter, mitigation of and adaptation to climate change in cocoa–based agroforestry systems. Land, 9(9), 323.

Ingram, V., Van Rijn, F., Waarts, Y., & Gilhuis, H. (2018). The impacts of cocoa sustainability initiatives in West Africa. Sustainability, 10(11), 4249.

İçöz, E., & Mankan, E. (2022). Çikolata tüketim tercihleri üzerine bir alan araştırması. Topkapı Sosyal Bilimler Dergisi, 1(2), 67-78.

Jagoret, P., Saj, S. & Carimentrand, A. (2020). Cocoa agroforestry systems in Africa – The art of reconciling sustainable production and ecological services. Perspective, (54), 1–4.

Kaba, J. S., Agyei, E. K., Avilineni, M. K. C., Yamoah, F. A., Issahaku, I., Ntiamoah, P., & Acquah, E. (2024). Agroforestry as an old approach to a new challenge of combating climate change: a critical analysis of the cocoa sector. Discover Agriculture, 2(1), 92.

Kalischek, N., Lang, N., Renier, C., Daudt, R. C., Addoah, T., Thompson, W., Blaser-Hart, W. J., Garrett, R., Schindler, K. & Wegner, J. D. (2022). Satellite-based high-resolution maps of cocoa planted area for Côte d'Ivoire and Ghana.

Kalischek, N., Lang, N., Renier, C., Daudt, R. C., Addoah, T., Thompson, W., Blaser-Hart, W. J., Garrett, R., Schindler, K. & Wegner, J. D. (2023). Cocoa plantations are associated with deforestation in Côte d'Ivoire and Ghana.

Kaşlı, M. , Cankül, D. , Köz E.N. ve Ekici A. (2015). Gastronomik miras ve sürdürülebilirlik: Eskişehir örneği. Eko-Gastronomi Dergisi, 1(2), 27-46.

Kayaalp, B. Z. U., & Bozok, D. (2025). Bean to Bar Yaklaşımıyla Çikolata Üretiminde Sürdürülebilirlik ve Etik Dönüşüm (Sustainability and Ethical

Transformation in Chocolate Production with the Bean to Bar Approach). Journal of Tourism & Gastronomy Studies, 13(3), 3319-3341.

Kolapo, A., Tijani, A. A., Oluwatayo, I. B., Ojo, T. O., Khumalo, N. Z., Elhindi, K. M., Kassem,

H. S. & Adeleye, F. A. (2025). Sustainable intensification of cocoa production under a changing climate in Southwest, Nigeria. Frontiers in Sustainable Food Systems.

Konaté, N., Ouattara, Y., Kouakou, A. K., & Barima, Y. S. S. (2024). Effects of traditional agroforestry practices on cocoa yields in Côte d'Ivoire. Sustainability, 16(22).

Kouassi, J.-L., Kouassi, A., Bene, Y., Konan, D., Tondoh, E. J., & Kouamé, C. (2021). Exploring barriers to agroforestry adoption by cocoa farmers in South-Western Côte d'Ivoire. Sustainability, 13(23), 13075. https://doi.org/10.3390/su132313075

Kumeh, E. M. (2024). The political ecology of cocoa agroforestry and implications for equitable land use in rural Ghana. Agroforestry Systems, 98(7), 2463–2481.

Kuşat, N., & Kösekahyaoğlu, L. (2011). Gıda sektöründe ürün ve iyileştirilmiş ürün inovasyonları: Batı Akdeniz Bölgesi şekerleme, kakao ve çikolata alt sektörü üzerine bir uygulama.. Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi, 3(2), 193-215.

Orozco-Aguilar, L., Arnaiz-Schmitz, C., Schmitz, M. F., & Herrero-Jáuregui, C. (2022). Cocoa cultivation–Deforestation. Frontiers in Sustainable Food Systems, 6.

Otekunrin, O. A. (2025). Mapping cocoa research (Theobroma cacao L.) in Africa: production, trade outlook, and scientometric insights. Discover Agriculture, 3:111.

Öztürk, B. , Kanoğlu, E. (2024). Metaforlarla gastronomide sürdürülebilirlik ve atık yönetimi. Journal of Gastronomy, Hospitality and Trravel. 7(3), 791-805.

Soh Wenda, B. D., Nken, H., T. Takam, H. N., Eloundou, C. E., & Fon, D. E. (2024). Rainforest Alliance-UTZ cocoa certification scheme adoption: Determinants and financial implications for cocoa production in the Centre region of Cameroon. PLOS Sustainability and Transformation, 3(7).

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği / Türkiye Gıda Sektör Derleme Raporu (2024).

Uzun, B. (2019). Türkiye çikolatalı ve şekerli mamuller sektörünün uluslararası rekabet gücünün incelenmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi.

World Cocoa Foundation. (2022). Cocoa & Forests Initiative: 2022 Annual Report. World Cocoa Foundation.

Fotovoltaik Hücrelerin ve Modüllerin Kullanılabilirliği ve Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Emre ÖZAĞDAŞ[1]

1- Öğr. Gör.; Sinop Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, emreozagdas@sinop.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5851-0183

ÖZET

Fotovoltaik (FV) teknolojiler, ölçeklenebilir yapıları, düşen kurulum maliyetleri ve çevresel avantajları sayesinde küresel enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Ancak fotovoltaik sistemlerin gerçek işletme koşullarında ürettiği enerji miktarı, standart test koşullarında belirlenen nominal değerlere kıyasla çoğu zaman önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar; çevresel etkiler, optik ve geometrik kayıplar, elektriksel düzensizlikler ve uzun vadeli degradasyon mekanizmalarının birlikte ve etkileşimli biçimde etkili olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu kitap bölümünde, fotovoltaik hücre ve modüllerin gerçek saha koşullarındaki verimliliğini ve uzun dönemli kullanılabilirliğini belirleyen başlıca faktörler kapsamlı bir derleme yaklaşımıyla ele alınmaktadır. Sıcaklık, güneş ışınımının spektral bileşimi, rüzgâr, nem, kirlenme ve kar örtüsü gibi çevresel parametrelerin fotovoltaik performans üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmektedir. Buna ek olarak, geliş açısına bağlı yansıma kayıpları, uyumsuzluk (mismatch) kayıpları ve kısmi gölgelenme gibi optik ve elektriksel mekanizmalar değerlendirilmektedir.

Bölümde ayrıca potansiyel kaynaklı degradasyon, ışık kaynaklı degradasyon ve malzeme yaşlanması gibi geri döndürülemez süreçlerin, sistemlerin yaşam boyu enerji üretimi ve güvenilirliği üzerindeki rolü tartışılmaktadır. Farklı fotovoltaik teknolojilerin iklim koşullarına karşı sergilediği duyarlılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmakta ve teknoloji–iklim uyumunun önemi vurgulanmaktadır. Son olarak, performans kayıplarını azaltmaya yönelik tasarım, işletme ve bakım stratejileri ele alınarak, gelecekteki araştırma yönelimlerine ilişkin değerlendirmeler yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Mühendislik, Yenilenebilir enerji, Güneş enerjisi, Fotovoltaik, Verim

1. GİRİŞ

Son yirmi yıl içerisinde fotovoltaik sistemlerin hızlı biçimde yaygınlaşması, küresel elektrik üretim yapısını köklü şekilde dönüştürmüştür (Fouad et al., 2017). Günümüzde fotovoltaik teknolojiler; çöl iklimlerinden tropikal bölgelere, ılıman kuşaklardan soğuk ve yüksek enlemlere kadar oldukça geniş bir coğrafyada uygulanmaktadır (Bamisile et al., 2025). Laboratuvar ölçeğinde fotovoltaik hücre verimlilikleri sürekli olarak artmasına rağmen, saha koşullarında elde edilen gerçek verim ve sistem kullanılabilirliği, çoğu zaman standart test prosedürlerinin ötesinde kalan çok sayıda iç ve dış faktöre bağlı olarak şekillenmektedir (Koester et al., 2022).

Gerçek işletme koşullarında fotovoltaik modüller; zamana bağlı olarak değişen ışınım seviyeleri, sıcaklık dalgalanmaları, spektral farklılıklar ve mekanik zorlanmalar altında çalışmaktadır (Bamisile et al., 2025). Buna ek olarak, işletme süresi boyunca ortaya çıkan geri döndürülemez degradasyon süreçleri, sistem çıkış gücünü kademeli olarak azaltmakta ve uzun vadeli ekonomik fizibiliteyi doğrudan etkilemektedir (Yeo et al., 2022). Bu nedenle fotovoltaik sistem performansının yalnızca başlangıç verimliliği üzerinden değerlendirilmesi, gerçek kullanım koşullarını yansıtmak açısından yetersiz kalmaktadır (Koester et al., 2022).

Bu bağlamda fotovoltaik kullanılabilirlik kavramı, bir sistemin tasarlanan hizmet ömrü boyunca kabul edilebilir performans sınırları içinde güvenilir elektrik enerjisi üretebilme yeteneği olarak ele alınmalıdır (Koester et al., 2022). Bu bölümün amacı, fotovoltaik sistemlerin verimliliğini ve kullanılabilirliğini belirleyen başlıca kayıp mekanizmalarını, bu mekanizmaların tipik büyüklüklerini ve literatürde önerilen azaltma yaklaşımlarını gerçek saha koşulları bağlamında bütüncül bir bakış açısıyla derlemektir (Fouad et al., 2017; Bamisile et al., 2025). İnceleme ağırlıklı olarak kristalin silikon tabanlı fotovoltaik teknolojilere odaklanmakta, ancak bifasiyel ve gelişmekte olan hücre mimarilerine ilişkin kritik hususlara da yer vermektedir (Yeo et al., 2022).

2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KULLANILABİLİRLİK VE PERFORMANS GÖSTERGELERİ

2.1. Kullanılabilirlik ve Erişilebilirlik Kavramları

Fotovoltaik sistemler bağlamında kullanılabilirlik, bir sistemin kabul edilebilir performans sınırları içerisinde elektrik enerjisi üretebildiği zaman diliminin oranı olarak tanımlanmaktadır (Koester et al., 2022). Bu kavram, sistemin yalnızca çalışır durumda olup olmadığını değil, aynı zamanda üretilen enerjinin kalite ve sürekliliğini de kapsamaktadır (Koester et al., 2022). Kullanılabilirlik, çoğu zaman sistem erişilebilirliği ile birlikte değerlendirilmekte olup, erişilebilirlik kavramı arızalar, bakım faaliyetleri ve dışsal kısıtlar nedeniyle oluşan duruş sürelerini ifade etmektedir (IEC 61724-1).

Erişilebilirlik genellikle yüzde cinsinden ifade edilirken, kullanılabilirlik kavramı performans kayıplarını da içerdiği için daha kapsayıcı bir değerlendirme sunmaktadır (Koester et al., 2022). Bu nedenle, fotovoltaik sistemlerin uzun vadeli değerlendirilmesinde yalnızca erişilebilirlik oranlarına odaklanmak, gerçek saha performansını tam olarak yansıtmamaktadır (Bamisile et al., 2025). Kullanılabilirlik yaklaşımı, enerji üretim sürekliliği ile performans kalitesini birlikte ele alarak daha gerçekçi bir analiz imkânı sağlamaktadır (Koester et al., 2022).

2.2. Performans Oranı ve Enerji Verimi

Performans oranı (PR), fotovoltaik sistemlerde toplam kayıpların etkisini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bütüncül bir göstergedir (IEC 61724-1). PR, bir sistemin gerçek enerji üretimi ile ideal koşullar altında üretebileceği teorik enerji miktarı arasındaki oranı ifade etmektedir (Koester et al., 2022). Bu gösterge, çevresel, optik, elektriksel ve degradasyona bağlı tüm kayıpların birleşik etkisini yansıtması bakımından büyük önem taşımaktadır (Bamisile et al., 2025).

İyi tasarlanmış ve uygun koşullarda işletilen fotovoltaik sistemler için performans oranı değerleri genellikle 0,70 ile 0,90 aralığında raporlanmaktadır (Fouad et al., 2017). Ancak bu değerler, iklim koşulları, kullanılan teknoloji, kurulum geometrisi ve bakım stratejilerine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Koester et al., 2022). Performans oranının düşmesine neden olan başlıca faktörler arasında sıcaklık kaynaklı

kayıplar, inverter verimsizlikleri, kirlenme, gölgelenme ve uzun vadeli degradasyon süreçleri yer almaktadır (Bamisile et al., 2025).

3. FOTOVOLTAİK VERİMLİLİĞİNİ ETKİLEYEN ÇEVRESEL FAKTÖRLER

3.0. Çevresel Etkileşimlere Genel Bakış

Çevresel faktörler, laboratuvar koşullarında ölçülen fotovoltaik performans değerleri ile gerçek saha performansı arasındaki farkın en önemli nedenlerinden birini oluşturmaktadır (Bamisile et al., 2025). Kontrollü test ortamlarının aksine, gerçek işletme koşullarında fotovoltaik sistemler çok sayıda atmosferik ve iklimsel değişkenin eşzamanlı etkisine maruz kalmaktadır (Fouad et al., 2017). Bu değişkenlerin doğrusal olmayan biçimde etkileşmesi, tekil faktörlere dayalı performans değerlendirmelerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Koester et al., 2022).

Literatürde yer alan çok sayıda çalışma, sıcaklık, ışınım değişkenliği, spektral bileşim, rüzgâr hızı, nem ve bölgesel çevresel koşulların birlikte ele alınmasının, hem anlık verimlilik hem de uzun vadeli kullanılabilirlik açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Bamisile et al., 2025). Bu nedenle çevresel faktörlerin etkisi, yalnızca kısa dönemli enerji kayıpları bağlamında değil, aynı zamanda degradasyon süreçleriyle olan etkileşimleri çerçevesinde değerlendirilmelidir (Koester et al., 2022).

3.1. Güneş Işınımı ve Spektral Etkiler

Fotovoltaik hücreler, yarı iletken malzemenin dalga boyuna bağlı soğurma özellikleri nedeniyle spektral olarak seçici davranış sergilemektedir (Daxini and Wu, 2024). Standart test koşullarında AM1.5 referans güneş spektrumu kullanılmasına rağmen, gerçek atmosferik koşullarda spektral dağılım sıklıkla bu referanstan sapmaktadır (Bamisile et al., 2025). Hava kütlesindeki değişimler, bulutluluk durumu, aerosol yoğunluğu ve atmosferik su buharı miktarı bu sapmanın başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Daxini and Wu, 2024).

Spektral uyumsuzluk etkilerinin özellikle sabah ve akşam saatlerinde, yüksek enlemli bölgelerde ve düşük güneş yükseklik açılarında belirgin hâle geldiği raporlanmaktadır (Bamisile et al., 2025). Heteroeklem, TOPCon ve bifasiyel modüller gibi gelişmiş fotovoltaik teknolojiler, farklı kuantum verimlilik profillerine sahip olmaları nedeniyle spektral değişimlere karşı daha hassas davranabilmektedir (Daxini and Wu, 2024). Bu nedenle spektral etkilerin göz ardı edilmesi, yıllık enerji üretiminin sistematik olarak

olduğundan yüksek tahmin edilmesine yol açabilmektedir (Koester et al., 2022).
Son yıllarda yayımlanan derleme çalışmaları, uzun dönemli enerji verimi tahminlerinde spektral düzeltme faktörlerinin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır (Daxini and Wu, 2024). Ancak saha bazlı spektral ölçümlerin sınırlı olması, bu tür düzeltmelerin yaygın uygulamaya geçirilmesini zorlaştırmaktadır (Bamisile et al., 2025).

3.2. Sıcaklık Etkileri

Hücre sıcaklığı, gerçek saha koşullarında fotovoltaik verimliliği belirleyen en baskın çevresel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Gasparin et al., 2022). Çalışma sıcaklığındaki artış, yarı iletken bant aralığının daralmasına yol açmakta ve bunun sonucunda açık devre gerilimi ile çıkış gücü azalmaktadır (Cotfas et al., 2018). Kristalin silikon tabanlı modüller için sıcaklık katsayıları genellikle her bir santigrat derece artış için −0,35% ile −0,45% aralığında raporlanmaktadır (Gasparin et al., 2022).
Yüksek ortam sıcaklıkları ve güçlü güneş ışınımı ile karakterize edilen bölgelerde, yeterli ısıl yönetim önlemleri alınmadığı takdirde sıcaklık kaynaklı yıllık enerji kayıplarının %15'in üzerine çıkabildiği bildirilmektedir (Bamisile et al., 2025). Saha çalışmaları, montaj konfigürasyonunun ısı dağılımında belirleyici bir rol oynadığını ve açık raf sistemlerinin çatıya entegre kurulumlara kıyasla daha düşük çalışma sıcaklıklarına sahip olduğunu göstermektedir (Koester et al., 2022).
Anlık verim kayıplarının ötesinde, yüksek çalışma sıcaklıkları enkapsülant sararması ve lehim bağlantı yorgunluğu gibi malzeme degradasyon süreçlerini hızlandırarak uzun vadeli kullanılabilirliği dolaylı biçimde etkilemektedir (Koester et al., 2022). Bu nedenle sıcaklık etkileri, performans ve güvenilirlik perspektifleri birlikte ele alınarak değerlendirilmelidir (Gasparin et al., 2022).

3.3. Rüzgâr ve Nem Etkileri

Rüzgâr hızı ve bağıl nem, fotovoltaik modül performansını dolaylı ancak anlamlı biçimde etkileyen çevresel parametreler arasında yer almaktadır (Bamisile et al., 2025). Rüzgârın temel etkisi, modül yüzeyinden ısı taşınımını artırarak çalışma sıcaklığını düşürmesi ve böylece sıcaklık kaynaklı verim kayıplarını kısmen azaltması şeklinde ortaya çıkmaktadır (Gasparin et al., 2022). Saha ölçümleri, özellikle açık raf sistemlerinde rüzgâr hızındaki artışın modül sıcaklığını birkaç santigrat derece

düşürebildiğini ve bunun anlık güç çıkışında ölçülebilir artışlara yol açtığını göstermektedir (Koester et al., 2022).

Nem ise fotovoltaik sistemleri hem optik hem de elektriksel açıdan etkilemektedir (Kazem, 2024). Yüksek nem seviyeleri, zamanla modül camı ve enkapsülant katmanları üzerinden nem girişine neden olarak yansıtma kayıplarını artırabilmektedir (Koester et al., 2022). Daha kritik olarak, nemli ortamlar potansiyel kaynaklı degradasyonun (PID) ortaya çıkma ve hızlanma olasılığını önemli ölçüde artırmaktadır (Kazem, 2024). Bu durum özellikle yüksek sistem gerilimlerinde çalışan büyük ölçekli fotovoltaik santraller için ciddi bir kullanılabilirlik riski oluşturmaktadır (Bamisile et al., 2025).

4. KİRLENME VE KAR KAYNAKLI KAYIPLAR

4.1. Toz ve Partikül Birikimi (Kirlenme)

Kirlenme, fotovoltaik sistemlerin performansını etkileyen en bölgeye özgü ve işletme açısından en kritik kayıp mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir (Shahzad et al., 2025). Modül yüzeyinde biriken toz, kum, endüstriyel kirleticiler ve biyolojik materyaller, gelen güneş ışınımının camdan geçişini azaltarak elektriksel çıkış gücünde düşüşe yol açmaktadır (Fouad et al., 2017). Literatürde raporlanan yıllık kirlenme kaynaklı enerji kayıpları, düzenli yağış alan ılıman bölgelerde %2–5 seviyelerinde iken, kurak ve yarı kurak bölgelerde %30'un üzerine çıkabilmektedir (Shahzad et al., 2025).

Anlık optik kayıpların ötesinde, uzun süreli ve düzensiz kirlenme modül yüzeyinde ışınımın mekânsal olarak homojen dağılmasını engelleyerek uyumsuzluk (mismatch) kayıplarını artırmaktadır (Tummalieh et al., 2024). Bu durum, belirli hücrelerin aşırı ısınmasına ve sıcak nokta (hot-spot) oluşumuna zemin hazırlayarak hem performans hem de güvenilirlik açısından ilave riskler doğurmaktadır (Koester et al., 2022). Son yıllarda yayımlanan derleme çalışmalar, kirlenme karakteristiklerinin parçacık boyutu, kimyasal bileşim ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelere güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır (Shahzad et al., 2025).

4.2. Kar ve Buz Örtüsü

Soğuk ve yüksek enlemli bölgelerde kar birikimi, fotovoltaik sistemler için özgün bir kullanılabilirlik problemi oluşturmaktadır (Dahlioui et al., 2025). Kar örtüsü, modül yüzeyini tamamen kapladığında ışınımın hücrelere ulaşmasını engelleyerek geçici olarak sıfır üretim koşullarına yol açabilmektedir (Dahlioui et al., 2025). Bu tür durumlar, özellikle kış

aylarında yıllık enerji üretiminin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır (Bamisile et al., 2025).

Kar kaynaklı kayıpların azaltılması amacıyla modül eğim açısının artırılması önerilmekle birlikte, bu yaklaşımın etkinliği karın yoğunluğu, ortam sıcaklığı ve cam yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Dahlioui et al., 2025). Öte yandan karla kaplı zeminlerin yansıtıcılığı, bifasiyel fotovoltaik modüller için arka yüzeyden ek ışınım kazanımı sağlayabilmektedir (Molto et al., 2022). Ancak bu potansiyel faydanın net enerji üretimine etkisi büyük ölçüde saha koşullarına bağlıdır ve genelleştirilebilir değildir (Dahlioui et al., 2025).

5. OPTİK VE GEOMETRİK KAYIPLAR

5.1. Geliş Açısına Bağlı Kayıplar

Güneş ışınımının modül yüzeyine geliş açısı, cam-hava arayüzeyinde meydana gelen yansımalar nedeniyle fotovoltaik performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Ríos-Ledesma et al., 2026). Geliş açısı normelden saptıkça yansıma oranı artmakta ve hücrelere ulaşan etkin ışınım miktarı azalmaktadır (Ríos-Ledesma et al., 2026). Bu kayıplar özellikle sabah ve akşam saatlerinde, ayrıca yüksek enlemli bölgelerde daha belirgin hâle gelmektedir (Koester et al., 2022).

Bu nedenle geliş açısına bağlı kayıpların enerji üretim tahminlerine dâhil edilmesi amacıyla geliş açısı düzeltme katsayıları ve modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Koester et al., 2022). Ancak bu modellerin doğruluğu, modül cam özellikleri, yüzey kaplamaları ve yerel çevresel koşullara bağlı olarak değişebilmektedir (Ríos-Ledesma et al., 2026).

5.2. Yüzey Özellikleri ve Yaşlanmaya Bağlı Optik Etkiler

Fotovoltaik modül camlarının optik performansı, yüzey dokusu, yansıma önleyici kaplamalar ve malzeme yaşlanması gibi faktörlerden etkilenmektedir (Daxini and Wu, 2024). Uzun süreli ultraviyole maruziyeti, mekanik aşınma ve çevresel kirleticiler, zamanla kaplamaların etkinliğini azaltarak yansıma kayıplarının artmasına neden olmaktadır (Koester et al., 2022). Bu tür optik bozulmalar, sistem performansında kademeli düşüşe yol açarak uzun vadeli kullanılabilirliği olumsuz etkilemektedir (Bamisile et al., 2025).

6. MODÜL VE DİZİ DÜZEYİNDE ELEKTRİKSEL KAYIPLAR

6.1. Elektriksel Kayıpların Kökeni ve Sınıflandırılması

Fotovoltaik sistemlerde elektriksel kayıplar, hücre, modül ve dizi düzeyinde ortaya çıkan ideal olmayan elektriksel davranışlardan kaynaklanmakta ve sistem verimliliği ile kullanılabilirliği üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır (Tummalieh et al., 2024). Çevresel kayıpların aksine, elektriksel kayıplar büyük ölçüde sistem tasarımı, üretim toleransları ve kurulum konfigürasyonu ile ilişkilidir (Koester et al., 2022). Bu kayıplar genel olarak uyumsuzluk (mismatch) kayıpları, dirençsel kayıplar ve kısmi gölgelenmeye bağlı kayıplar şeklinde sınıflandırılmaktadır (Tummalieh et al., 2024).

Elektriksel kayıplar yalnızca anlık enerji üretimini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda yerel ısınma ve gerilim dengesizlikleri oluşturarak uzun vadeli degradasyon süreçlerini de tetikleyebilmektedir (Koester et al., 2022). Bu nedenle elektriksel kayıpların değerlendirilmesi, performans analizi ile güvenilirlik ve hizmet ömrü değerlendirmelerinin birlikte ele alınmasını gerektirmektedir (Bamisile et al., 2025).

6.2. Hücre, Modül ve Dizi Düzeyinde Uyumsuzluk Kayıpları

Uyumsuzluk kayıpları, elektriksel olarak bağlanan fotovoltaik hücre veya modüllerin aynı çalışma koşullarına veya elektriksel özelliklere sahip olmaması durumunda ortaya çıkmaktadır (Tummalieh et al., 2024). Hücre düzeyinde kısa devre akımı, seri direnç ve degradasyon durumu gibi parametrelerdeki farklılıklar, akım-gerilim karakteristiklerinin homojen olmamasına neden olmaktadır (Koester et al., 2022). Bu farklılıklar seri ve paralel bağlantılar aracılığıyla modül ve dizi düzeyine taşınarak toplam güç çıkışını sınırlamaktadır (Tummalieh et al., 2024).

Saha ölçümleri, uyumsuzluk kaynaklı enerji kayıplarının tipik olarak %2–5 aralığında olduğunu, ancak düzensiz kirlenme, sıcaklık gradyanları ve heterojen yaşlanma koşullarında bu oranın daha da artabildiğini göstermektedir (Tummalieh et al., 2024). Kullanılabilirlik açısından bakıldığında, uyumsuzluk kayıpları yerel ısıl gerilimleri artırarak sıcak nokta oluşumuna ve buna bağlı olarak hızlandırılmış degradasyona yol açabilmektedir (Koester et al., 2022). Bu nedenle uyumsuzluk, yalnızca enerji kaybı değil, aynı zamanda güvenilirlik ve bakım gereksinimlerini etkileyen kritik bir faktör olarak değerlendirilmelidir (Bamisile et al., 2025).

6.3. Kısmi Gölgelenme ve Baypas Diyotu Davranışı

Kısmi gölgelenme, fotovoltaik sistemlerde en şiddetli elektriksel kayıp mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir (Özkalay et al., 2024). Hücrelerin seri bağlantılı olması nedeniyle, küçük bir alanın gölgelenmesi dahi tüm modül veya dizi akımını sınırlandırabilmektedir (Koester et al., 2022). Bu durumda baypas diyotları devreye girerek hücrelerin zarar görmesini önlemekte, ancak bu koruma mekanizması beraberinde önemli güç kayıplarını da getirmektedir (Özkalay et al., 2024).

Deneysel ve saha temelli çalışmalar, kısmi gölgelenmenin gölgelenen alan oranına kıyasla orantısız derecede yüksek güç kayıplarına yol açabildiğini ortaya koymaktadır (Koester et al., 2022). Bunun yanı sıra, ters kutuplama koşullarında çalışan hücrelerde oluşan sıcak noktalar, hücre metalizasyonu ve enkapsülant malzemelerde kalıcı hasarlara neden olabilmektedir (Özkalay et al., 2024). Bu tür hasarlar, modül güvenilirliğini düşürerek uzun vadeli kullanılabilirliği doğrudan olumsuz etkilemektedir (Koester et al., 2022).

7. DEGRADASYON MEKANİZMALARI VE UZUN VADELİ KULLANILABİLİRLİK

7.1. Fotovoltaik Degradasyon Süreçlerine Genel Bakış

Fotovoltaik modüller, işletme ömürleri boyunca çeşitli degradasyon mekanizmalarına maruz kalmakta ve bu süreçler zaman içerisinde çıkış gücünün geri döndürülemez biçimde azalmasına neden olmaktadır (Koester et al., 2022). Kısa dönemli performans kayıplarının aksine, degradasyon kaynaklı kayıplar birikimli nitelik taşımakta ve yaşam boyu enerji üretiminin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır (Yeo et al., 2022). Kristalin silikon tabanlı modüller için raporlanan ortanca yıllık degradasyon oranları genellikle %0,3–0,8 aralığında yer almaktadır (Koester et al., 2022).

Degradasyon mekanizmaları; termal çevrimler, ultraviyole ışınım, mekanik zorlanmalar ve nem girişi gibi çevresel etkenlerle hızlandırılabilmektedir (Bamisile et al., 2025). Bu süreçler, yalnızca enerji üretimini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda sistem arıza oranlarını ve bakım gereksinimlerini de artırmaktadır (Koester et al., 2022).

7.2. Potansiyel Kaynaklı Degradasyon (PID)

Potansiyel kaynaklı degradasyon, fotovoltaik hücreler ile topraklanmış modül çerçevesi arasında oluşan yüksek elektriksel potansiyel farkları sonucunda meydana gelen bir degradasyon mekanizmasıdır (Kazem, 2024). Bu süreçte ortaya çıkan kaçak akımlar, hücrelerde şöntleşmeye ve önemli

güç kayıplarına yol açmaktadır (Kazem, 2024). Yüksek sıcaklık ve nem koşulları, PID'nin hem oluşumunu hem de ilerleme hızını belirgin biçimde artırmaktadır (Kazem, 2024).
Büyük ölçekli ve yüksek gerilimli fotovoltaik santrallerde PID kaynaklı güç kayıplarının uygun önlemler alınmadığı takdirde %20'nin üzerine çıkabildiği raporlanmaktadır (Koester et al., 2022). Bu nedenle PID, uzun vadeli kullanılabilirlik ve bankability analizlerinde dikkate alınması gereken temel risk faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Kazem, 2024).

7.3. Işık Kaynaklı Degradasyon (LID ve LeTID)

Işık kaynaklı degradasyon, özellikle p-tipi kristalin silikon hücrelerde bor–oksijen komplekslerinin oluşumu ile ilişkilendirilen erken dönem performans kaybı mekanizmasıdır (Yeo et al., 2022). Bu degradasyon türü, modüllerin ilk işletme döneminde çıkış gücünde ani düşüşlere yol açabilmektedir (Koester et al., 2022). Işık ve yüksek sıcaklığın birlikte etkisiyle ortaya çıkan LeTID mekanizması ise özellikle PERC tabanlı hücrelerde ek performans kayıplarına neden olmaktadır (Yeo et al., 2022).
Her ne kadar belirli koşullar altında kısmi performans geri kazanımı mümkün olsa da, LID ve LeTID etkileri erken dönem enerji üretimi tahminlerinde belirsizlik oluşturmaktadır (Koester et al., 2022). Bu nedenle söz konusu mekanizmaların doğru biçimde modellenmesi, gerçekçi yaşam boyu enerji verimi hesaplamaları açısından kritik öneme sahiptir (Yeo et al., 2022).

8. Teknolojiye Bağlı Duyarlılıklar

Farklı fotovoltaik hücre ve modül teknolojileri, çevresel ve işletme koşullarına karşı farklı duyarlılık profilleri sergilemektedir (Yeo et al., 2022). Örneğin PERC tabanlı modüller, yüksek sıcaklık koşullarında LeTID mekanizmasına karşı daha hassas davranırken, heteroeklem hücreler daha düşük sıcaklık katsayılarına sahip olmaları nedeniyle termal açıdan avantaj sunabilmektedir (Yeo et al., 2022). Bununla birlikte heteroeklem ve TOPCon teknolojileri, spektral değişimlere karşı daha yüksek hassasiyet gösterebilmektedir (Daxini and Wu, 2024).
Bifasiyel fotovoltaik modüller, yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeylerde ek enerji kazanımı sağlayabilmekte, ancak düzensiz kirlenme ve gölgelenme koşullarında uyumsuzluk kayıplarına daha açık hâle gelebilmektedir (Molto et al., 2022). Bu farklılıklar, fotovoltaik sistem tasarımında teknoloji–iklim uyumunun kritik önemini ortaya koymaktadır (Bamisile et al., 2025). Dolayısıyla teknoloji seçimi, yalnızca nominal verim değerlerine değil, uzun

vadeli kullanılabilirlik ve degradasyon risklerine dayalı olarak yapılmalıdır (Koester et al., 2022).

Tablo 1. Başlıca fotovoltaik modül türleri için teknoloji–iklim duyarlılık matrisi (geliştirilmiş, karar odaklı).

FV teknolojisi	Yüksek sıcaklık performansı	Spektral dayanıklılık	Kirlenmeye tolerans	Baskın degradasyon hassasiyetleri	Göreli bankability riski	Önerilen kurulum ortamları
Geleneksel kristalin Si (Al-BSF)	Orta düzey kayıp	Yüksek	Orta	Kademeli malzeme yaşlanması	Düşük	Ilıman, stabil işletme koşulları
PERC	Belirgin sıcaklık hassasiyeti	Orta	Orta	LeTID, erken dönem degradasyon	Orta	Ilıman iklimler; sıcak bölgelerde temkinli kullanım
TOPCon	İyileştirilmiş termal kararlılık	Orta	Orta	Uzun dönem degradasyon mekanizmaları (araştırma aşamasında)	Düşük–orta	Yüksek verim gerektiren sıcak ve ılıman iklimler
Heteroeklem (HJT)	Çok iyi yüksek sıcaklık davranışı	Görece düşük	Orta	Nem kaynaklı ara yüz etkileri	Düşük	Spektral olarak görece stabil sıcak iklimler
Bifasiyel kristalin Si	Orta	Orta	Düşük (düzensiz kirlenmede)	Uyumsuzluk artışı, saha bağımlı degradasyon	Orta–yüksek	Karla kaplı veya yüksek yansıtıcılı (kumlu) yüzeyler

9. ETKİLEŞİMLİ KAYIP MEKANİZMALARI VE ÇOK FAKTÖRLÜ PERFORMANS AZALMALARI

Gerçek saha koşullarında gözlemlenen fotovoltaik performans kayıpları, çoğu durumda tekil bir mekanizmadan değil, birden fazla kayıp faktörünün eşzamanlı ve etkileşimli etkisinden kaynaklanmaktadır (Bamisile et al., 2025). Bu durum, laboratuvar temelli performans değerlendirmeleri ile saha performansı arasındaki farkın temel nedenlerinden biri olarak kabul

edilmektedir (Koester et al., 2022). Literatürde giderek artan sayıda çalışma, doğrusal kayıp toplama yaklaşımlarının toplam enerji kaybını sistematik biçimde olduğundan düşük tahmin ettiğini ortaya koymaktadır (Yeo et al., 2022).

Örneğin, düzensiz kirlenme yalnızca optik geçirgenliği azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda modül yüzeyinde ışınımın mekânsal olarak heterojen dağılmasına neden olarak uyumsuzluk kayıplarını artırmaktadır (Tummalieh et al., 2024). Bu durum, belirli hücrelerin aşırı ısınmasına yol açarak sıcak nokta oluşumu riskini yükseltmekte ve buna bağlı olarak elektriksel ve malzeme degradasyon süreçlerini hızlandırmaktadır (Özkalay et al., 2024). Benzer biçimde, yüksek çalışma sıcaklıkları hem anlık verimi düşürmekte hem de enkapsülant ve lehim bağlantılarında yaşlanma süreçlerini hızlandırarak uzun vadeli kullanılabilirliği olumsuz etkilemektedir (Gasparin et al., 2022; Koester et al., 2022).

Nem, sıcaklık ve sistem gerilimi arasındaki etkileşimler, potansiyel kaynaklı degradasyonun ortaya çıkmasında belirleyici rol oynamaktadır (Kazem, 2024). Bu etkileşimlerin ihmal edilmesi, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde kurulu büyük ölçekli fotovoltaik santraller için yaşam boyu enerji verimi tahminlerinde ciddi hatalara yol açabilmektedir (Bamisile et al., 2025). Spektral değişimlerin sıcaklık ve geliş açısı etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği de son yıllarda yayımlanan çalışmalarda vurgulanmaktadır (Daxini and Wu, 2024).

Bu bulgular, fotovoltaik performans değerlendirmelerinde çevresel, optik, elektriksel ve degradasyon kaynaklı kayıpların bütüncül bir çerçevede ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır (Koester et al., 2022). Çok faktörlü değerlendirme yaklaşımları, yalnızca enerji üretimi tahminlerinin doğruluğunu artırmakla kalmamakta, aynı zamanda teknoloji seçimi, sistem tasarımı ve bakım stratejilerinin optimize edilmesine de katkı sağlamaktadır (Yeo et al., 2022).

Tablo 2. Gerçek İşletme Koşullarında Fotovoltaik Kullanılabilirliği ve Verimliliğini Etkileyen Başlıca Faktörler

Faktör kategorisi	Temel mekanizma	Verimlilik / kullanılabilirlik üzerindeki tipik etki	Temel kaynaklar
Sıcaklık etkileri	Bant aralığının daralması, yeniden birleşme artışı	−0,35 ila −0,45 %/°C; sıcak iklimlerde yıllık >%15 enerji kaybı	Gasparin et al., 2022; Bamisile et al., 2025
Spektral etkiler	AM1.5 referans spektrumundan sapma	Saha ve teknolojiye bağlı verim sapmaları	Daxini and Wu, 2024
Kirlenme (soiling)	Işınım geçirgenliğinin azalması, düzensiz ışınım	Yıllık %2–30 enerji kaybı	Shahzad et al., 2025
Kar ve buz örtüsü	Optik engelleme, geçici sıfır üretim	Soğuk bölgelerde mevsimsel üretim kaybı	Dahlioui et al., 2025
Uyumsuzluk ve gölgelenme	Akım sınırlaması, baypas diyotu aktivasyonu	%2–5 (düzensiz koşullarda daha yüksek)	Tummalieh et al., 2024; Özkalay et al., 2024
Degradasyon (PID, LID, LeTID)	Kaçak akımlar, kusur aktivasyonu	Önlem alınmazsa yaşam boyu >%20 kayıp	Kazem, 2024; Yeo et al., 2022

10. SONUÇLAR VE GELECEK ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Bu bölümde, fotovoltaik hücre ve modüllerin kullanılabilirliği ile verimliliğini belirleyen başlıca faktörler, gerçek saha koşulları bağlamında kapsamlı biçimde ele alınmıştır (Fouad et al., 2017). İnceleme sonuçları, fotovoltaik sistem performansının yalnızca başlangıç verimliliği ile değil, çevresel etkiler, optik ve elektriksel kayıplar ile geri döndürülemez degradasyon süreçlerinin birlikte etkisiyle belirlendiğini açıkça göstermektedir (Koester et al., 2022). Bu bağlamda kullanılabilirlik kavramının, anlık güç üretiminin ötesinde, uzun vadeli enerji üretim sürekliliği ve sistem güvenilirliğini kapsayan çok boyutlu bir ölçüt olarak ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır (Bamisile et al., 2025).

Sıcaklık, kirlenme, gölgelenme ve spektral değişimler gibi çevresel faktörler kısa vadeli performans kayıplarına neden olurken, PID, LID ve LeTID gibi degradasyon mekanizmaları sistem çıkış gücünü kalıcı biçimde azaltmaktadır (Yeo et al., 2022; Kazem, 2024). Literatürde yer alan bulgular, bu faktörlerin çoğu zaman birbirinden bağımsız çalışmadığını, aksine etkileşimli biçimde toplam performans kaybını artırdığını göstermektedir (Koester et al., 2022). Bu durum, geleneksel doğrusal kayıp modellerinin fotovoltaik sistemlerin yaşam boyu enerji üretimini doğru biçimde temsil etmekte yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır (Bamisile et al., 2025).

Gelecekteki araştırmaların, çok faktörlü etkileşimleri dikkate alan entegre performans ve degradasyon modellerinin geliştirilmesine odaklanması gerekmektedir (Yeo et al., 2022). Bu tür modellerin, yüksek çözünürlüklü çevresel veriler, gelişmiş elektriksel tanılama yöntemleri ve uzun dönemli saha ölçümleri ile desteklenmesi, yaşam boyu enerji verimi tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artıracaktır (Koester et al., 2022). Buna paralel olarak, malzeme mühendisliği, enkapsülasyon teknolojileri ve sistem düzeyi tasarım yaklaşımlarında sağlanacak ilerlemelerin, fotovoltaik sistemlerin farklı iklim koşullarındaki dayanıklılığını ve kullanılabilirliğini güçlendirmesi beklenmektedir (Bamisile et al., 2025).

Son olarak, uzun vadeli saha performans verilerinin standartlaştırılması ve paylaşımının teşvik edilmesi, yatırım risklerinin azaltılması ve güvenilir fotovoltaik teknolojilerin yaygınlaştırılması açısından kritik öneme sahiptir (Koester et al., 2022). Bu hedeflere ulaşılması, fotovoltaik sistemlerin küresel enerji dönüşümündeki rolünü daha da güçlendirecek ve sürdürülebilir enerji üretimine olan katkısını artıracaktır (Fouad et al., 2017).

REFERANSLAR

Bamisile, O., Arowolo, M., Huang, Q. (2025). The environmental factors affecting solar photovoltaic output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 195, 115073.

Fouad, M. M., Shihata, L. A., Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511.

Gasparin, F. P., Krenzinger, A., Zilles, R. (2022). Assessment on the variation of temperature coefficients of photovoltaic modules with solar irradiance. *Solar Energy*, 240, 314–323.

Cotfas, D. T., Cotfas, P. A., Kaplanis, S. (2018). Study of temperature coefficients for parameters of photovoltaic cells. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 5945602.

Shahzad, N., Chen, H., Wu, Y. (2025). Impacts of soiling on solar panel performance and effective cleaning methods: A review. *Journal of Cleaner Production*, 420, 145119.
Dahlioui, D., Benamara, M., Saadi, A. (2025). Snow impact on photovoltaic performance: Assessing the zero-output challenge in cold areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198, 115468.

Daxini, R., Wu, Y. (2024). Methods to account for the solar spectral influence on photovoltaic device performance: A review. *Energy*, 284, 129461.

Ríos-Ledesma, F., Martínez-Moreno, F., Lorenzo, E. (2026). Angular losses in photovoltaic energy estimation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 205, 116377.

Tummalieh, A., Dirnberger, D., Topic, M. (2024). Holistic analysis of mismatch losses in photovoltaic modules and arrays. *Progress in Photovoltaics*, 32(4), 456–471.

Özkalay, E., Yılmaz, S., Kurt, G. (2024). Effect of partial shading on the reliability of photovoltaic modules in the built environment. *EPJ Photovoltaics*, 15, 1.

Koester, L., Lindig, S., Buerhop-Lutz, C. (2022). Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and techno-economic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112616.

Kazem, H. A. (2024). Causes, consequences, and treatments of potential-induced degradation in solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1), 2318908.

Molto, C., Deline, C., Hacke, P. (2022). Review of potential-induced degradation in bifacial photovoltaic modules. *NREL Technical Report*.

Yeo, Z. Y., et al. (2022). Status review and future perspectives on mitigating light-induced degradation in silicon-based solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112223.

IEC 61724-1 (2021). Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. International Electrotechnical Commission.

Kriyojenik Sıkıştırmalı Hidrojen Depolama Tankının Isıl Analizi

Ozan Kütük[1]

Eylem Yılmaz Ulu [2*]

[1,2] Otomotiv Mühendisliği Bölümü / Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye
[*](eyilmaz@pau.edu.tr)

ÖZET

Yıllar geçtikçe gelişen teknolojiyle birlikte ihtiyaç duyulan enerji miktarı artmaktadır. Şu an kullanılmakta olan petrol kaynakları gün geçtikçe tükenmektedir. Her geçen gün artan enerji ve yakıt ihtiyacını karşılayabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde enerji ve yakıt ihtiyacını karşılayabilecek en güçlü aday hidrojendir. Hidrojenle çalışan yakıt pili hücreleri, günümüzde petrol ile çalışan içten yanmalı motorların aksine herhangi bir emisyon gazı doğaya salmaz. Şu an elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon pillerin hem üretilirken oluşturduğu karbon ayak izi hem de ömürleri bittikten sonra doğaya uygun olmayan geri dönüşüm şartlarından dolayı hidrojen potansiyeli en yüksek yakıt türüdür. Ancak hidrojenin güvenli ve verimli bir şekilde depolanması büyük bir sorundur. Bu çalışmada hidrojen depolama yöntemlerinden biri olan kriyojenik sıkıştırma ile depolama yapan hidrojen yakıt tankının ısıl analizi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Hidrojen, Hidrojen Depolama, Enerji, Kriyojenik, Kriyojenik Depolama

I. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtların çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji kaynaklarına ilgiyi arttırmıştır. Bu kaynaklar içerisinde potansiyeli en yüksek enerji kaynağı hidrojen enerjisidir. Hidrojen atom numarası 1 olan. Sembolü 'H' olan bir elementtir. İsim kökeni Yunancada 'su oluşturan' anlamına gelen 'hydrogenes' kelimesidir (bilimgenc.tubitak.gov.tr/periyodik-tablo/hidrojen). Enerji kaynağı olarak potansiyelinin en yüksek olmasının sebebi yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır (120 MJ/kg).(Schlapbach& Züttel,2001)

Hidrojen yakıt enerjisi olarak kullanılması için etkin ve güvenlikli depolama yöntemlerinin geliştirilmesi gerekir. Günümüze kadar yüksek basınçlı gaz depolama, sıvı hidrojen depolama, katı faz (metal hibrit) gibi depolama yöntemleri geliştirilmiştir (Bossel,2006). Her yöntemin avantaj ve dezavantajları vardır. Basınçlı gaz depolaması düşük enerji yoğunluğuna, sıvı hidrojen depolaması ise yüksek buharlaşmaya sahiptir. İki yöntemin de avantajlarını kullanıp dezavantajlarını bertaraf eden yöntem kriyojenik sıkıştırma ile hidrojen depolama yöntemidir (Ahluwailia et al., 2010). Bu yöntem yüksek basınçta düşük depolama sağlar (DOE,2020).

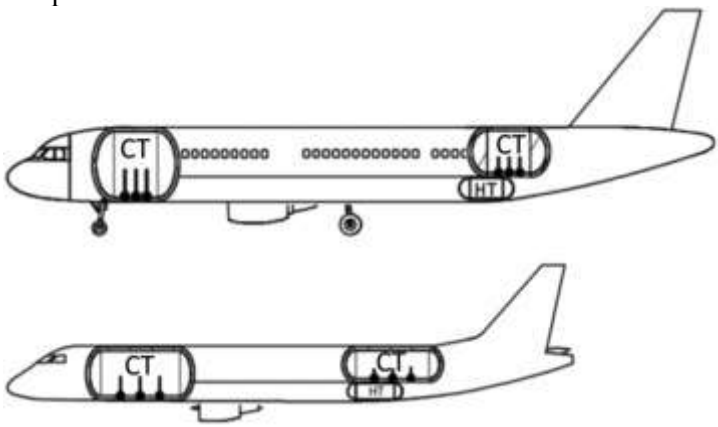
Literatürde (Ahluwalia,2010) yapılan çalışma, otomotiv uygulamaları için geliştirilen kriyojenik tank da yalıtım kalınlığının ısı sızıntısını iletim ve radyosyan dahil 5 Watt ile sınırlayacak şekilde belirlendiği ifade edilmiştir. Mevcut çalışmamızda dış yüzeyin oda sıcaklığına yakın kalması, yalıtım malzemesinin Ahluwalia'nın belirttiği yüksek performanlı ısı bariyerine hedeflerine uygun bir ısıl direnç sağladığını doğrulamaktadır.

Literatürde (Ahluwalia;2010) belirtildiği gibi dolum öncesi tank sıcaklığı ile depolanabilir hidrojen kütlesi arasında ters orantı vardır. Sıcaklık -253°C

seviyelerine düştüğünde hidrojen yoğunluğu artarak depolama kapasitesi yükselmektedir. Analiz sonuçları, tankın iç cidarlarının bu kritik sıcaklıkta tutunabildiğini göstererek sistemin yüksek yoğunluklu depolama hedefine ısıl açıdan uygun olduğunu kanıtlamaktadır.

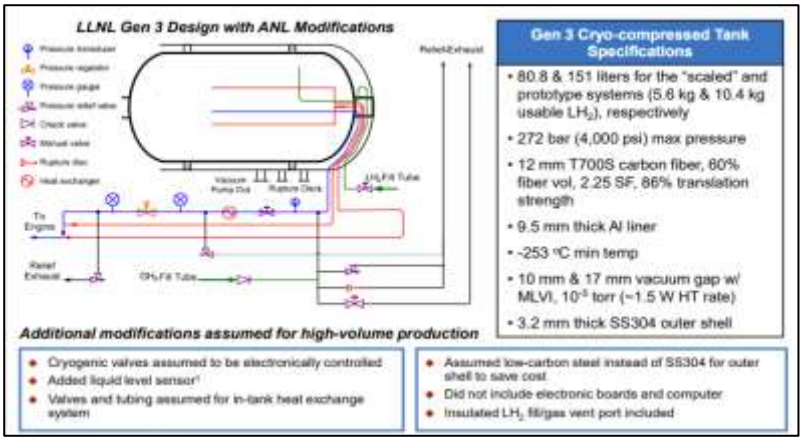
Kriyojenik tankların taşıtlara entegrasyonunda dış yüzey sıcaklığı hayati önem taşır. Uçak tasarımlarında (Prewitz, 2023), kriyojenik tankların ön ve arka bölümlere yerleştirildiği konseptler üzerinde durulmuştur.Bu tür entegrasyonlarda, tankın dış yüzeyinin aşırı soğuması çevreleyen yapısal elemanlara zarar verebilir. Çalışmamızda dış yüzey sıcaklığının pozitif değerlerde kalması, tankın (Prewitz, 2023) uçak gövdesi veya (Ahluwalia,2010) araç şasisi gibi yapısal elemanlarla temasında ısıl şok riski oluşturmayacağını göstermektedir.

Uçak tasarımında kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen tankının kullanımıyla ilgili çalışma yapılmıştır (Prewitz,2023) Daha düşük yakıt kütlesi miktarına rağmen daha uzun tanklar gerekir. Bu uçak tasarımında gövdenin ön bölümünde bir kriyojenik depolama tankı, gövdenin arka bölümünde bir kriyojenik depolama tankı bulunur.



Şekil 1: Kriyojenik hidrojen depolamalı uçak tasarımı (Prewitz,2023)

Kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen tankıyla ilgili yapılan çalışmalardan biri de ‘Otomotiv uygulamaları için kriyo-sıkıştırılmış hidrojen depolama tankı sistemlerinin teknik değerlendirmesi’(Ahluwailia,2010). Bu çalışmada tasarlanan tank sistemi 10 mm kalınlığında T700S karbon fiber kompozit ile sarılmış 9.5 mm kalınlığında bir alüminyum astardan oluşuyor.3 mm kalınlığında paslanmaz çelik dış kabuk olarak kullanılıyor. Yalıtım kalınlığı, ısıl sızmayı 1.5 Watt (sadece radyasyonla) veya toplamda 5 Watt (radyasyon + iletim) ile sınırlayacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 2: Kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen depolama tankı sistemi (Ahluwailia,2010)

Bir yakıt tankının performasını belirleyen etkenlerden birisi de ısı transferidir. Tankın iç ortamına giren ısı, hidrojenin buharlaşmasına ve kaynama kayıplarına yol açar (Strobel et al. 2002). Kriyojenik koşullarda yalıtım kalitesi bu kayıplara önemli şekilde etki eder. Bu sebeple bu tez çalışmasında kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen tankının ısıl analizi yapılmıştır. Çalışmanın amacı, etki eden ısı geçişini hesaplayarak sistemin verimliliğini görmektir.

Tank içerisinde hidrojen kütlesi arttıkça, sistemin termal kütlesinin büyüdüğü ve doygunluk sıcaklığına ulaşana kadar daha fazla ısı enerjisi depolayabildiği görülmüştür. Birim ısı sızıntısı başına düşen bekleme potansiyeli, tankın doluluk oranına (%50 ve %100) ve boyutuna bağlı değişkenlik göstermektedir. Tam dolu tanklarda, depolanan kütle arttıkça, güvenli bekleme süresinde azalan bir eğilim göstermektedir. Bu veriler yalıtım kalitesinin, uzun süreli depolama için önemli bir faktör olduğunu doğrulamaktadır.

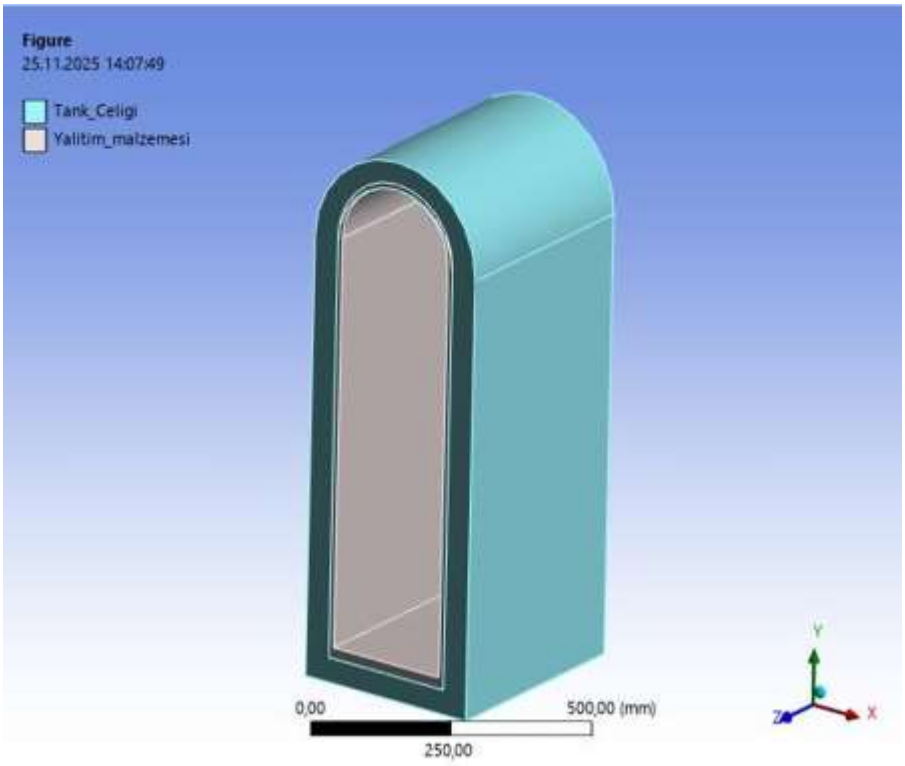
Dolum öncesi tank sıcaklığı ile depolanabilir hidrojen kütlesi arasında ters orantı vardır. Tankın başlangıç sıcaklığı 20 K seviyelerine düştüğünde hidrojen yoğunluğu artar bununla birlikte depolama kapasitesi maksimum seviyeye ulaşır. Böylece sistemin deşarjı sırasında hidrojeni gaz fazına geçirmek için harcanan ısı enerjisi ihtiyacı da artış göstermektedir. Çalışmayı yaparken kullanılan materyalleri ve yöntemleri ayrıntılı olarak açıklayın. Farklı kaynaklardan yaptığınız alıntılar referanslarda verilmeli ve kaynak gösterilmelidir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

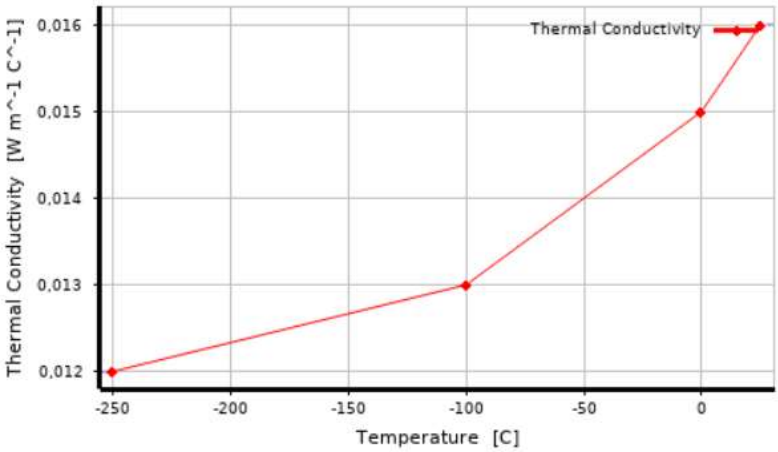
Bu çalışmada, kriyojenik sıkıştırmalı hidrojen depolama tankının ısıl performansını incelemek amacıyla sayısal analiz yöntemleri kullanılmıştır.

Geometrik modellenmesi SolidWorks yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl analizler FEM tabanlı Ansys Workbench uygulamasında Steady-State Thermal modülü kullanılarak yapılmıştır.

Analiz edilen geometri, dış taşıyıcı gövde ve iç yüzeyini kaplayan yalıtım katmanı olmak üzere iki ana katı gövdeden oluşmaktadır. Hidrojen Tankı; yapısal bütünlüğü sağlayan ve dış etmenlere temas eden çelik ana yapıdır. Hacmi yaklaşık 4.82 x 10^7 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Yalıtım katmanı; hidrojen ile doğrudan temasa geçen ısı geçişini minimize eden katmandır. Hacmi yaklaşık 9.94 x 10^6 mm^3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3: Modelin Ansys Workbench görüntüsü

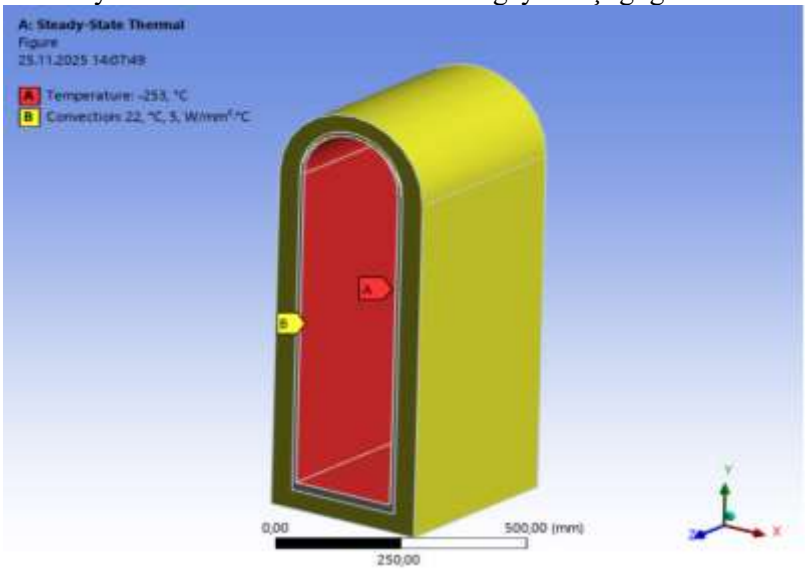


Şekil 4: Tank Çeliği Sıcaklık-Isıl iletkenlik

Kriyojenik hidrojen tankı üzerinde Ansys Workbench uygulamasında gerçekleşen kararlı hal ısıl analizinden elde edilen sayısal ve görsel sonuçlar gösterilmiştir. Bu sonuçlar tankın tam dolu olduğu ve dış ortam sıcaklığının oda koşullarında olduğu durumda gerçekleşmiştir.

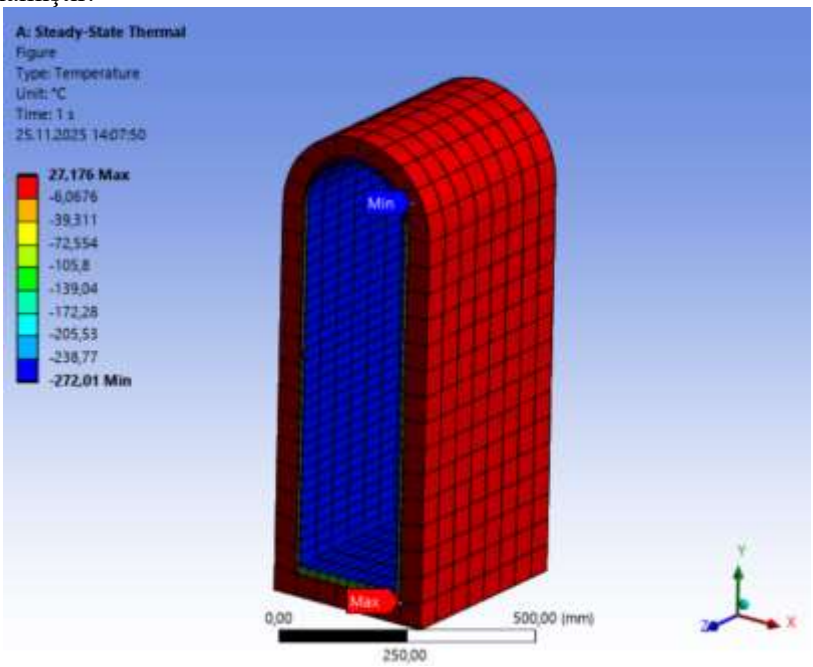
III. BULGULAR

Isıl analiz sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı görüntüleri Şekil 5'de görülmektedir. Modelin iç yüzeyine uygulanan sınır şartları ile dış ortam taşınım katsayıları neticesinde sistemin ısıl dengeye ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5: Uygulanan sıcaklık ve taşınım sınır şartları

Isıl analiz sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı incelendiğinde, tank kesiti boyunca radyal yönde belirgin bir sıcaklık gradyanı oluştuğu gözlenmiştir. Analiz sonuçları, tasarlanan yalıtım katmanının; iç ortamdaki kriyojenik hidrojen sıcaklığı -253°C dış ortam sıcaklığı 27 °C arasındaki sıcaklık farkını koruduğu gözlenmiştir. Dış gövde sıcaklığının oda sıcaklığı seviyesinde kalması, yalıtımın ısı geçişini engellemekte etkin çalıştığını kanıtlamıştır.



Şekil 6: Hidrojen tankı kesit görünüşü üzerindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 6'da görülen mavi bölgeler kriyojenik iç sıcaklığı, kırmızı bölgeler dış ortam sıcaklığını temsil etmektedir.

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sıvı hidrojen depolama koşullarında tasarlanan tankın ısıl davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, radyal yönde oluşan sıcaklık gradyanının beklentilerle uyumlu olduğunu göstermektedir. İç ortam sıcaklığı -253°C ile dış ortam sıcaklığı 22°C arasındaki ısıl fark, yalıtım katmanı tarafından sönümlenmiştir. Analiz sonucunda dış yüzey sıcaklığı ortam sıcaklığının üzerinde yaklaşık 27°C seviyesinde ölçülmesi yalıtım malzemesinin ısı akısına karşı yüksek bir direnç gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Sayısal analizlerde minimum sıcaklık değeri yaklaşık -272°C olarak raporlanmıştır. Modele uygulanan fiziksel alt sınır -253°C olmasına rağmen mutlak sıfır noktasına yakın bu değerin görülmesi, sonlu elemanlar analizinde sayısal tekillik durumu ile açıklanmaktadır. Özellikle farklı ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin temas bölgelerinde ve köşeli geometrik geçişlerdeki düğüm noktalarında oluşan matematiksel hedef değerin altına düşme durumu, lokal bir sapma olarak değerlendirilir. Tankın genel hacmindeki sıcaklık dağılımı incelendiğinde, bu sapmanın sadece belirli noktalarda lokalize olduğu ve tankın genel ısı karakteristiğini değiştirmediği görülmüştür.

Kriyojenik tank tasarımlarında önemli bir parametre olan dış gövde sıcaklığı 20°C-27°C bandında kaldığını göstermektedir. Bu durum tasarlanan yalıtım kalınlığının, dış çelik zırhı termal şoktan ve gevrek kırılma riskinden korumak için yeterli performans sağladığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

[1] Ahluwalia, R.K., Hua, T.Q., Peng, J.K., Lasher, S., McKenney, K., Sinha, J., 2010

[2] "Cryo-Compressed Hydrogen Storage for Automotive Applications"

[3] Argonne National Laboratory Report, ANL/ESD-12/

[4] Departman of Energy (DOE),2020. "Targets for Onboard Hydrogen Storage for Automotive"

[5] Bossel, U., 2006. "Does a Hydrogen Economy Make Sense?". Proceedings of the IEEE, 94(10), 1826–1837.

[6] Schlapbach, L., Züttel, A., 2001. "Hydrogen – storage materials for mobile applications''.Nature,414 353-358.

[7] Strobel, R., Garche, J., Moseley, P.T., Jörissen, L., Wolf, G., 2002.

[8] "Hydrogen storage by carbon materials''.Journal of Power Sources,112,390-401.

[9] Prewitz,M.,Schwärzer,J.,Bardenhagen,A.,2023.

[10] "Potential analysis of hydrogen storage systems in aircraft design".

[11] International Journal of Hydrogen Energy, 48(65), 25538–25548.