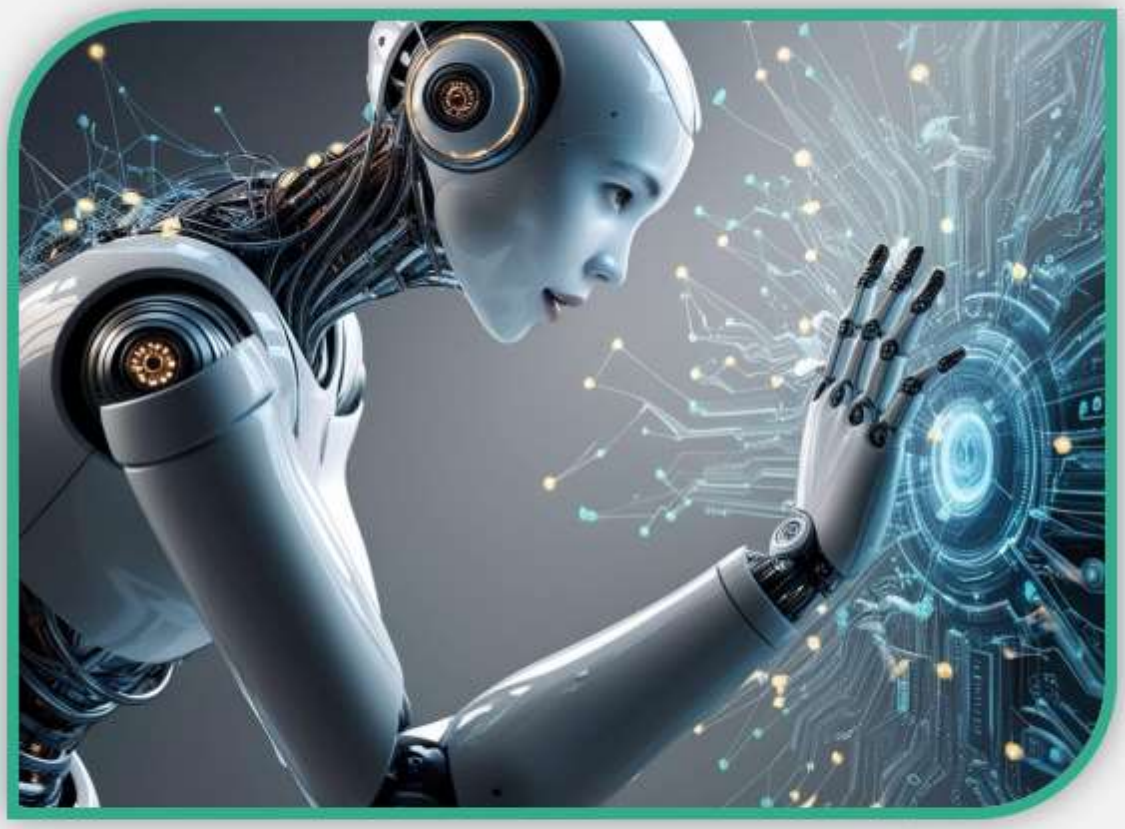
MÜHENDİSLİKTE YENİ KAVRAMLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE YENİ KAVRAMLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR

Editör
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Mühendislikte Yeni Kavramlar ve İleri Çalışmalar
Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design
Basım Tarihi: Ekim 2025
Yayıncı Sertifika Numarası: 72273
ISBN: 978-625-5794-55-0

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com
allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm **10**
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Biyoseramikler: Zirkonya
Büşra GÜNHAN

2. Bölüm **24**
Tiroid Hastalıklarının Tanı ve Yönetiminde Yapay Zekâ Uygulamaları
Cüneyt ÖZDEMİR

3. Bölüm **43**
Büyük Dil Modelleri:Temeller, Uygulamalar ve Gelecek Yönelimler
Cüneyt ÖZDEMİR

4. Bölüm **66**
Görüş Hattı Dışı Yayılma (NLOS) Teknolojileri
Emin GÜNEY

5. Bölüm **76**
Video Kameraya Dayalı Algılama Teknolojileri
Emin GÜNEY

6. Bölüm **86**
Transfer Fonksiyonu Tabanlı JAYA Algoritması ile Öznitelik Seçimi
Gürcan YAVUZ

7. Bölüm **97**
Uzay Aracı Seyrüseferinde Konum ve Yönelim Belirleme Sensörleri
Harun ÇELİK, Mahi Bilge YILMAZ

8. Bölüm **116**
Buji Ateşlemeli Motorlarda Termal Bariyer Kaplamaların HC Emisyonlarına Etkisi: Deneysel ve Teorik Bir Yaklaşım
Bahtiyar ÇETİN, İdris CESUR

9. Bölüm **135**

Alanya-Taşkent Yolu (Km: 61+300-61+530) Heyelan Oluşumunun Ön Analizi: Nedenleri ve Etkileri

Mehmet ÖZÇELİK

10. Bölüm **152**

Doyduk Barajı (Kozaklı/Nevşehir) Doğal Malzeme Ocaklarının Değerlendirilmesi

Mehmet ÖZÇELİK

11. Bölüm **173**

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Çevresel Sürdürülebilirliği

Necla TEKTAŞ, Mehmet TEKTAŞ

12. Bölüm **197**

Beyin Tümörü Görüntülerinin Derin Öğrenme Temelli Transfer Öğrenme Modelleriyle Sınıflandırılması

Halil İbrahim KİRAZ, Selim SÜRÜCÜ, Esra GÜNEY

13. Bölüm **206**

Atıksu Arıtma Tesisinde Mikroplastikler, Giderimleri ve Ekosistem Üzerindeki Etkileri

Senar AYDIN, Mehmet Emin AYDIN

14. Bölüm **237**

Gıda Kurutma İşlemlerinde Ürün Özelliklerinde Meydana Gelen Değişiklikler

Zehra YILDIZ

15. Bölüm **252**

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri İçin Yüzey Kaplama İşlemi Uygulanmış Metalik Bipolar Plakalar

Murat BÖREKÇİ, Ayşegül AŞKIN

16. Bölüm **283**

Killerin Fiziksel, Kimyasal ve Yapısal Özelliklerinin Farklı Karakterizasyon Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi

Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ

17. Bölüm **298**

XRF, FTIR, XRD, Termal Analiz ve Yüzey Alanı Ölçümleri İle Bentonitlerin Karakterizasyonu

Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ

18. Bölüm **319**

Çalışma Ortamı Güvenliğinin Sağlanmasında Mühendislik Tasarımı ve Önleyici Stratejiler

Fatih ULUKAYA, Mustafa TATLICAN

19. Bölüm **338**

Doğal Elyaf İçeren Kompozitler

İlyas KARTAL, Gamze BAYGELDİ

20. Bölüm **358**

Eğitim Alanında Yapay Sinir Ağları Kullanılan Çalışmalar

Gizen MUTLU, Nisa VURAN SARI

21. Bölüm **378**

Tahminden Eyleme: Enerji Yönetim Sistemlerinde Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Uygulamaları

Gizen MUTLU

22. Bölüm **400**

Polimer Kompozitler, Üretim Teknikleri Ve Savunma Sanayisindeki Önemi

Gonca DÜZKALE SÖZBİR, İbrahim BEKTAŞ

23. Bölüm **422**

Üretim ve İnceleme Faaliyetlerinin Ayrık Zamanlı, İnceleme Süresinin Stoksuzluğu Elimine Süresinden Büyük Olduğu ve Stoksuzluğa İzin Veren Bir Ekonomik Üretim Miktarı Modeli

Abdullah EROĞLU, Harun SULAK

24. Bölüm **438**

Boşanmayı Etkileyen En Önemli Faktörlerin Gri Kurt Optimizasyonu ile Belirlenmesi

Hatem DUMLU, Gürcan YAVUZ, Pınar ÖZEN

25. Bölüm **453**

Deprem Sonuçları Açısından Ahşap ve Diğer Yapı Sistemlerinin Karşılaştırılması

İbrahim BEKTAŞ, Gonca DÜZKALE SÖZBİR

26. Bölüm **470**

Yapı Tuğlası Üretim Sürecinde Uygulanacak Test ve Analiz Teknilkleri

İsmail DEMİR

27. Bölüm **493**

Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Farkındalığın Artmasında Eğitimin Rolü ve Önemi

Necla TEKTAŞ, Mehmet TEKTAŞ

28. Bölüm **522**

Hazır Giyim Sektöründe Yapay Zekânın Bugünü ve Geleceğe Etkisi

Nuray ÖZ CEVİZ

29. Bölüm **540**

Osmaniye İlinin Yayla Turizmi Potansiyelinin SWOT Analizi ile Değerlendirilmesi

Nuri ERDEM

30. Bölüm **564**
Girit Adası ve Civarının Jeofizik (Depremsellik ve Manyetik) Durumu
Sercan KAYIN, M. Nuri DOLMAZ

31. Bölüm **578**
Geniş Sayı Aralığını Garanti Eden İlkel Polinom Temelli Sözde Rasgele Sayı Üreteci Tasarımı
Serkan DERELİ

32. Bölüm **592**
Arıtma Çamurları
Baybars Ali FİL, Sermin GÜNASLAN

33. Bölüm **608**
Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi
Sezgin YAŞA, Mustafa TEKE

34. Bölüm **624**
Graflar ve Temel Kavramlar
Yıldıray YİĞİT, Murat KARABATAK

35. Bölüm **646**
Fırçasız Doğru Akım Motorunun Pozisyon Hata Analizi
Muhammet ATEŞ, Muzaffer ATEŞ

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Biyoseramikler: Zirkonya

Büşra GÜNHAN[1]

1- Dr. Öğr. Üyesi; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. busra.gunhan@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-0938-8473.

ÖZET

Bu bölümde önemli bir biyoseramik malzeme olan zirkonya, fonksiyonel derecelendirilmiş biyoseramik uygulamalarındaki kullanımı açısından ele alınmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler/FDM (ingilizce: *functionally graded materials*-FGM), kademelendirilmiş, farklı işlevleri yerine getiren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. İlk olarak 1980'li yıllarda ortaya atılan bu konsept (termal bariyer kaplamalar), günümüzde geleneksel malzemelere nazaran birçok farklı tasarım prensibinin tek bir potada harmanlanmasını gerektiren biyoseramik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Okuyucuya FDM olarak kullanılan zirkonya uygulamaları özelinde teorik ve pratik bilgi sunulması amaçlanmıştır. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan FDM örnekleri, ağırlıklı olarak ortopedik ve dental protez/implant ile doku iskelesi uygulamaları özelinde listelenmektedir. Özellikle yitriya ile yarı kararlı hale getirilmiş tetragonal zirkonya polimorfu (Y-TZP), biyoinert karakteri dolayısıyla farklı özellik kombinasyonlarının oluşturulabilmesi için alümina (Al_2O_3), beta trikalsiyum fosfat (ß-TCP), titanyum gibi çeşitli malzemelerle kompozisyon derecelendirme yapılarak FDM formuna getirilmektedir. Spark plazma sinterleme (SPS), kimyasal buhar biriktirme/kimyasal buhar infiltrasyon (CVD/CVI), termal sprey, elektroforetik biriktirme, lazer biriktirme, direk inkjet yazdırma (DIP) gibi yenilikçi üretim teknolojilerinin kullanıldığı zirkonya tabanlı FDM uygulamaları biyomedikal malzemeler için umut vadedici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu bağlamda öncelikle fonksiyonel derecelendirilmiş biyoseramikler üzerinde durulacak, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) konsepti detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Sonrasında FDM biyoseramik türleri üzerinde durularak, malzeme özellikleri ve üretim tekniklerine/teknolojilerine değinilecek; son olarak güncel literatürden seçilen yenilikçi çalışmalar paylaşılacaktır.

Anahtar Kelimeler – Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme, Zirkonya, Biyoseramik, Malzeme Bilimi, Tasarım.

GİRİŞ

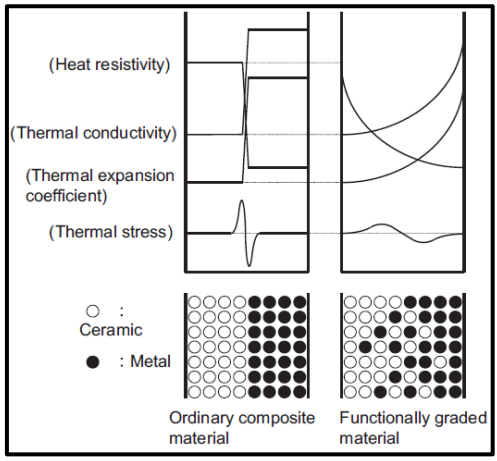
Belirli bir performans ve işlev için tasarlanmış ileri mühendislik malzemesi olarak tanımlanan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) kavramında iki temel sözcük ön plana çıkmaktadır: *(i)* fonksiyonel ve *(ii)* derecelendirilmiş (Naebe & Shirvanimoghaddam, 2016; Shinohara, 2013). "*Fonksiyonel*" nitelemesi ile ısıl, mekanik, kimyasal kompozisyon vb. malzeme özellikleri bazında sağlanacak performans beklentisine gönderme yapılırken, "*derecelendirilmiş*" betimlemesi ise bahsi geçen amacın özdeş olmayan, kademeli veya süreğen bir şekilde değişen bir yapı ile sağlanacağı ifade edilmektedir. Kavramının kökenini teşkil eden ilk uygulama örneklerine

bakıldığında metalik kompozisyondan seramik kompozisyona sağlanan geçiş ile tek parça halindeki bir malzemenin ön ve arka yüzeylerindeki ısıl genleşme katsayısının değiştirildiği, diğer bir deyişle karma bir konsept oluşturulmaya çalışıldığı görülmektedir (Shinohara, 2013). Bu noktada FDM'lerin bir diğer karma konsept temsilcisi kompozit malzemeler ile farkını ortaya koymak iki malzeme grubu arasındaki farkları netleştirmek açısından faydalı olacaktır:

- **Kompozit Malzeme:** En az iki veya daha fazla farklı malzemenin birleştirilmesiyle her iki malzemenin tek başına sağlayamadıkları özellik kombinasyonlarının elde edildiği malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Chawla, bir malzemenin kompozit malzeme olarak tanımlanabilmesi için şu üç özelliği taşıması gerektiğinden bahseder: *(i)* bir süreç neticesinde üretilmiş olması (bazı doğal kompozitler hariç), *(ii)* fiziksel ve/veya kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla malzemenin kendilerini ayıracak bir *arayüz* içerecek şekilde düzenlenmesi veya dağıtılması ile oluşturulmuş olması ve *(iii)* bileşenlerden herhangi birinin tek başına sahip olmadığı özellikler sergilemesi (Chawla, 2020).

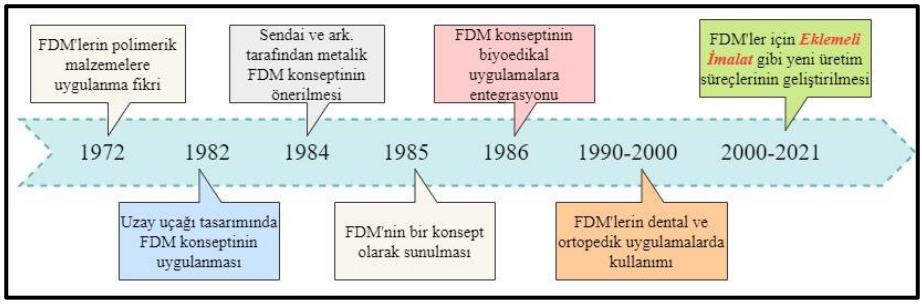
- **FDM:** Malzeme özelliklerinin *yapısal derecelendirme* ile belirli işlevleri yerine getirecek şekilde özelleştirildiği malzeme grubunu temsil eder.

Bu açıdan bakıldığında FDM'ler dereceli yapılarıyla sınıflandırılan ve karakterize edilen bir kompozit malzeme türü olarak ele alınabilir. FDM'lerde kompozit malzemelerin aksine net bir arayüz yerine *kademelendirilmiş bir arayüz* bulunmaktadır (Besisa & Ewais, 2016; Shinohara, 2013). Burada bir parantez açarak kompozit malzeme ile FDM'ler arasındaki bileşim ve özellik farkına değinmek faydalı olacaktır. Şekil 1'de görülen kompozit malzeme, metal ve seramik bileşenler arasında belirgin bir arayüz içerirken, FDM'de böyle bir arayüz bulunmamaktadır. Buna bağlı olarak ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik ve ısıl direnç gibi özelliklerin malzeme içerisindeki dağılımı farklılık göstermektedir. Kompozit malzemenin arayüzeyindeki ısıl genleşme katsayısı farkı, yüksek sıcaklıklarda iç yapıda ısıl gerilmelere neden olarak arayüzey hasarına yol açmaktadır. Derecelendirme ile arayüzeyin kaldırılması neticesinde ısıl gerilme yaklaşık %30 oranında azaltılabilmekte ve olası arayüzey hasarının önüne geçilebilmektedir.



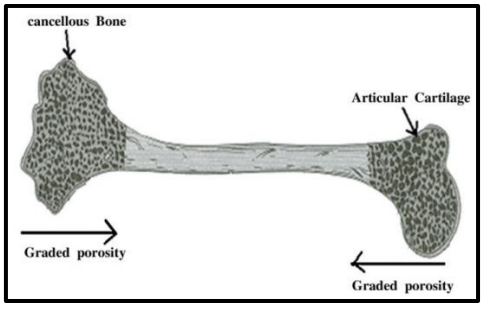
Şekil 1: Kompozit malzeme *(sol)* ve FDM'de *(sağ)* malzeme yapısı ve özelliklerinin değişimi (Shinohara, 2013)

Tarihsel gelişimine bakacak olursak bambu gibi doğal FDM'lerin dekoratif ve yapısal amaçlarla binlerce yıldır kullanıldığını görebiliriz (Şekil 2). Fakat ileri teknoloji malzeme anlamında bu alanda gerçekleştirilen ilk girişimlerden biri Bever ve Duwez'in derecelendirilmiş kompozit malzemelerin kompozisyon ve yapısal karakteristiklerini inceledikleri ve 1972 senesine tarihlendirilen çalışmalarıdır (Bever & Duwez, 1972). Bu çalışmayı takiben 1984'te Japonya Bilim ve Teknoloji Ajansı (*ingilizce:* Agency of Science and Technology-STA) tarafından tasarlanan "uzay uçağında" kullanılmak üzere ilk FDM (termal bariyer malzeme) önerilmiş ve "fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme" terimi literatüre girmiştir (Kawasaki & Watanabe, 1997; Koizumi, 1997). Esasen bir jet uçağı ve roket karması olan bu "uzay uçağının" dünya-uzay arasında gerçekleştirmesi öngörülen gidiş-dönüşlerinde burun gibi bazı özel kısımlarının maruz kalacağı yüksek sıcaklık farklarına (~1500-1800ºC) dayanıklı bir malzeme geliştirilmesi hedeflenmiştir (Shinohara, 2013). 1987-1991 yılları arasında Japon bilim insanlarının çabalarıyla ivme kazanan araştırmalar neticesinde FDM'ler 1992 senesinde Japonya'da en ileri ilk on teknolojiden biri olarak değerlendirilmiştir (Besisa & Ewais, 2016). Bu kabulün ardından günümüze uzanan süreçte FDM'ler çeşitlenmiş ve uygulama alanları genişlemiştir. Güncel literatür, havacılık ve uzay, savunma, otomotiv, optik, nükleer enerji, elektronik, enerji dönüşüm ve biyomalzeme olmak üzere oldukça geniş bir skalada incelenen ileri teknoloji malzeme örnekleri sunmaktadır. Şekil 2'de yukarıda bahsedilen detaylar doğrultusunda FDM konseptinin tarihsel gelişimi özetlenmiştir.



Şekil 2: FDM'lerin tarihsel gelişimi (Dubey vd., 2022).

FDM'lerin biyomalzeme alanında kullanılması, vücut dokularında gözlenen doğal heterojenliği taklit edecek malzeme tasarımlarına duyulan ihtiyaç ile ortaya çıkmıştır (Lowen & Leach, 2020). Aslında insan vücudundaki doku ve organların çoğu birer doğal FDM olarak değerlendirilebilir. Örneğin Şekil 3'te görülen kemik dokusu, gözenek yoğunluğu ve dağılımının değişkenlik gösterdiği süngerimsi kemik dokusu içermektedir. Radyal doğrultuda kortikal kemikten (yoğun dış katman) kansellöz kemiğe (süngerimsi doku) geçiş gözlenirken, dikey doğrultuda mekanik gerilimlere direnç gösteren hizalanmış kolajen liflerinden oluşmaktadır (Lowen & Leach, 2020; Pandey vd., 2021).



Şekil 3: İnsan kemiğine ait FDM yapı (Pandey vd., 2021).

FDM'ler, *(i)* gözenek derecelendirilmiş, *(ii)* kompozisyon derecelendirilmiş ve *(iii)* mikroyapı derecelendirilmiş FDM olmak üzere üç temel gruba ayrılmaktadır (Besisa & Ewais, 2016). Takip eden başlıklarda gözenek/kompozisyon/mikroyapı özelinde derecelendirme ile çeşitli işlevler kazandırılmış biyoseramik örnekleri incelenecektir.

BİYOMALZEME OLARAK FDM'LER

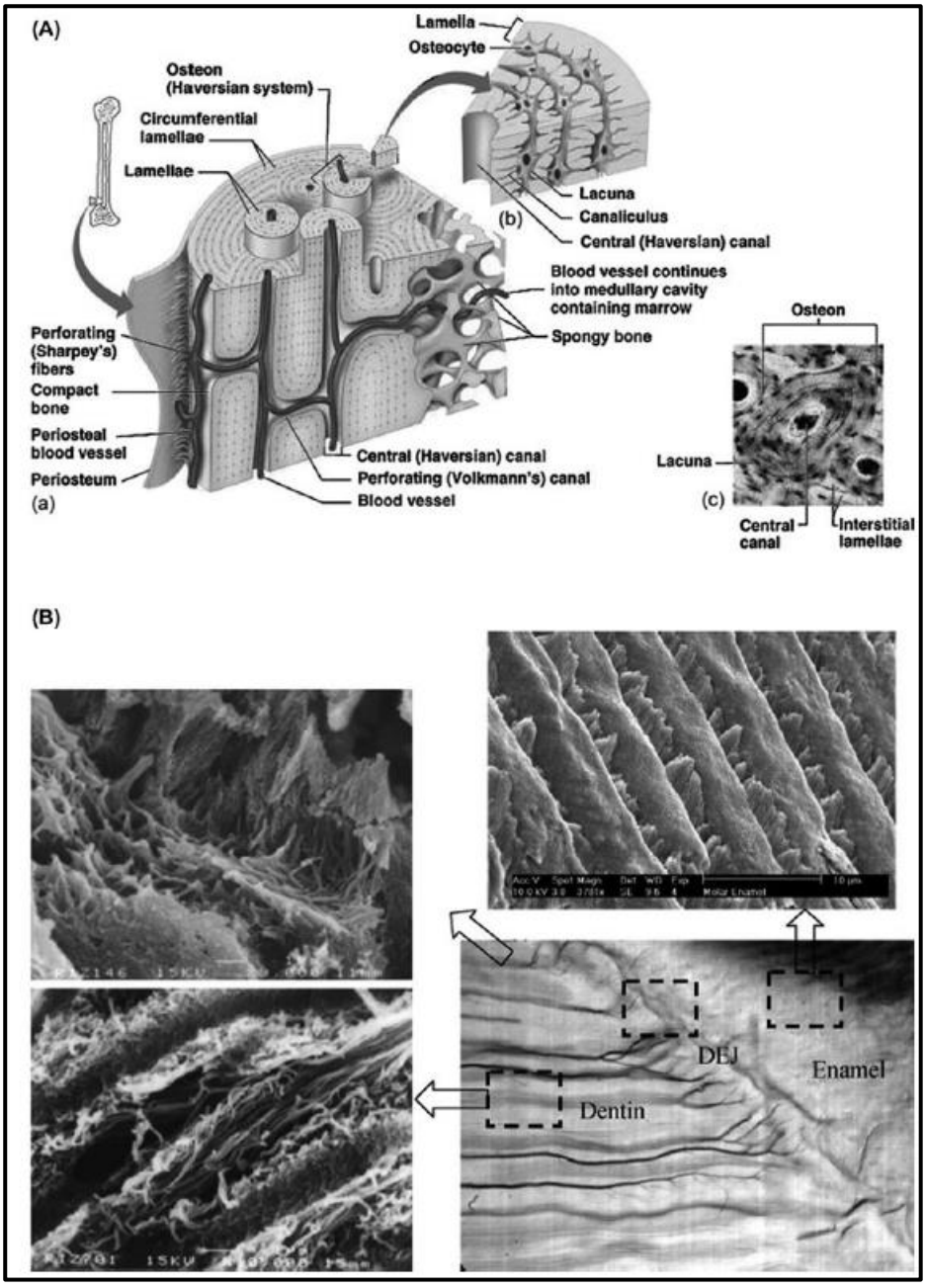
Biyomedikal uygulamalarda kullanılan FDM örnekleri, ağırlıklı olarak ortopedik ve dental protez/implant ile doku iskelesi uygulamaları özelinde listelenmektedir. Tablo 1'de uygulama alanı bazında çeşitli biyoseramik FDM örnekleri verilmiştir.

Tablo 1: Biyomalzeme olarak kullanılan FDM örnekleri

Bileşen Örnekleri	**Kullanılan Kompozisyon Örnekleri**
Kalça protezi ve implantları	$Ca_5(PO_4)(OH)$ (HA)
Derecelendirilmiş kaplamalar	Al_2O_3
Dental implantlar	Al_2O_3/ZrO_2
Doğa ilhamlı doku mühendisliği iskeleleri	HA/Al_2O_3/ZrO_2; Al_2O_3/SiC/ZrO_2
	HA/Y-TZP
Kalsiyum fosfat tabanlı gözenekli derecelendirilmiş iskeleler	Al_2O_3/cam; ZrO_2/cam; ZrO_2/porselen
İlaç salım sistemleri	

Kaynak: (Petit vd., 2018)

Çok katmanlı (*ingilizce:* multi-layered) ve derecelendirilmiş (*ingilizce*: graded) malzemelerin insan vücudu açısından kritik öneme sahip olduğu değerlendirilir. Epidermis, dermis ve bunun altında bulunan hipodermis tabakalarından müteşekkil olan ve her bir katmanın farklı mekanik özellikler sergilediği insan derisi, karmaşık, çok katmanlı sistemlere güzel bir örnektir. Benzer şekilde giriş bölümünde kısaca ele alındığı üzere kemik doğal bir FDM'dir. Burada kemik için bir antrparantez açıp FDM yapısının detaylıca incelenmesi faydalı olacaktır: Hem organik [tip-I kollajen] hem de inorganik [hidroksiapatit ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)] fazları içeren kemik dokusu mineralize hücre dışı matriksten oluşur. Şekil 4(a)'da görüldüğü üzere kemik, yoğun ve sert bir dış katmandan gözenekli bir iç yapıya geçiş sergilemektedir. Bu derecelendirme, gerilmelerin belirli bir bölgede yoğunlaşmasını engelleyerek mekanik dayanım optimizasyonu sağlamaktadır. Kemik haricinde diş de doğal FDM'lerin önemli örneklerinden biridir. Şekil 4(b)'de görüldüğü üzere mine, dentin ve mine-dentin birleşim bölgelerinden oluşan derecelendirilmiş yapı dişe olağanüstü mekanik özellikler kazandırmaktadır. Mine tabakasının diğer dişlerle ve yabancı cisimlerle temas halinde olması dolayısıyla karşılaşılacak yüksek gerilmelere dirençli olması beklenir. Kemik ve dişin tabakalarına ait fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4: *(a)* Kemiğin şematik kesit görüntüsü ve *(b)* doğal dişin mikroyapısı (Petit vd., 2018)

Tablo 2: Kemik ve diş kokularına ait fiziksel ve mekanik özellikler

	Young Modülü (GPa)	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Basma Dayanımı (MPa)**	**Kırılma Tokluğu (MPa$\sqrt{m}$)**
Kortikal Kemik (L)	17	80-151	170-193	2-12
Kortikal Kemik (T)	6-13	51-56	133	2-12
Kansellöz Kemik	0.1-5	10	7-10	0.1
Mine	60-100	~11-42	~62	0.7-4
Dentin	13-45	~48-62	~194	1-2

Kaynak: (Petit vd., 2018)

Biyomedikal uygulamalarda kullanılan seramikler, *biyoinert* ve *biyoaktif* seramik olmak üzere iki farklı kategoride değerlendirilmektedir. Bu kategoriler haricinde vücut tarafından emilebilen ve *biyoçözünür* olarak adlandırılan bir alt grup da bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalar, canlı dokuya yerleştirilen malzemenin bu dokuda oluşturduğu etki üzerinden geliştirilmiş tanımlamalardır (Hench, 2013):

(i) Malzeme toksik ise, malzemenin yerleştirildiği çevre doku ölmektedir.

(ii) Malzeme *biyoinert* ise değişik kalınlıklarda fibröz doku oluşumu gözlenmektedir.

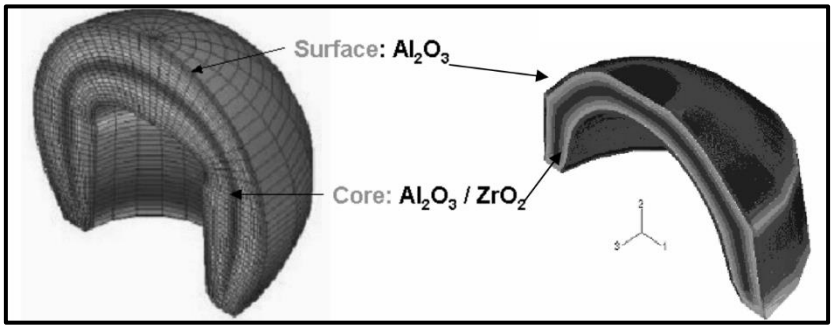
(iii) Malzeme *biyoaktif* ise doku-implant malzemesi arayüzeyinde bağlanma gerçekleştiği gözlenmektedir.

(iv) Malzeme *biyoçözünür* özellikteyse çevre doku implant malzemesinin yerini almaktadır.

Al_2O_3 ve yitriya ile yarı kararlı hale getirilmiş tetragonal zirkonya polimorfu (Y-TZP), yüksek dayanımı, sertliği ve aşınma direnci gibi özellikleriyle ön plana çıkarken, inert karakterleri dolayısıyla implant olarak kullanıldıkları çevre doku ile neredeyse hiç etkileşime girmezler ve ağırlıklı olarak oprtopedik kalça protezleri ve dental implant gibi yük taşıyan uygulamalarda tercih edilirler (Petit vd., 2018; Raucci vd., 2016; Zhang, 2012). Bu biyoseramikler, farklı özellik kombinasyonlarının oluşturulabilmesi için kompozisyon derecelendirme yapılarak FDM formuna getirilirler. Takip eden başlıkta zirkonya tabanlı FDM uygulamaları güncel literatür üzerinden ele alınacaktır.

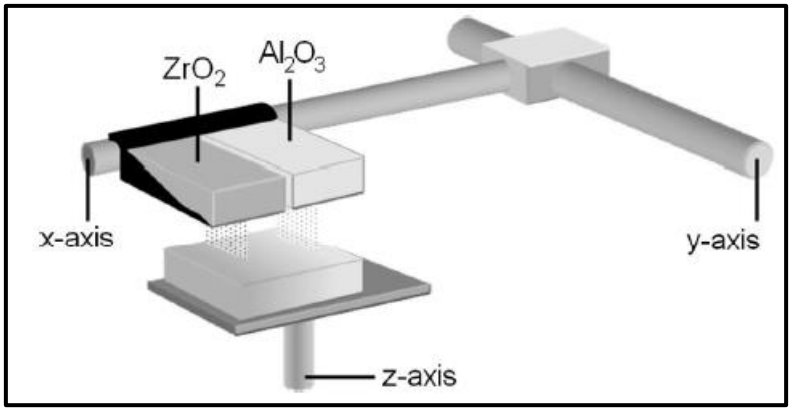
Zirkonya Tabanlı Biyoseramik FDM'ler

Yalnızca inert faz içeren ilk derecelendirilmiş seramik uygulaması, Anné ve ark. tarafından geliştirilen karmaşık yapılı fonksiyonel derecelendirilmiş Al_2O_3/3Y-TZP tabanlı kalça implantıdır (Anné, Vanmeensel, Vleugels, & Van der Biest, 2006). Bu örnekte uygulanan kompozisyon derecelendirme ile homojen Al_2O_3/ZrO_2 çekirdeği, orta kademede sürekli derecelendirilecek şekilde tasarlanmıştır. Burada temel amaç, sinterleme sonrasında elverişli ve kontrollü termal stres sergileyen, aşınma direnci yüksek, dış (kabuk) Al_2O_3 katman elde etmektir. Derecelendirme elektroforetik biriktirme ile sağlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Al_2O_3/ZrO_2 FDM'nin şematik gösterimi (Anné, Vanmeensel, Vleugels, & der Biest, 2006)

Bu çalışmayı takiben Ginter ve ark. Şekil 6'da görülen direkt inkjet yazdırma (*ingilizce:* direct inkjet printing-DIP) teknolojisi ile Al_2O_3/3Y-TZP için derecelendirilmiş bir yapı elde etmeyi başarmışlardır (Gingter vd., 2015).



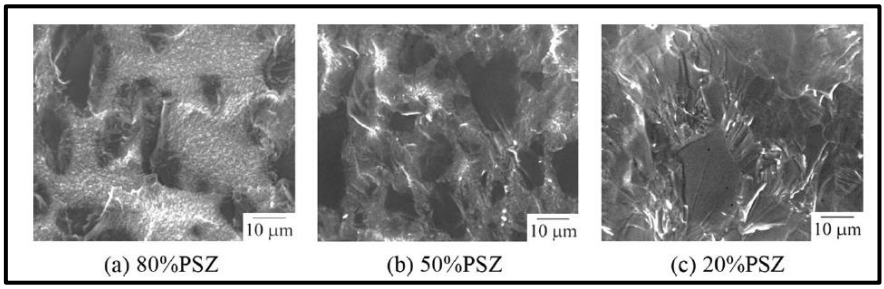
Şekil 6: DIP teknolojisi ile FDM oluşumu (Gingter vd., 2015)

Afzal vd. tarafından gerçekleştirilen farklı bir çalışmada ise yüksek tokluk ve biyouyumluluk sergileyen hidroksiapatit (HAp)-alümina-zirkonya (YSZ) FDM'ler geliştirilmiştir (Afzal vd., 2012). HAp ve YSZ'nin Al_2O_3 merkezli bir geçiş tabakasıyla spark plazma sinterleme ile derecelendirildiği FDM, gerçekleştirilen in-vitro testlerde doku ile oldukça iyi bir bağlanma (adhezyon) ve büyüme sergilemiştir.

Guo ve ark.'nın gerçekleştirdiği çalışmada ise HA/Y-TZP seramikler SPS ile üretilmiş, HA'in tek başına sergilediğinden oldukça yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir (Guo vd., 2003).

Buraya kadar özetlenen örneklerde SPS, DIP gibi yenilikçi üretim teknolojilerinin kullanımı dikkat çekmektedir. Ayrıca biyomalzeme konseptinde sıkça başvurulan bir optimizasyon tekniği olan kaplamalar da sıklıkla tercih edilmektedir.

Önemli bir diğer uygulama Takahashi vd. tarafından dental implant olarak tasarlanan Ti/ZrO_2 FDM'lerdir (Takahashi, 1993). Yüksek biyouyumluluk, renk, dayanım ve kırılma tokluğu gibi avantajları dolayısıyla potansiyel bir implant malzemesi olarak değerlendirilmiştir (Depprich vd., 2008). Zirkonya'nın neden olabileceği inflamatuar reaksiyon ve kemik rezorpsiyonu riski, titanyuma nazaran çok daha düşüktür. Şekil 7'deki mikroyapı görüntülerinden anlaşıldığı üzere PSZ ve Ti fazlarında taneler arası kırılmalar oluştuğu gözlenmiştir. Buradan hareketle yapıdaki Ti katkısı için optimum bir sınır değer belirlenmiştir.



Şekil 7: PSZ-Ti FDM'lerin kırık yüzey SEM görüntüleri (FUJII vd., 2010)

SONUÇ

Zirkonya (PSZ/Y-TZP), diş benzeri rengi, yüksek biyouyumluluğu, aşınma direnci ve kırılma tokluğu gibi özellikleri dolayısıyla biyomedikal implantlar için önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. FDM konsepti, insan vücudu ile doğrudan örtüşen fonksiyonel tasarımıyla biyomedikal uygulamalarda tercih edilen zirkonya tabanlı biyoseramik kompozitler için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu alandaki dental, ortopedik ve doku iskelesi bazlı uygulama çeşitliliği arttıkça ve yeni üretim teknolojileri ile desteklendikçe hastaların yaşam kalitesini arttırma potansiyeli yüksek, sürdürülebilir malzeme uygulamalarının kullanımı yaygınlaşacaktır.

REFERANSLAR

Afzal, M. A. F., Kesarwani, P., Reddy, K. M., Kalmodia, S., Basu, B., & Balani, K. (2012). Functionally graded hydroxyapatite-alumina-zirconia biocomposite: Synergy of toughness and biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C*, *32*(5), 1164-1173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.03.003

Anné, G., Vanmeensel, K., Vleugels, J., & der Biest, O. (2006). Electrophoretic Deposition as a Novel Near Net Shaping Technique for Functionally Graded Biomaterials. *Electrophoretic Deposition: Fundamentals and Applications II*, *314*, 213-218. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.314.213

Anné, G., Vanmeensel, K., Vleugels, J., & Van der Biest, O. (2006). Electrophoretic Deposition as a Novel Near Net Shaping Technique for Functionally Graded Biomaterials. *Key Engineering Materials*, *314*, 213-218. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.314.213

Besisa, D. H. A., & Ewais, E. M. M. (2016). Advances in Functionally Graded Ceramics – Processing, Sintering Properties and Applications. Içinde *Advances in Functionally Graded Materials and Structures*. InTech. https://doi.org/10.5772/62612

Bever, M. B., & Duwez, P. E. (1972). Gradients in composite materials. *Materials Science and Engineering*, *10*, 1-8. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5416(72)90059-6

Chawla, K. K. (2020). *Composite Materials:science and engineering*. SPRINGER NATURE.

Depprich, R., Zipprich, H., Ommerborn, M., Naujoks, C., Wiesmann, H.-P., Kiattavorncharoen, S., Lauer, H.-C., Meyer, U., Kübler, N. R., & Handschel, J.

(2008). Osseointegration of zirconia implants compared with titanium: an in vivo study. *Head & face medicine*, *4*(1), 30.

Dubey, A., Jaiswal, S., & Lahiri, D. (2022). Promises of Functionally Graded Material in Bone Regeneration: Current Trends, Properties, and Challenges. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *8*(3), 1001-1027. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.1c01416

FUJII, T., TOHGO, K., ARAKI, H., WAKAZONO, K., ISHIKURA, M., & SHIMAMURA, Y. (2010). Fabrication and Strength Evaluation of Biocompatible Ceramic-Metal Composite Materials. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, *4*(11), 1699-1710. https://doi.org/10.1299/jmmp.4.1699

Gingter, P., Wätjen, A. M., Kramer, M., & Telle, R. (2015). Functionally graded ceramic structures by direct thermal inkjet printing. *Journal of Ceramic Science and Technology*, *6*(2), 119-124. https://doi.org/10.4416/JCST2014-00033

Guo, H., Khor, K. A., Boey, Y. C., & Miao, X. (2003). Laminated and functionally graded hydroxyapatite/yttria stabilized tetragonal zirconia composites fabricated by spark plasma sintering. *Biomaterials*, *24*(4), 667-675. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00381-2

Hench, L. L. (2013). *An Introduction to Bioceramics* (2nd bs). IMPERIAL COLLEGE PRESS. https://doi.org/10.1142/p884

Kawasaki, A., & Watanabe, R. (1997). Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials. *Ceramics International*, *23*(1), 73-83. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0272-8842(95)00143-3

Koizumi, M. (1997). FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, *28*(1), 1-4. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9

Lowen, J. M., & Leach, J. K. (2020). Functionally Graded Biomaterials for Use as Model Systems and Replacement Tissues. *Advanced Functional Materials*, *30*(44), 1909089. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.201909089

Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied Materials Today*, *5*, 223-245. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001

Pandey, P. M., Rathee, S., Srivastava, M., & Jain, P. K. (2021). *Functionally Graded Materials (FGMs)*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003097976

Petit, C., Montanaro, L., & Palmero, P. (2018). Functionally graded ceramics for biomedical application: Concept, manufacturing, and properties. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, *15*(4), 820-840. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijac.12878

Raucci, M. G., Giugliano, D., & Ambrosio, L. (2016). Fundamental Properties of Bioceramics and Biocomposites. Içinde I. V. Antoniac (Ed.), *Handbook of Bioceramics and Biocomposites* (ss. 35-58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12460-5_3

Shinohara, Y. (2013). Chapter 11.2.4 - Functionally Graded Materials. Içinde S. Somiya (Ed.), *Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition)* (ss. 1179-1187). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385469-8.00061-7

Takahashi, H. (1993). Mechanical properties of functional gradient materials of titanium-apatite and titanium zirconia for dental use. *Journal of the Japanese Society for Dental Materials and Devices*, *12*(5), 595-612.

Zhang, Y. (2012). Overview: Damage resistance of graded ceramic restorative materials. *Journal of the European Ceramic Society*, *32*(11), 2623-2632. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.02.020

Tiroid Hastalıklarının Tanı ve Yönetiminde Yapay Zekâ Uygulamaları

Cüneyt ÖZDEMİR

GİRİŞ

Tiroid bezi, boynun ön kısmında, Âdem elmasının hemen altında yer alan küçük, kelebek şeklinde bir endokrin organdır. Boyut olarak küçük görünse de vücudun enerji dengesini ve metabolik hızını düzenleyen en önemli yapılardan biridir. Tiroid bezi folikül hücrelerinden sentezlenen T3 (triiyodotironin) ve T4 (tiroksin) hormonlarını salgılar. Bu hormonlar; hücrelerde enerji üretimi, oksijen tüketimi, protein sentezi ve ısı düzeni gibi yaşamsal süreçleri kontrol eder. Ayrıca büyüme, gelişme, sinir sistemi olgunlaşması ve kardiyovasküler sistemin sağlıklı işleyişi için de kritiktir [1,2].

Tiroidoloji, modern tıbbın erken dönemlerinden itibaren hızla gelişmiştir. 1891'de Murray, miksödemli hastalarda koyun tiroidi ekstresinin hipodermik enjeksiyonunu rapor ederek tiroid hormon replasmanının klinik başlangıcını işaretlemiştir [18]. Bunu takiben 1940'larda radyoaktif iyot (RAI) tanı ve tedavide kullanıma girmiş, özellikle hipertiroidi ve tiroid kanserinde çığır açmıştır [19].

Tiroid hormonlarının üretimi yalnızca tiroid bezinin değil, beynin üst merkezlerinin katıldığı bir kontrol sistemi ile düzenlenir. Bu sistem, hipotalamus–hipofiz–tiroid (HPT) ekseni olarak adlandırılır. Hipotalamustan salınan TRH (tirotropin salgılatıcı hormon), hipofiz bezini uyararak TSH (tiroid stimülan hormon) salgılanmasına yol açar. TSH ise tiroid bezine etki ederek T3 ve T4 üretimini artırır. Dolaşımdaki T3 ve T4 düzeyleri yükseldiğinde hem hipofiz hem de hipotalamus geri bildirim yoluyla baskılanır—bu mekanizma eksenin hassas dengesini sağlar [1,3].

Tiroid hormonlarının etkisi, bazal metabolizma hızının düzenlenmesinin ötesine uzanır: kardiyovasküler sistemde kalp hızı/atım hacmini ve periferik vasküler direnci modüle eder; sinir sistemi gelişimi ve nörofizyolojisini etkiler; iskelet gelişimi ve kas-iskelet fonksiyonlarını destekler; gastrointestinal motiliteyi uyarır [20,21]. Bu çoklu sistem etkileri, tiroid disfonksiyonlarının neden multisistemik bulgularla prezente olduğunu açıklar Bu düzenleme sistemi, tiroid bezini neredeyse vücudun "metabolik termostatı" haline getirir. Nasıl evde kullanılan bir termostat sıcaklığı sürekli izleyip ayarlıyorsa, tiroid bezi de metabolik faaliyetleri benzer şekilde dengeler. Tiroid hormonları fazla üretilirse metabolizma hızlanır; yetersizse metabolizma yavaşlar. Bu denge bozulduğunda ortaya çıkan tiroid hastalıkları bireylerin yaşam kalitesini ve sağlık durumunu doğrudan etkiler [4].

Tiroid hastalıkları küresel ölçekte önemli bir halk sağlığı sorunudur. İyot yetersizliği hâlen dünya nüfusunun kayda değer bir bölümünü etkileyen, önlenebilir tiroid bozukluklarının başlıca nedenidir [5,22]. Ayrıca otoimmün tiroid hastalıkları kadınlarda erkeklere göre belirgin olarak daha sık görülür [6].

Tiroid bezinin işlevi; genetik faktörler, iyot alımındaki dengesizlikler, otoimmün mekanizmalar, çevresel etkenler ve çeşitli ilaçların yan etkileri

nedeniyle bozulabilir. Örneğin; iyot eksikliği ya da fazlalığı tiroid hormon sentezini doğrudan etkilerken, bağışıklık sisteminin tiroid dokusuna saldırdığı otoimmün süreçler de bezin yapısını ve hormon üretimini bozabilir [1,2,5,6]. Ayrıca radyasyon maruziyeti, bazı viral enfeksiyonlar ve genetik yatkınlık da tiroid fonksiyon bozukluklarının gelişmesinde önemli rol oynar [3].
Son yıllarda, bu geleneksel risk faktörlerine ek olarak modern yaşamın getirdiği çevresel ve yaşam tarzı etkenlerinin de tiroid sağlığı üzerindeki rolü giderek daha fazla araştırılmaktadır. Endokrin bozucu kimyasallar (EDC'ler)… tiroid fonksiyonlarını bozabileceğine dair kanıtlar artmaktadır. Benzer şekilde, kronik psikolojik stresin bağışıklık sistemi üzerindeki modülatör etkileri ve bağırsak mikrobiyotasındaki dengesizliklerin otoimmün tiroid hastalıklarının patogenezinde rol oynayabileceği bildirilmektedir [23,24].

Tiroid hormon bozuklukları

Tiroid bezinde meydana gelen bu bozukluklar, çeşitli hastalıklara yol açar. Hipotiroidizm, tiroid hormonlarının yetersiz üretimiyle ortaya çıkar. Hastalarda yorgunluk, kilo alma, soğuğa tahammülsüzlük ve depresyon gibi belirtiler görülür. Dünya genelinde oldukça yaygın olan bu hastalığın en sık nedeni Hashimoto tiroiditi olarak bilinen otoimmün bir durumdur. 2022 yılında yapılan bir meta-analize göre, Hashimoto tiroiditinin yetişkinlerde küresel prevalansı yaklaşık %7,5 olarak bulunmuştur. Bu oran kadınlarda erkeklere göre yaklaşık üç kat daha fazladır [7].
Hipertiroidizm ise tiroid hormonlarının aşırı üretimiyle ilişkilidir ve çarpıntı, kilo kaybı, sinirlilik ve terleme gibi belirtilere yol açar. 2023'te yayımlanan bir çalışmaya göre, dünya genelinde erişkinlerin yaklaşık %2,5'inde hipertiroidizm görülmektedir—özellikle Graves hastalığı ve toksik nodüler guatr en yaygın nedenlerdir [8,9].

Tiroid nodülleri ve guatr

Tiroid bezinde ortaya çıkan en yaygın sorunlardan biri tiroid nodülleridir. Nodüller genellikle tesadüfen yapılan ultrason (US) incelemelerinde fark edilir. Yüksek çözünürlüklü ultrason kullanıldığında, erişkinlerin yaklaşık %20 ila %40'ında nodül tespit edilebilmektedir [10]. Ancak bu nodüllerin yalnızca %5–15'inin malign, yani kanserli olduğu bildirilmektedir [11]. Bu nedenle hangi nodüllerin tehlikeli olduğunu belirlemek, klinik açıdan büyük önem taşır. Günümüzde bu ayrımı yapmak için kullanılan en önemli yöntemlerden biri ince iğne aspirasyon biyopsisi (FNA) ve bu biyopsi sonuçlarının sınıflandırılmasını sağlayan Bethesda Sistemidir. 2023'te güncellenen bu sistem, sitolojik değerlendirmeyi standardize etmiş ve klinisyenlerin karar alma süreçlerini kolaylaştırmıştır [12].
Nodüllerin yanı sıra, tiroid bezinde sık görülen bir diğer yapısal problem guatrdır. Guatr, tiroid bezinin diffüz (yaygın) veya nodüler büyümesi ile karakterizedir. İyot eksikliği, bazı bölgelerde guatrın en yaygın sebebidir;

ancak iyot yeterliliği sağlanmış ülkelerde otoimmün hastalıklar veya nodüler değişiklikler daha sık neden olarak karşımıza çıkmaktadır [13]. Guatr tek başına iyi huylu bir durum olabileceği gibi, nodüllerle birlikte görüldüğünde malignite riskini de değerlendirmeyi gerektirir.

Otoimmün tiroid hastalıkları ve tiroid kanseri

Bir diğer önemli grup otoimmün tiroid hastalıklarıdır. Hashimoto tiroiditi, hipotiroidinin en sık nedeni iken; Graves hastalığı hipertiroidinin en yaygın sebebidir. Her iki hastalık da bağışıklık sisteminin tiroid dokusuna karşı anormal yanıt geliştirmesi sonucu ortaya çıkar ve bezin işlevini bozar [7,9].

Son olarak, tiroid kanseri de göz ardı edilmemesi gereken bir klinik tablodur. 2022 GLOBOCAN verilerine göre dünya genelinde 821 binden fazla yeni tiroid kanseri vakası görülmüş ve bu kanser türü, endokrin sistemin en sık malignitesi olarak öne çıkmıştır [14]. Tiroid kanserlerinin büyük kısmını papiller tiroid karsinomu oluşturur, ancak folliküler, medüller ve anaplastik tipler de mevcuttur. Bu kanserlerin bir kısmı yavaş seyirli ve tedaviye iyi yanıt verirken, özellikle anaplastik tiroid kanseri gibi bazı tipler agresif seyirlidir.

Tiroid nodüllerinin bu denli yaygın olması, ancak küçük bir kısmının malignite riski taşıması, klinisyenleri önemli bir ikilemle karşı karşıya bırakır: Hangi hastaya invaziv bir işlem olan biyopsi yapılmalı, hangi hasta sadece takip edilmelidir? Bu kararın yanlış verilmesi iki önemli olumsuz sonuca yol açabilir. Bir yanda, malign bir nodülün gözden kaçırılması tanıda gecikmeye ve hastalığın ilerlemesine neden olabilirken; diğer yanda, iyi huylu bir nodüle gereksiz yere biyopsi veya hatta ameliyat yapılması hem hasta için anksiyete ve komplikasyon riski yaratır hem de sağlık sistemine ek bir mali yük getirir. Bu nedenle, nodül yönetiminde 'aşırı tanı' (overdiagnosis) ve 'aşırı tedavi'den (overtreatment) kaçınmak, en az kanseri atlamamak kadar kritik bir hedef haline gelmiştir. İşte bu hassas dengeyi kurma ihtiyacı, tanısal araçların doğruluğunu ve objektifliğini en üst düzeye çıkarma arayışını tetiklemektedir [25,26].

Tiroid nodülleri ve kanserleri, klinik açıdan kritik öneme sahip olup doğru tanılarının konulmasında en önemli görüntüleme aracı ultrason (US)'tur. Non-invaziv, yaygın ve erişilebilir olması sayesinde hem nodüllerin saptanmasında hem de yapısal özelliklerinin değerlendirilmesinde ilk basamak yöntem olarak tercih edilmektedir. Ancak US yorumlaması, büyük ölçüde hekimin deneyimine ve gözlem becerisine bağlıdır. Bu nedenle, aynı nodül farklı hekimler tarafından farklı şekillerde değerlendirilebilmekte ve bu durum tanısal belirsizliklere yol açabilmektedir. Literatürde, gözlemciler arası uyumsuzluğun özellikle küçük nodüllerde ve gri-zon bulgularda daha belirgin olduğu bildirilmiştir [15].

Ultrasonografinin bu subjektif doğasını aşmak ve tanısal doğruluğu artırmak amacıyla çeşitli tamamlayıcı yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, doku sertliğini ölçerek malignite riski hakkında ek bilgi sunan ultrason elastografi

ve nodülün kanlanma paternini gösteren kontrastlı ultrason (CEUS) gibi ileri görüntüleme teknikleri, standart B-mod ultrasonun yetersiz kaldığı durumlarda karar sürecine destek olabilmektedir. Görüntülemenin ötesinde, özellikle ince iğne aspirasyon biyopsisinin 'belirsiz' veya 'atipik' sonuç verdiği vakalarda, nodülden alınan materyalde genetik mutasyonları (örn. BRAF, RAS) veya gen ekspresyon profillerini analiz eden moleküler testler de giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak bu ileri yöntemlerin maliyetli olması, her merkezde bulunmaması ve yorumlamalarının yine uzmanlık gerektirmesi, onları rutin kullanımdan ziyade seçilmiş vakalar için uygun kılmaktadır. Bu durum, daha erişilebilir, tekrarlanabilir ve objektif bir çözüme olan ihtiyacı devam ettirmektedir [27,28].

Bu sorunu azaltmak amacıyla son yıllarda standart risk sınıflandırma sistemleri (RSS) geliştirilmiştir. Amerikan Radyoloji Koleji'nin ACR TI-RADS sistemi ve Avrupa Tiroid Derneği'nin 2023'te yayımladığı kılavuz, tiroid nodüllerini yapısal özelliklerine göre puanlayan ve malignite riskini kategorilere ayıran yaklaşımlar sunmaktadır [15,16]. Bu sistemler sayesinde, ultrason bulgularına dayanarak hangi nodüllerin biyopsi gerektirdiği, hangilerinin sadece izlenmesi gerektiği konusunda daha objektif ve standardize kararlar verilebilmektedir. Ancak RSS uygulamaları tamamen hekimin ultrason bulgularını doğru şekilde tanımlayıp kategorilere yerleştirmesine bağlıdır. Bu da deneyimli ve deneyimsiz hekimler arasında tanısal farklılıklara yol açabilmektedir.

Tam da bu noktada, bilgisayar bilimleri ve yapay zekâ uygulamaları devreye girmektedir. Yapay zekâ destekli görüntü işleme yöntemleri, ultrason görüntülerini otomatik olarak analiz ederek nodüllerin kenar yapısı, ekogenitesi, şekli ve mikrokalsifikasyon gibi kritik özelliklerini insan gözünden bağımsız ve standart bir şekilde değerlendirebilir. Böylece, hekimler arası farklılıkların en aza indirilmesi, tanısal doğruluğun artırılması ve gereksiz biyopsilerin önlenmesi mümkün hale gelmektedir.

Son yıllarda yapay zekâ (AI), makine öğrenmesi (ML) ve özellikle derin öğrenme (DL) yöntemleri, tiroid hastalıklarının tanı ve yönetiminde hızlı bir şekilde gündeme gelmiştir. Örneğin, ultrason görüntülerinden tiroid nodüllerini otomatik olarak sınıflandırabilen derin öğrenme modelleri geliştirilmiş ve bu modeller bazı çalışmalarda %90'ın üzerinde doğruluk sağlamıştır [17]. Benzer şekilde, biyopsi örneklerinin yapay zekâ ile analizi, sitolojik değerlendirmede gözden kaçabilecek küçük ayrıntıların yakalanmasına olanak tanımış ve Bethesda Sistemi'nin sunduğu kategorilerin daha güvenilir şekilde uygulanmasına katkı sağlamıştır [12]. Ayrıca, klinik verilerden ve hasta kayıtlarından doğal dil işleme (NLP) yöntemleri ile bilgi çıkarımı yapılabilmekte; bu sayede hasta semptomları otomatik olarak sınıflandırılmakta ve raporların daha standart hale gelmesi mümkün olmaktadır.

Bununla birlikte, bu umut verici gelişmelerin yanında bazı önemli zorluklar da bulunmaktadır. Farklı merkezlerde kullanılan ultrason cihazları, hasta

popülasyonundaki çeşitlilik ve veri toplama protokollerindeki farklılıklar, yapay zekâ modellerinin başka ortamlarda aynı başarıyı göstermesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, derin öğrenme modellerinin çoğu bir "kara kutu" gibi çalıştığından (yani, bir karara nasıl ulaştıklarını adım adım açıklayamadıklarından), karar mekanizmalarının şeffaf olmaması klinisyenler için güven sorununa yol açmaktadır [4,15]. Yani, bir model yüksek doğruluk sağlasa bile, neden o kararı verdiğini açıklayamadığında tıp pratiğinde tereddütle karşılanabilmektedir.

Bu nedenle gelecekte, yalnızca yüksek doğruluk oranları elde eden sistemler değil, aynı zamanda açıklanabilir yapay zekâ (explainable AI) çözümleri, çok merkezli doğrulama çalışmaları ve kullanıcı dostu karar destek sistemleri ön plana çıkacaktır. Böylece hem hekimler ile yapay zekâ arasında güven temelli bir iş birliği kurulabilecek hem de hasta güvenliği gözetilerek klinik karar süreçleri desteklenebilecektir. Başka bir deyişle, bilgisayar bilimleri tiroid hastalıklarının tanısında tamamlayıcı değil, giderek daha belirleyici bir rol üstlenmeye başlamaktadır.

Tüm bu gelişmeler ışığında, tiroid hastalıklarının tanı ve yönetiminde yapay zekâ ve bilgisayar bilimleri uygulamalarının rolü giderek artmaktadır. Klinik pratiğe entegrasyon sürecinde karşılaşılan güçlükler, bu teknolojilerin önemini azaltmamakta, aksine gelecekte nasıl daha güvenilir ve etkin şekilde kullanılabileceğine dair yeni araştırma alanları açmaktadır. Bu noktada yapılması gereken, hem mevcut başarıların hem de sınırlılıkların sistematik biçimde değerlendirilmesidir.

Bu bölümün amacı, 2022–2025 yılları arasında yayımlanmış güncel çalışmaları derleyerek, bilgisayar bilimleri uygulamalarının (yapay zekâ, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve doğal dil işleme) tiroid hastalıklarının teşhisi ve yönetiminde nasıl kullanıldığını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktır. Özellikle ultrason görüntülerinin otomatik analizi, biyopsi örneklerinin değerlendirilmesi, laboratuvar ve klinik verilerin sınıflandırılması ve elektronik sağlık kayıtlarından bilgi çıkarımı gibi farklı alanlarda yapay zekânın katkıları detaylı olarak incelenecektir. Böylelikle hem şu ana kadar elde edilen başarıların hem de karşılaşılan zorlukların ortaya konması, gelecekte daha şeffaf, genellenebilir ve klinisyenler için güvenilir sistemlerin geliştirilmesine ışık tutacaktır.

Ayrıca, bu çalışmada yalnızca teknik başarılar değil, aynı zamanda bu teknolojilerin klinik karar destek sistemlerine entegrasyonu, hasta güvenliği açısından doğurabileceği sonuçlar ve etik boyutları da tartışılacaktır. Böylece, mevcut durumun bütüncül bir değerlendirmesi yapılacak, geleceğe yönelik beklentiler ve potansiyel araştırma yönleri vurgulanacaktır.

YÖNTEM / LİTERATÜR TARAMASI

1. Çalışmanın Tasarımı

Bu çalışma, 2022–2025 yılları arasında yayımlanmış araştırmaları inceleyerek, yapay zekâ (AI), makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL) ve doğal dil işleme (NLP) yöntemlerinin tiroid hastalıklarının tanı ve yönetimindeki rolünü değerlendiren bir sistematik derleme olarak tasarlanmıştır. Raporlama PRISMA 2020 ilkelerine dayandırılmış; tanısal doğruluk ve prediktif modelleme çalışmalarında metodolojik kaliteyi güvenceye almak amacıyla TRIPOD+AI, QUADAS-2, CLAIM, PROBAST ve STARD 2015 çerçevelerinden yararlanılmıştır [29–34]. Çalışmaların yöntemsel heterojenliği nedeniyle meta-analiz yapılmamış, bulgular niteliksel sentez biçiminde sunulmuştur.

2. Veri Tabanları ve Arama Stratejisi

Literatür taraması PubMed/MEDLINE, IEEE Xplore, Web of Science Core Collection ve Scopus veri tabanlarında yürütülmüştür. Yalnızca hakemli dergilerde yayımlanmış İngilizce makaleler dâhil edilmiş, kapsam 1 Ocak 2022 – 9 Eylül 2025 tarihlerini içermiştir.

Arama stratejisi (örnek PubMed dizgesi):

("thyroid") AND

("ultrasound" OR "cytology" OR "histopathology" OR "fine needle aspiration" OR

"whole slide image" OR "genomic" OR "EHR" OR "natural language processing") AND*

("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "CNN" OR

"transformer" OR "radiomic")*

Dahil Etme ve Dışlama Ölçütleri

Dahil edilen çalışmalar:

1. Tiroid hastalıkları (hipotiroidi, hipertiroidi, otoimmün tiroidit, nodül ve kanser) ile doğrudan ilişkili,
2. AI/ML/DL/NLP yöntemlerini tanı, risk sınıflaması, prognostik tahmin veya klinik karar desteğinde kullanan,
3. Klinik veya yarı-klinik veriler (ultrason, sitoloji, histopatoloji, laboratuvar/klinik, genomik, EHR) üzerinde nicel performans ölçütü (doğruluk, AUC, duyarlılık, özgüllük, F1 vb.) raporlayan,
4. 2022 sonrası hakemli dergilerde yayımlanan özgün araştırmalar.

Hariç tutulan çalışmalar:

1. Klinik veri içermeyen yalnız teknik/simülasyon çalışmaları,
2. Konferans özetleri, kısa bildiriler, mektuplar,
3. 1 Ocak 2022 öncesi yayınlar,

4. Tiroid dışı endokrin odaklar.

3. Çalışma Seçim Süreci

Veritabanı taraması sonucunda 520 kayıt saptandı. Yinelenenler elendikten ve başlık–özet taraması yapıldıktan sonra 186 makale tam metin incelemeye alındı. Dahil etme/dışlama ölçütleri uygulanarak 74 makale derlemeye dahil edildi. Seçimler iki bağımsız araştırmacı tarafından yapıldı; uyuşmazlıklar üçüncü değerlendirici ile giderildi.

Veri Çıkarımı

- Standart bir veri formu ile şu bilgiler kaydedilmiştir:
- Yayın yılı, ülke ve merkez sayısı, örneklem büyüklüğü,
- Kullanılan veri türü (US, FNA sitoloji, WSI histopatoloji, klinik/laboratuvar verileri, genomik, EHR/NLP),
- Kullanılan yöntem (CNN, Transformer, ansambl klasik ML, BERT vb.),
- Performans ölçütleri (AUC, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, F1 skoru),
- Haricî doğrulama varlığı,
- Açıklanabilirlik (Grad-CAM, SHAP vb.),
- Raporlama kılavuzlarına uyum (TRIPOD+AI, CLAIM, STARD) [30–34].

BULGULAR (TARAMA SONUÇLARI)

Aşağıdaki bulgular, yukarıdaki yöntem ve ölçütler çerçevesinde dahil edilen 74 makalenin niteliksel sentezine dayanmaktadır.

1) Kapsam ve Tematik Dağılım

- Ultrason görüntüleme (US): n=41 (%55,4)
- Sitoloji/Histopatoloji (FNA/WSI): n=12 (%16,2)
- Genomik/çok-omik: n=8 (%10,8)
- Klinik/Laboratuvar verisi: n=7 (%9,5)
- EHR/NLP: n=6 (%8,1)

US odaklı çalışmaların yoğunluğu, son dönemde DL-radyomik nomogramlar ve Transformer tabanlı yaklaşımların yaygınlaşmasıyla uyumludur. Örneğin, Du ve ark. (2024) tarafından geliştirilen DL-radyomik nomogram, kıdemsiz hekim performansını anlamlı ölçüde artırmış ve haricî doğrulamada yüksek AUC değerleri sağlamıştır [35].

2) Metodolojik Özellikler

Çalışma Tasarımı ve Veri Kaynakları: İncelenen makalelerin büyük çoğunluğu (%80'den fazlası) retrospektif ve tek merkezli tasarımlara sahiptir. Bununla birlikte, 2024–2025 yıllarında yayımlanan çalışmalarda çok merkezli ve haricî validasyon (external validation) içeren tasarımların sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Örneklem büyüklükleri birkaç yüz hastadan on binlerce görüntüyü içeren geniş veri setlerine kadar büyük bir değişkenlik göstermektedir.

Veri Türleri: Dahil edilen 74 çalışmanın %55,4'ü (n=41) ile en sık kullanılan veri türü ultrason (US) görüntüleri olmuştur. Bunu %16,2 (n=12) ile) sitoloji/histopatoloji, ince iğne aspirasyon (İİA) sitoloji preparatları (%~10) takip etmektedir. Klinik/laboratuvar verileri, genomik veriler ve elektronik sağlık kayıtlarından (EHR) NLP ile işlenmiş metinleri kullanan multimodal çalışmaların sayısı ise henüz sınırlı olmakla birlikte yükselen bir trend göstermektedir.

Raporlama Kalitesi: Çalışmaların raporlama standartlarına uyumu değişkendir. Özellikle TRIPOD+AI ve STARD gibi kılavuzlara atıf yapan ve bu çerçevelere uyan yeni tarihli çalışmaların metodolojik kalitesinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Ancak modellerin açıklanabilirliğine (örneğin, Grad-CAM veya SHAP kullanımı) ve klinik iş akışına entegrasyon potansiyeline yönelik tartışmalar birçok çalışmada eksik kalmaktadır.

- Haricî doğrulama yapılmış çalışma oranı: %37,8 (n=28/74)
- Çok merkezli tasarım: %32,4 (n=24/74)
- Prospektif bileşen (tam veya kısmi): %20,3 (n=15/74)
- Açıklanabilirlik raporlanması (Grad-CAM/SHAP/LIME): %47,3 (n=35/74)
- Kalibrasyon analizi (Brier, kalibrasyon eğrisi, E/O): bildirimi yok/eksik: %71,6 (n=53/74)
- Kılavuz uyumu (TRIPOD+AI veya CLAIM veya STARD'a tam uyum): %16,2 (n=12/74)

Bu bulgular, son iki yılda yayınlanan TRIPOD+AI ve CLAIM güncellemelerinin önemini vurgular niteliktedir [30,32]

3) Kullanılan Yöntemler ve Tipik Görevler

- Kullanılan Algoritmalar:
  - Görüntü Analizinde: Derin öğrenme modelleri, özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN), baskın mimaridir. ResNet, VGG, Inception ve U-Net gibi iyi bilinen ağlar, transfer öğrenme (transfer learning) yaklaşımıyla sıklıkla kullanılmıştır. Son yıllarda, özellikle WSI analizinde Vision Transformer (ViT) mimarilerinin de popülerlik kazandığı görülmektedir.
  - Yapısal Veri Analizinde: Laboratuvar sonuçları veya hasta demografisi gibi yapısal verilerle risk tahmini yapan çalışmalarda XGBoost, Random Forest gibi klasik makine öğrenmesi algoritmaları hâlâ yaygındır.
  - NLP'de: Patoloji veya radyoloji raporlarından yapılandırılmış veri çıkarmak amacıyla BERT ve türevi transformatör tabanlı dil modellerinin kullanıldığı az sayıda ancak etkili çalışma mevcuttur.
- Tipik Görevler (Uygulama Alanları):
  - Tiroid Nodülü Sınıflandırması: En yaygın görev, ultrason görüntülerinden tiroid nodüllerinin benign (iyi huylu) veya malign (kötü huylu) olarak sınıflandırılmasıdır. Modeller genellikle ACR TI-RADS gibi mevcut risk sınıflama sistemleriyle karşılaştırılmaktadır.
  - Görüntü Segmentasyonu: Nodül sınırlarının otomatik olarak çizilmesi, hem tanı sürecini hızlandırmakta hem de radyomik analizler için temel oluşturmaktadır.
  - Kanser Alt Tiplemesi: Histopatoloji (WSI) görüntülerinden papiller tiroid karsinomu gibi kanser türlerinin ve alt tiplerinin (örneğin, klasik varyant vs. foliküler varyant) otomatik olarak sınıflandırılması.
  - Prognoz Tahmini: Genomik veriler (örn. BRAF mutasyonu) ile klinik verileri birleştiren modellerin, nüks riskini veya tedaviye yanıtı tahmin etme potansiyeli araştırılmıştır

- US-DL: CNN (ResNet/EfficientNet), Transformer/Swin, gerçek-zamanlı YOLO türevleri; benign-malign sınıflama, TI-RADS otomasyonu, ≤1 cm mikronodül tespiti [35], [43], [44].

- Sitoloji/WSI: DL ile sitoloji ve tam slayt görüntülerinde alt tip sınıflama; bazı çalışmalarda moleküler (BRAF V600E) öngörü denemeleri [36], [40], [41].
- Klinik/Laboratuvar: RF, XGBoost, SVM ile hipo-hipertiroidi ayrımı; açık veri setlerinde çoklu algoritma karşılaştırmaları [35].
- EHR/NLP: Klinik dokümantasyondan US uygunluğu değerlendirmesi ve patoloji raporlarından bilgi çıkarımı [38], [39].

Tablo 1. Kullanılan Yöntemler ve Tipik Görevler

Yöntem	Tipik Görev	Kullanım Alanı
CNN	Görüntü sınıflandırma	US görüntülerinde malign-benign ayrımı
Transformer (ViT, BERT)	Sekans/rapor analizi	US raporlarının otomatik etiketlenmesi
Klasik ML (SVM, RF, XGBoost)	Klinik veri sınıflandırma	TSH/T4/otoantikorlarla risk tahmini
Ansambl yöntemler	Çoklu modalite entegrasyonu	US + genomik + klinik veriler
NLP modelleri (BioBERT, ClinicalBERT)	Serbest metin analizi	EHR'den semptom çıkarımı

4) Performansın Özet Görünümü (Çalışmalar Arası Aralıklar)

- Çalışmalar Arası Aralıklar:
  - AUC (Eğri Altında Kalan Alan): Tiroid nodüllerinin US görüntülerinden malignite sınıflandırması için raporlanan AUC değerleri genellikle 0.88 ile 0.97 arasında değişmektedir. Haricî validasyon setlerinde bu değerler genellikle 0.85–0.92 aralığına düşmektedir.
  - Doğruluk (Accuracy): %85 ila %96 aralığında yoğunlaşmaktadır.
  - Duyarlılık ve Özgüllük: Çalışmaların çoğunda, malign vakaları kaçırmamak adına yüksek duyarlılık (>%90) hedeflenmiştir. Bu durum bazen özgüllükte hafif bir düşüşe neden olabilmektedir.
- Klinik Karşılaştırmalar:
  - İncelenen çalışmaların önemli bir kısmı, AI modellerinin performansını radyologlar ve patologlarla karşılaştırmıştır. Bulgular, iyi eğitilmiş derin öğrenme modellerinin deneyimli

uzmanlarla benzer veya daha yüksek bir tanısal performans sergilediğini göstermektedir.

- AI modelleri, özellikle daha az deneyimli hekimlerin (örneğin, asistanlar) performansını anlamlı ölçüde iyileştirme potansiyeli taşımaktadır.
- En önemli avantajlarından biri, gözlemciler arası değişkenliği (inter-observer variability) azaltarak tanısal süreçte bir standardizasyon sağlamasıdır.

Performans yüksek görünmekle birlikte, haricî doğrulama eksikliği ve kalibrasyon yokluğu, bu metriklerin gerçek yaşamda genellenebilirliğini belirsiz kılıyor.

Tablo 2. Performans Sonuçları (Çalışmalar Arası Aralıklar)

Veri Türü / Görev	AUC	Duyarlılık	Özgüllük	Notlar
US tabanlı nodül sınıflaması	%82–96	%78–92	%74–90	RSS ile birlikte kullanıldığında yanlış negatifler azalıyor
Sitoloji / histopatoloji (WSI)	%85–97	%80–94	%76–92	Indeterminate Bethesda kategorilerinde %10–15 ek doğruluk
Genomik / multimodal	%88–94	%82–90	%78–88	Multimodal modeller tek modaliteye göre %5–8 daha iyi
Klinik / laboratuvar verileri	–	%70–85 doğruluk	–	Özellikle otoimmün tiroidit için yardımcı
NLP / EHR	–	–	–	F1 skorları: 0.78–0.91

5) Veri Paylaşımı ve Etik

- Açık veri/kod paylaşımı: %24,3 (n=18/74)
- Etik kurul/onam bildirimi: %83,8 (n=62/74)
- Çıkar çatışması/finansman şeffaflığı: %89,2 (n=66/74)

Açık veri/kod oranı görece düşüktür; yeniden üretilebilirlik için iyileştirme gerektirir.

6) Klinik Karşılaştırmalar

- Uzman-AI karşılaştırması (aynı veri üzerinde): %33,8 (n=25/74)

Bu alt grupta AI'nin kıdemsiz/orta deneyimli okuyucular üzerinde AUC/duyarlılık artışı sağladığı; kıdemli uzmanlarla farkın azaldığı raporlanmıştır. (ör. US-DL nomogram; çok merkezli FNA-DL) [35], [36].

BULGULARIN YORUMU

AI Uygulamalarının Güçlü Yönleri

Son üç yılda yayımlanan çalışmalar, yapay zekâ yöntemlerinin özellikle ultrason (US) görüntülerinde benign–malign ayrımı konusunda yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir. Örneğin, Du ve arkadaşlarının derin öğrenme tabanlı radyomik nomogramı haricî doğrulamada AUC >0,92 bildirmiştir [35]. Benzer şekilde Wu ve ark., video tabanlı iki akışlı zaman ağıyla AUC 0,969 elde etmiş ve bu yöntemin dinamik ultrason verisini daha iyi temsil ettiğini ortaya koymuştur [38]. Sitoloji ve histopatolojide de AI modelleri, özellikle belirsiz kategorilerde (Bethesda III–IV) tanısal doğruluğu artırmıştır [36].

Zayıf Yönler: Haricî Doğrulama ve Kalibrasyon Eksikliği

Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların yalnızca %37,8'inde haricî doğrulama yapılmıştır. Bu oran, modellerin farklı hasta popülasyonlarında genellenebilirliğini sorgulatmaktadır. Ayrıca, çalışmaların %70'inden fazlasında kalibrasyon analizi raporlanmamıştır. Halbuki klinik pratikte bir modelin yalnızca yüksek doğruluk değil, aynı zamanda doğru risk tahminleri üretmesi gerekir.

Klinik Pratikte Uygulanabilirlik

Yüksek doğruluk oranlarına rağmen, çoğu AI sistemi halen araştırma aşamasında kalmaktadır. Bunun başlıca nedeni, modellerin farklı merkezlerde ve cihazlarda test edilmemiş olmasıdır. Wang ve ark.'nın (2024) çok merkezli prospektif çalışması bu açıdan öncü olup, AI'nin klinik kullanımda güvenilirliğini artıran örneklerden biridir [36].

Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) ve Hekim Güveni

Klinisyenlerin AI sistemlerini kabulünde en büyük engellerden biri şeffaflık eksikliğidir. Literatürde yalnızca %47'sinde açıklanabilirlik yöntemleri

(Grad-CAM, SHAP) raporlanmıştır. Açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yöntemlerinin entegrasyonu, AI modellerinin karar süreçlerini görünür kılarak hekim güvenini artırabilir [30], [32].

Çok-Modalli Entegrasyon
Son dönemdeki çalışmalar, çok-modalli yaklaşımların (ör. US + sitoloji + genomik + NLP) tanısal gücü artırabileceğini göstermektedir. Zhou ve arkadaşları (2023), histopatoloji görüntülerinden BRAF V600E mutasyonunu öngörerek morfoloji ile genetik bilgiyi birleştirmiştir [39]. Bu tür yaklaşımlar, tiroid kanserlerinde daha kişiselleştirilmiş tanı ve tedavi kararlarına kapı aralamaktadır.

Etik ve Hukuki Boyutlar
AI sistemlerinin tıpta kullanımında hasta gizliliği ve veri güvenliği kritik öneme sahiptir. Açık veri/kod paylaşımı oranı yalnızca %24,3 olup, yeniden üretilebilirliği sınırlandırmaktadır. Ayrıca, AI destekli kararların sorumluluğu (hekime mi, yazılım geliştiriciye mi ait olacağı) halen tartışmalıdır [40]. Bu noktada, regülasyon otoritelerinin (FDA, EMA) yayınladığı kılavuzlar klinik geçiş için belirleyici olacaktır.

Klinik Karar Süreçlerine Entegrasyon
AI sistemleri klinisyenleri ikame etmekten ziyade, karar destek aracı olarak konumlanmaktadır. US alanındaki çalışmalar, AI'nin özellikle kıdemsiz hekimlerin doğruluğunu artırdığını, kıdemli uzmanlarla farkın azaldığını göstermektedir [36], [37]. Bu da AI'nin klinik eğitim ve standartlaşmada önemli rol oynayabileceğini düşündürmektedir.

Gelecek Perspektifi

Kişiselleştirilmiş Tıp ve AI
Gelecekte AI sistemlerinin, yalnızca görüntüleri değil, genetik, klinik ve yaşam tarzı verilerini de entegre ederek kişiselleştirilmiş risk tahminleri yapması beklenmektedir [39], [41].

Çok Merkezli, Uluslararası Veri Setleri
AI modellerinin genellenebilirliği için çok merkezli, farklı popülasyonlarda doğrulama kritik öneme sahiptir. Wang ve ark.'nın çok merkezli çalışması bu açıdan örnek niteliğindedir [36]. Daha geniş uluslararası konsorsiyumlara ihtiyaç vardır.

Regülasyon ve Standartların Önemi
AI'nin klinik uygulamaya geçişinde FDA, EMA ve CE gibi regülasyon kurumlarının onay süreçleri belirleyici olacaktır. CLAIM, TRIPOD+AI ve

STARD gibi raporlama standartlarına uyum, klinik geçişin hızlanmasını sağlayacaktır [30], [32], [34].

Açık Veri ve Kod Paylaşımı
Yeniden üretilebilirlik için açık veri ve kod paylaşımı kritik önemdedir. Ancak mevcut oran (%24,3) oldukça düşüktür. Uluslararası veri havuzlarının oluşturulması, bu alandaki ilerlemeyi hızlandıracaktır.

Klinik Eğitime Entegrasyon
AI tabanlı sistemler, yalnızca tanı koymakla kalmayıp, aynı zamanda klinik eğitim araçları olarak da kullanılabilir. Özellikle ultrason gibi gözlemciye bağlı yöntemlerde, AI'nin kıdemsiz hekimlere rehberlik etmesi eğitim kalitesini artırabilir [37].

SONUÇ

Bu derleme, 2022–2025 yılları arasında yayımlanmış 74 çalışmayı kapsamaktadır. Bulgular, yapay zekâ uygulamalarının özellikle ultrason görüntüleme ve sitoloji/histopatoloji alanlarında yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak metodolojik açıdan haricî doğrulama eksikliği (%62), kalibrasyon yetersizliği (%71) ve raporlama standartlarına düşük uyum (%16) dikkat çekmektedir.
Genel olarak, AI'nin tiroid hastalıklarının tanı ve yönetiminde umut verici bir potansiyele sahip olduğu açıktır. Bununla birlikte, genellenebilirlik, açıklanabilirlik, etik ve regülasyon alanlarındaki eksiklikler, klinik entegrasyonun önündeki en büyük engellerdir.

Araştırmacılar için öneriler:

- Çok merkezli ve prospektif çalışmaların artırılması,
- Açıklanabilirlik ve kalibrasyonun raporlanması,
- Açık veri/kod paylaşımının teşvik edilmesi.

Klinisyenler için öneriler:

- AI sistemlerinin karar destek aracı olarak kullanılması,
- Eğitim süreçlerine entegrasyon,
- Hastalarla iletişimde şeffaflık ve etik hassasiyetin korunması.

KAYNAKÇA

[1] L. H. Duntas, “New insights into the hypothalamic-pituitary-thyroid axis,” Acta Endocrinol. (Bucharest), vol. 12, no. 2, p. 125, 2016.

[2] R. Hoermann, M. J. Pekker, J. E. Midgley, R. Larisch, and J. W. Dietrich, “Principles of endocrine regulation: reconciling tensions between robustness in performance and adaptation to change,” Front. Endocrinol., vol. 13, p. 825107, 2022.

[3] X. Cheng, H. Zhang, S. Guan, Q. Zhao, and Y. Shan, “Receptor modulators associated with the hypothalamus-pituitary-thyroid axis,” Front. Pharmacol., vol. 14, p. 1291856, 2023.

[4] A. C. Guyton and J. E. Hall, Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. Elsevier, 2011.

[5] M. B. Zimmermann and K. Boelaert, “Iodine deficiency and thyroid disorders,” Lancet Diabetes Endocrinol., vol. 3, no. 4, pp. 286–295, 2015.

[6] A. Antonelli, S. M. Ferrari, A. Corrado, A. Di Domenicantonio, and P. Fallahi, “Autoimmune thyroid disorders,” Autoimmun. Rev., vol. 14, no. 2, pp. 174–180, 2015.

[7] X. Hu, Y. Chen, Y. Shen, R. Tian, Y. Sheng, and H. Que, “Global prevalence and epidemiological trends of Hashimoto's thyroiditis in adults: A systematic review and meta-analysis,” Front. Public Health, vol. 10, p. 1020709, 2022.

[8] S. Y. Lee and E. N. Pearce, “Hyperthyroidism: a review,” JAMA, vol. 330, no. 15, pp. 1472–1483, 2023.

[9] L. Chaker, D. S. Cooper, J. P. Walsh, and R. P. Peeters, “Hyperthyroidism,” Lancet, vol. 403, no. 10428, pp. 768–780, 2024.

[10] L. J. Liao, S. F. Hung, P. C. Cheng, and W. L. Hsu, “Ultrasonography of incidental thyroid nodules: A systematic review and meta-analysis of prevalence,” J. Med. Ultrasound, 2025, doi: 10.4103/jmu.jmu_30_25.

[11] D. Han, Y. Zhang, Y. Zhang, Y. Pei, X. Huang, L. Qin, and Y. Zhuo, “Analysis of the detection rate and related factors of thyroid nodules in the healthy population,” Open Life Sci., vol. 20, no. 1, p. 20251079, 2025.

[12] S. Z. Ali, Z. W. Baloch, B. Cochand-Priollet, F. C. Schmitt, P. Vielh, and P. A. VanderLaan, “The 2023 Bethesda system for reporting thyroid cytopathology,” Thyroid, vol. 33, no. 9, pp. 1039–1044, 2023.

[13] M. B. Zimmermann, “Iodine deficiency,” Endocr. Rev., vol. 30, no. 4, pp. 376–408, 2009.

[14] Z. Lyu, Y. Zhang, C. Sheng, Y. Huang, Q. Zhang, and K. Chen, “Global burden of thyroid cancer in 2022: Incidence and mortality estimates from GLOBOCAN,” Chin. Med. J., vol. 137, no. 21, pp. 2567–2576, 2024.

[15] F. N. Tessler, W. D. Middleton, E. G. Grant, J. K. Hoang, L. L. Berland, S. A. Teefey, and A. T. Stavros, “ACR thyroid imaging, reporting and data system (TI-RADS): white paper of the ACR TI-RADS committee,” J. Am. Coll. Radiol., vol. 14, no. 5, pp. 587–595, 2017.

[16] C. Durante, L. Hegedüs, A. Czarniecka, R. Paschke, G. Russ, F. Schmitt, and E. Papini, “2023 European Thyroid Association clinical practice guidelines for thyroid nodule management,” Eur. Thyroid J., vol. 12, no. 5, 2023.

[17] V. R. Sant, A. Radhachandran, V. Ivezic, D. T. Lee, M. J. Livhits, J. X. Wu, and W. Speier, “From bench-to-bedside: how artificial intelligence is changing thyroid

nodule diagnostics, a systematic review," J. Clin. Endocrinol. Metab., vol. 109, no. 7, pp. 1684–1693, 2024.
[18] G. R. Murray, "Note on the treatment of myxoedema by hypodermic injections of an extract of the thyroid gland of a sheep," BMJ, vol. 2, no. 1606, p. 796, 1891.
[19] B. S. Greenspan, M. S. Hofman, and J. Buscombe, "The accomplishments and legacy of Saul Hertz, MD," J. Nucl. Med., vol. 65, no. 4, pp. 659–663, 2024.
[20] G. A. Brent, "Mechanisms of thyroid hormone action," J. Clin. Invest., vol. 122, no. 9, pp. 3035–3043, 2012.
[21] S. Danzi and I. Klein, "Thyroid hormone and the cardiovascular system," Med. Clin. North Am., vol. 96, no. 2, pp. 257–268, 2012.
[22] M. Andersson, V. Karumbunathan, and M. B. Zimmermann, "Global iodine status in 2011 and trends over the past decade," J. Nutr., vol. 142, no. 4, pp. 744–750, 2012.
[23] S. Benvenga, G. Elia, F. Ragusa, S. R. Paparo, M. M. Sturniolo, S. M. Ferrari, ... and P. Fallahi, "Endocrine disruptors and thyroid autoimmunity," Best Pract. Res. Clin. Endocrinol. Metab., vol. 34, no. 1, p. 101377, 2020.
[24] J. Knezevic, C. Starchl, A. T. Berisha, and K. Amrein, "Thyroid-gut-axis: how does the microbiota influence thyroid function?," Nutrients, vol. 12, no. 6, p. 1769, 2020.
[25] C. Durante, G. Grani, L. Lamartina, S. Filetti, S. J. Mandel, and D. S. Cooper, "The diagnosis and management of thyroid nodules: a review," JAMA, vol. 319, no. 9, pp. 914–924, 2018.
[26] C. B. Jensen, M. C. Saucke, D. O. Francis, C. I. Voils, and S. C. Pitt, "From overdiagnosis to overtreatment of low-risk thyroid cancer: a thematic analysis of attitudes and beliefs of endocrinologists, surgeons, and patients," Thyroid, vol. 30, no. 5, pp. 696–703, 2020.
[27] C. Solomon, D. R. Petea-Balea, S. M. Dudea, I. Bene, C. A. Silaghi, and M. L. Lenghel, "Role of ultrasound elastography and contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in diagnosis and management of malignant thyroid nodules—An update," Diagnostics, vol. 15, no. 5, p. 599, 2025.
[28] C. Fumagalli and G. Serio, "Molecular testing in indeterminate thyroid nodules: an additional tool for clinical decision-making," Pathologica, vol. 115, no. 4, pp. 205–212, 2023.
[29] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, ... and D. Moher, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," BMJ, vol. 372, p. n71, 2021.
[30] G. S. Collins, K. G. M. Moons, R. D. Riley, ... and TRIPOD+AI Group, "TRIPOD+AI: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods," BMJ, vol. 385, p. e078378, 2024.
[31] P. F. Whiting, A. W. Rutjes, M. E. Westwood, S. Mallett, J. J. Deeks, J. B. Reitsma, ... and QUADAS-2 Group, "QUADAS-2: a revised tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies," Ann. Intern. Med., vol. 155, no. 8, pp. 529–536, 2011.
[32] A. S. Tejani, M. E. Klontzas, A. A. Gatti, J. T. Mongan, L. Moy, S. H. Park, ... and CLAIM 2024 Update Panel, "Checklist for artificial intelligence in medical imaging (CLAIM): 2024 update," Radiol. Artif. Intell., vol. 6, no. 4, p. e240300, 2024.
[33] K. G. Moons, R. F. Wolff, R. D. Riley, P. F. Whiting, M. Westwood, G. S. Collins, ... and S. Mallett, "PROBAST: a tool to assess risk of bias and

applicability of prediction model studies: explanation and elaboration," Ann. Intern. Med., vol. 170, no. 1, pp. W1–W33, 2019.
[34] P. M. Bossuyt, J. B. Reitsma, D. E. Bruns, C. A. Gatsonis, P. P. Glasziou, L. Irwig, ... and STARD Group, "STARD 2015: an updated list of essential items for reporting diagnostic accuracy studies," Radiology, vol. 277, no. 3, pp. 826–832, 2015.
[35] H. Du, F. Chen, H. Li, K. Wang, J. Zhang, J. Meng, ... and X. Zhu, "Deep-learning radiomics based on ultrasound can objectively evaluate thyroid nodules and assist in improving the diagnostic level of ultrasound physicians," Quant. Imaging Med. Surg., vol. 14, no. 8, pp. 5932–5945, 2024.
[36] J. Wang, N. Zheng, H. Wan, Q. Yao, S. Jia, X. Zhang, ... and Y. Zhang, "Deep learning models for thyroid nodules diagnosis of fine-needle aspiration biopsy: a retrospective, prospective, multicentre study in China," Lancet Digit. Health, vol. 6, no. 7, pp. e458–e469, 2024.
[37] L. Wu, Y. Zhou, M. Liu, S. Huang, Y. Su, X. Lai, ... and F. Dong, "Video-based AI module with raw-scale and ROI-scale information for thyroid nodule diagnosis," Heliyon, vol. 10, no. 19, p. e37924, 2024.
[38] Y. Yu, C. Zhao, R. Guo, Y. Zhang, X. Li, N. Liu, ... and J. Zhou, "Deep learning model based on ultrasound images predicts BRAF V600E mutation in papillary thyroid carcinoma," iScience, vol. 28, no. 5, 2025.
[39] R. Loor-Torres, M. Duran, D. Toro-Tobon, M. M. Chavez, O. Ponce, C. S. Jacome, ... and J. P. Brito, "A systematic review of natural language processing methods and applications in thyroidology," Mayo Clin. Proc. Digit. Health, vol. 2, no. 2, pp. 270–279, 2024.
[40] P. Tsou and C. J. Wu, "Classifying driver mutations of papillary thyroid carcinoma on whole slide image: an automated workflow applying deep convolutional neural network," Front. Endocrinol., vol. 15, p. 1395979, 2024.
[41] Y. Zimmermann, H. Zimmermann, and M. B. Zimmermann, "Deep learning in thyroid imaging: current progress and future prospects," Quant. Imaging Med. Surg., vol. 14, no. 6, pp. 3205–3215, 2024.

Büyük Dil Modelleri:Temeller, Uygulamalar ve Gelecek Yönelimler

Cüneyt ÖZDEMİR

GİRİŞ

Tiroid bezi, boynun ön kısmında, Âdem elmasının hemen altında yer alan küçük, kelebek şeklinde bir endokrin organdır. Boyut olarak küçük görünse de vücudun enerji dengesini ve metabolik hızını düzenleyen en önemli yapılardan biridir. Tiroid bezi folikül hücrelerinden sentezlenen T3 (triiyodotironin) ve T4 (tiroksin) hormonlarını salgılar. Bu hormonlar; hücrelerde enerji üretimi, oksijen tüketimi, protein sentezi ve ısı düzeni gibi yaşamsal süreçleri kontrol eder. Ayrıca büyüme, gelişme, sinir sistemi olgunlaşması ve kardiyovasküler sistemin sağlıklı işleyişi için de kritiktir [1,2].

YAPAY ZEKÂ ARAŞTIRMALARINDA DİL MODELLERİNİN ROLÜ

Büyük Dil Modelleri (LLM'ler), yapay zekânın (AI) dil anlayışını ve üretimini kökten dönüştürerek akademiden günlük yaşama geniş bir etki oluşturdu. 2022'de ChatGPT'nin popülerleşmesiyle, metin üretimi, çeviri, soru-cevap ve kod yazımı gibi görevler herkes için erişilebilir hale geldi. Ancak, Türkçe gibi eklemeli ve morfolojik açıdan zengin dillerde bu etki, veri kıtlığı ve yerel altyapı eksiklikleriyle sınırlı kaldı. Örneğin, bir Türkçe sohbet botunun "Naber?" sorusuna kültürel bağlama uygun, doğal bir yanıt vermesi, yalnızca model ölçeği değil, Türkçe'ye özgü dil bilgisi ve veri kalitesi gerektirir. Bu bölüm, LLM'lerin kuramsal temellerini, tarihsel evrimini, uygulama alanlarını ve Türkçe bağlamındaki potansiyelini sistematik biçimde ele alırken, gelecekteki yönelimleri (multimodalite, etik AI, düşük kaynaklı diller) tartışmayı amaçlar.

Doğal Dil İşleme (NLP), yapay zekânın bir alt disiplini olarak, dili biçimsel modellerle temsil ederek metin ve ses verileri üzerinden anlama, üretim ve etkileşim sistemleri geliştirir. Bu alanın temel taşı olan dil modelleri, erken dönem olasılıksal yaklaşımlardan (örneğin n-gram modelleri) günümüzün derin sinir ağlarına evrilerek, makine çevirisi, soru-cevap, özetleme, bilgi çıkarımı ve diyalog sistemleri gibi pek çok görevin omurgasını oluşturmuştur. Bu evrimin dönüm noktası, 2017'de tanıtılan Transformer mimarisidir: Tekrarlayan katmanlar (RNN/LSTM) yerine self-attention mekanizmasını kullanan bu yapı, ardışık işlem sınırlamalarını aşarak hem doğruluk hem de eğitim verimliliğinde çarpıcı bir sıçrama sağlamış ve modern LLM'lerin temelini atmıştır [1].

Transformer, dizideki tüm kelimeleri aynı anda görerek her kelimenin diğerleriyle ilişkisini "dikkat" ağırlıklarıyla hesaplar. Pratikte bu, hangi

kelimenin hangisine ne kadar dikkat etmesi gerektiğini öğrenmek demektir; böylece uzak bağıntılar tek adımda yakalanır ve model paralel çalışabildiği için büyük veri üzerinde hızlı/ölçeklenebilir eğitim yapılır [1].

Transformer'ı takip eden ölçekleme çalışmaları (parametre sayısı, veri hacmi ve hesaplama gücünün artırılması), modellerin göreve özgü ince ayar (fine-tuning) olmaksızın bile üstün performans sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, GPT-3 (yaklaşık 175 milyar parametre), yalnızca istem (prompt) içine yerleştirilen birkaç örnekle (few-shot) veya hiç örnek olmadan (zero-shot) bağlam içi öğrenme (in-context learning) yaparak çeşitli görevlerde rekabetçi sonuçlar üretmiştir. Kısaca, model ağırlıklarını güncellemeden, istemdeki desenlerden görevi "anlayarak" genelleme yapar.

Ne var ki, salt ölçekleme, modellerin kullanıcı niyetine uyumlu ve güvenli yanıtlar üretmesini garanti etmez. Bu açığı gidermek için geliştirilen insan geri bildirimiyle pekiştirmeli öğrenme (RLHF), model çıktılarını insan tercihlerine göre hizalar: Tercih karşılaştırmaları (örneğin insan notları) üzerinden öğrenen model, yönergeleri daha sadakatle izler ve riskli içerikleri minimize eder. RLHF, ölçekle kazanılan yetenekleri kullanıcı odaklı, etik bir davranışa dönüştüren vazgeçilmez bir katman olarak konumlanır [3].

Transformer temelli sıçrama ve ölçekleme eğiliminin yerel dillere (ör. Türkçe) yansıması, yalnız mimariyle değil, araştırma altyapısının olgunluğu ile de belirlenir. Türkçe gibi eklemeli ve zengin biçimbirimsel dillerde bu altyapı üç bileşenden beslenir:

i. *Açık kaynak morfolojik araçlar*. Zemberek, yazım denetimi, kök-ek ayrıştırma ve temel ön-işleme modülleriyle uzun süredir standart bir başvuru noktasıdır [4]; TRmorph ise iki-düzeyli kurallar üzerinden çalışan kapsamlı bir Türkçe biçimbirim çözümleyicisi olarak veri temizleme, normalizasyon ve özellik çıkarımında yaygın biçimde kullanılır [70]. Bu araçlar, sözcükleri kök ve eklerine ayırıp kip, kişi, zaman, çokluk gibi etiketleri çıkardığı için hem ön-eğitim verisinin kalitesini artırır hem de denetimli görevler için etiketli örnek üretimini kolaylaştırır.
ii. *Ağaçbanklar*. IMST-UD, Türkçe için Universal Dependencies ilkelerine dönüştürülmüş geniş kapsamlı bağımlılık ağacı verisi sunarak ayrıştırıcı (parser) eğitimi ve karşılaştırılabilir değerlendirme için ortak bir zemin sağlar [71].
iii. *Hizmet/API katmanı*. İTÜ Turkish NLP Web Service, yerel kurulum gerektirmeden biçimbirim çözümleme, adlandırılmış varlık tanıma ve bağımlılık ayrıştırma gibi bileşenleri HTTP üzerinden erişilebilir kılar; bu da tekrarlanabilirliği artırır ve kurulum/altyapı maliyetlerini düşürür [5].

Bu yerel altyapı (araçlar, ağaçbanklar ve servisler), Türkçe LLM çalışmalarında ön-eğitim, ince ayar ve değerlendirme süreçlerini

destekleyerek mimari yeniliklerin pratik performansa dönüşmesini sağlar: Veri kalitesi, etiket standartları ve hızlı prototipleme fırsatları sunar.

BÜYÜK DİL MODELLERİ KAVRAMININ ORTAYA ÇIKIŞI

Büyük Dil Modelleri (LLM'ler), yalnızca "çok parametreli bir sinir ağı"ndan ibaret değildir; veri, mimari ve hesaplama gücünün eşzamanlı olgunlaşmasıyla doğmuştur:

- *Veri*: Çeşitli kaynaklardan toplanmış çok büyük metin yığını. Kaliteli ve dengeli veri, modelin genellemesini belirler [33], [34], [37].
- *Mimari*: Transformer gibi, uzun cümlelerdeki uzak ilişkileri aynı anda görebilen ve paralel eğitilebilen bir yapı [1].
- *Öğrenme + Hesap*: Büyük ölçekli ön-eğitim (tek bir modelin birçok görevi öğrenmesi için) ve bunu mümkün kılan hesap altyapısı (dağıtık/çok GPU'lu eğitim) [26], [31].

Bu sentez, "her göreve özgü küçük modeller" döneminden, tek bir ön-eğitimli modelin geniş yelpazede görevleri üstlendiği "genel amaçlı zekâ" dönemine geçişi temsil eder.

KISA ZAMAN ÇİZELGESİ: LLM'LERE GİDEN YOL

2017 — Transformer: Dikkat (self-attention) temelli tasarım, RNN/LSTM hattının yerini büyük ölçüde alarak modern ön-eğitimin zeminini attı [1].

2018–2020 — Ön-eğit ve uyarlama: BERT ve T5, geniş metin üzerinde ön-eğitilip farklı görevlere kolayca uyarlanabileceğini (tek çatı altında "metin-metne" yaklaşım) gösterdi [8], [26].

2020 — Ölçek etkisi ve GPT-3:

Ölçek yasaları: Model büyüdükçe (parametre/veri/hesap), hata tahmin edilebilir biçimde azalır [20].

GPT-3: Çok büyük bir model, yalnızca isteme yerleştirilen birkaç örnekten "bağlam-içi öğrenme" yaparak pek çok görevde iyi sonuç verdi; "genel amaçlı model" fikrini görünür kıldı [2].

2022 — Optimum denge (Chinchilla): Başarıyı sadece parametre sayısı değil, parametre–veri dengesi belirler; sabit hesapta "daha küçük model + daha çok/iyi veri" çoğu kez daha iyidir [6]. Bu bulgu, veri kalitesine (filtreleme, çeşitlilik, dédüplikasyon) stratejik ağırlık verilmesini gerektirir [33], [37].

Altyapı ve veri ekosistemi: Çok büyük modelleri eğitmek için dağıtık paralellik (ör. Megatron-LM) ve büyük, seçilmiş veri kümeleri (C4/T5; The Pile; RefinedWeb) standart hale geldi [31], [26], [33], [34].

RAG (Arayıp-Sonra Üret): Parametre içi bilgiyi dış arama ile tamamlayıp özellikle bilgi-yoğun görevlerde doğruluğu artırma fikri yaygınlaştı [7].

Bugün "LLM" dediğimizde neyi kastediyoruz?

Yüz milyonlardan trilyonlara uzanan ölçekte, çok büyük ve çeşitli metinlerle ön-eğitilmiş, çoğu zaman asgari uyarlamayla (hatta yalnızca iyi tasarlanmış istemlerle) özetleme, soru-cevap, çeviri, muhakeme ve kod yazma gibi pek çok görevi yerine getirebilen modellerden söz ediyoruz. Gerektiğinde model, RAG ile dış bilgiye başvurup halüsinasyonları azaltabilir [2,7].

Türkçe'ye yansıması

Türkçe gibi eklemeli ve zengin biçimbirimsel dillerde, BERT çizgisinin Türkçe uyarlamaları (ör. BERTurk, BioBERTurk) geniş ölçekli ön-eğitimin faydasını somutlaştırdı: adlandırılmış varlık tanıma, duygu analizi ve alan-özgül sınıflama gibi görevlerde sağlam bir taban sağlandı [8]. Bir sonraki bölümde, bu başarının arkasındaki yerel altyapıyı (morfolojik araçlar, ağaçbanklar, servisler) ve LLM projelerine nasıl omurga olduğunu detaylandıracağız [8].

Bölümün amacı ve kapsamı

Bu bölümün amacı, LLM'leri kuramsal temelleri, tarihsel gelişimi, başlıca mimari/öğrenme bileşenleri ve uygulama alanları açısından sistematik biçimde ortaya koymaktır. Özellikle:

- Transformer temelleri, ön-eğitim/ince-ayar, talimat izleme ve RLHF gibi öğrenme şemaları ile ölçek yasaları üzerinden LLM'lerin ölçeklenebilirlik ve genelleme kapasiteleri tartışılacaktır.
- Metin üretimi, özetleme, soru-cevap ve RAG destekli bilgi-yoğun görevler gibi uygulama eksenleri kısaca çerçevelenecektir.
- Etik ve güvenlik (önyargı, halüsinasyon, telif ve enerji maliyeti) tartışmalarına giriş niteliğinde temas edilecek; ayrıntılı analiz ilgili bölüm(ler)e bırakılacaktır.
- Türkçe bağlamında Zemberek/IMST-UD gibi kaynaklar ile BERTurk/BioBERTurk çizgisi üzerinden ön-eğitimin yerel dillere etkisi kısaca örneklendirilecektir.

Bu bölüm boyunca anlatımı somutlamak için, genel LLM dinamiklerini göstermek üzere GPT-3'ün bağlam-içi öğrenme bulgularına ve Türkçe'de BERTurk/BioBERTurk'ün alan-özgül uyarlamalarına referans verilecek; böylece büyük ölçekli ön-eğitimin hem genel hem de yerel/dil-özgül etkileri birlikte ele alınacaktır.

DOĞAL DİL İŞLEMENİN EVRİMİ VE LLM'LERE GİDEN YOL

İstatistiksel Dönem: N-Gramlar Ve Düzgünleştirme

Erken dönem NLP'de dil modelleme çoğunlukla n-gram istatistiklerine dayanıyordu: model, bir kelimenin olasılığını yalnızca önceki n-1 kelimeye bakarak tahmin eder (ör. trigram: "önceki iki kelime → sıradaki kelime"). Gerçekte ise dil çok çeşitlidir; eğitim verisinde ortaya çıkmayan ama makul pek çok kelime dizisi vardır. Bu veri seyrekliği sorununu azaltmak için düzgünleştirme (smoothing) yöntemleri geliştirildi. Katz back-off, yüksek dereceli n-gram görülmediğinde daha düşük dereceli istatistiklere "geri çekilerek" olasılık atar [9]. Kneser–Ney ailesi ise bu fikri iyileştirip belirli dizilerin yalnızca sıklığına değil, kelimelerin farklı bağlamlarda "devam etme" eğilimine de ağırlık vererek sistematik kazanımlar sağlar [10]. Değerlendirmede perplexity (kabaca "modelin ortalama şaşkınlığı") standart ölçüt haline gelmiş; özellikle konuşma tanıma bağlamında yaygınca kullanılmıştır—daha düşük perplexity, daha iyi dil modeli demektir [11]. Bu istatistiksel çizgi, zamanla dağıtımsal temsiller ve sinir ağları ile yer değiştirerek günümüz nöral dil modellerine evrilmiştir.

Dağıtımsal temsiller ve nöral dil modelleri

Dağıtımsal anlambilime dayalı nöral olasılıksal dil modeli (Neural Probabilistic Language Model), sözcükleri sürekli vektör temsilleriyle ifade ederek n-gram modellerinin karşılaştığı boyutsallık laneti (curse of dimensionality) sorununu hafifletmeyi hedefledi [12]. Bu yaklaşım, sözcüklerin anlamsal yakınlıklarını düşük boyutlu vektör uzaylarında öğrenerek, istatistiksel dil modellemesini daha verimli hale getirdi.

Bu temelin üzerine inşa edilen atılımlar, büyük ölçekli metin verilerinde etkili gömme (embedding) yöntemleriyle geldi: Word2Vec (2013), skip-gram ve CBOW (Continuous Bag of Words) modelleriyle, kelimelerin bağlamsal ilişkilerini hızlı ve ölçeklenebilir şekilde öğrendi; GloVe (2014) ise küresel eş-oluşum istatistiklerine dayalı vektör temsilleriyle, anlamsal ilişkileri daha sağlam yakaladı [13, 14]. Bu gömmeler, duygu analizi,

adlandırılmış varlık tanıma ve makine çevirisi gibi birçok NLP alt görevinin temel yapı taşını oluşturdu.

Bu statik gömme modellerini takiben, bağlama duyarlı (contextual) temsillerin yükselişiyle önemli bir geçiş yaşandı. ELMo (2018), kelimeleri sabit vektörler yerine bağlama göre dinamik temsillerle ifade ederek, aynı kelimenin farklı bağlamlarda farklı anlamlarını yakaladı [16]. ULMFiT (2018) ise ön-eğitim ve ince ayar (pre-training + fine-tuning) paradigmasını popülerleştirdi; genel bir dil modeli üzerinde ön-eğitim yaptıktan sonra görev-özgü ince ayar ile yüksek performans elde edilebileceğini gösterdi [15]. Bu iki çalışma, statik gömmelerden bağlama duyarlı ve transfer öğrenmeye dayalı modern dil modellerine geçişte köprü rolü oynadı; böylece büyük dil modelleri (LLM'ler) çağının zeminini hazırladı.

Diziden diziye (seq2seq) ve dikkat (attention)

Nöral encoder-decoder mimarileri, kaynaktan hedefe uçtan uca öğrenme ile makine çevirisinde önemli bir dönüm noktası oluşturdu.. RNN tabanlı encoder-decoder modelleri ve genel seq2seq (diziden diziye) çerçevesi, bu dönüşümün temelini oluşturdu; giriş dizisini (örneğin, kaynak dildeki cümleyi) sabit uzunluklu bir vektöre kodlayan encoder ve bu vektörü hedef diziye (örneğin, hedef dildeki cümleye) çeviren decoder ile çalışır [13, 14]. Ancak, sabit uzunluklu ara temsiller, uzun cümlelerde bilgi kaybına yol açarak performans darboğazı oluşturuyordu.

Bu sorunu çözmek için Bahdanau dikkat mekanizması (2014) tanıtıldı. Bu mekanizma, her hedef sözcük üretilirken kaynaktaki ilgili kısımlara dinamik olarak odaklanan "yumuşak hizalama" (align-and-translate) yaklaşımıyla, bilgi kaybını azalttı ve çeviri kalitesini önemli ölçüde iyileştirdi [15]. Dikkat mekanizması, her adımda hangi kaynak sözcüklere ağırlık verileceğini öğrenerek bağlamsal ilişkileri daha etkili yakaladı. Bu yenilik, Transformer mimarisinin self-attention mekanizmasına zemin hazırladı; Transformer, dikkat tabanlı yapısıyla seq2seq modellerini yeniden tanımladı ve modern dil modellerinin temel taşı haline geldi [1].

Alt-birim (subword) belirteçleme

Açık sözlük sorunu (open-vocabulary problem), özellikle Türkçe gibi morfolojik açıdan zengin ve eklemeli dillerde belirgindir. Yalnızca kelime tabanlı modeller kullanıldığında, eğitim verisinde hiç görülmeyen veya çok nadir olan sözcükler karşısında model yetersiz kalır. Bu sorunu aşmak için, kelimeleri daha küçük birimlere (alt-birimlere) ayıran belirteçleme yöntemleri geliştirilmiştir. Böylece nadir kelimeler ve ek varyantları daha iyi temsil edilirken, hem modelin genelleme kapasitesi artar hem de sözlük boyutu yönetilebilir kalır.

Yöntemler ve yaklaşımlar:

- Byte-Pair Encoding (BPE): Sık görülen karakter dizilerini birleştirerek alt-birim sözlüğü oluşturur. Bu yaklaşım, özellikle eklemeli dillerde nadir kelimelerin ve ek varyantlarının daha iyi temsilini sağlar [10].
- WordPiece: BPE'ye benzer biçimde çalışır, ancak olasılıksal optimizasyon içerir. Bu sayede üretim ortamlarında daha verimli olur. Örneğin, BERT modelinde kullanılan belirteçleme yöntemidir [17].
- SentencePiece ve Unigram LM: Önceden belirteçleme (pre-tokenization) gerektirmeden, ham metinden dil bağımsız (agnostik) alt-birimler öğrenilmesini sağlar. SentencePiece, hem BPE hem de Unigram LM'yi destekler. Ayrıca Subword Regularization yöntemi ile eğitim sırasında birden fazla ayrıştırma örneği kullanarak modelin sağlamlığını artırır [18], [19].

Uygulama alanı: Bu yöntemler, çok dilli modellerde (XLM-R gibi) ve üretken görevlerde (çeviri, metin üretimi) kritik bir rol oynar. Özellikle Türkçe gibi eklemeli dillerde, biçimbirimsel zenginlik bu stratejiler sayesinde daha etkili biçimde yakalanır.

Türkçe bağlamı: Alt-birim belirteçleme, Zemberek gibi morfolojik çözümleyicilerle birleştirildiğinde, kelime kökleri ve ekleri doğru biçimde ayrıştırılabilir. Bu da ön-eğitim verisinin kalitesini artırır ve modelin bağlamsal anlamı kavrama gücünü güçlendirir [4].

Transformer devrimi ve ölçeklenebilirlik

Transformer mimarisi, tamamen self-attention mekanizmasına dayalı paralelleştirilebilir yapısıyla, RNN ve CNN tabanlı sıralı modellerin sınırlamalarını aşarak NLP alanında yeni bir dönem başlattı. Geleneksel ardışık modellerin aksine, Transformer tüm diziyi aynı anda işler ve uzun menzilli bağıntıları etkili bir şekilde yakalar. WMT (Workshop on Machine Translation) çeviri görevlerinde, Transformer hem en iyi performansı (state-of-the-art, SOTA) elde etti hem de eğitim sürelerini önemli ölçüde kısalttı [1]. Bu, büyük veri kümelerinde hızlı ve ölçeklenebilir öğrenmeyi mümkün kıldı.

Bunu izleyen çalışmalar, ölçek yasaları (scaling laws) ile model performansının parametre sayısı, veri hacmi ve hesaplama gücü (FLOP) artışıyla düzenli bir şekilde iyileştiğini gösterdi. Test kaybı, bu üç faktörün güç yasasına (power-law) bağlı olarak azaldı [20]. Chinchilla çalışması (2022), sabit bir hesaplama bütçesinde parametre-token dengesinin kritik olduğunu ortaya koydu: Daha küçük bir modelin daha fazla ve kaliteli veriyle eğitilmesi, genellikle daha büyük ama az veriyle eğitilmiş modellerden üstün performans sağlar [6]. Bu bulgu, LLM'lerin başarısını yalnızca parametre sayısına değil, veri kalitesi ve miktarına uygun şekilde dengelenmiş ön-eğitim süreçlerine bağlar.

Bu çerçeve, LLM'leri "büyük parametreli" olmaktan öte, optimize edilmiş veri ve hesaplama stratejilerinin bir ürünü olarak tanımlar. Örneğin, veri deduplikasyonu ve kaliteli filtreleme, genelleme kapasitesini artırırken eğitim verimliliğini yükseltir [33, 37]. Transformer'ın paralelleştirilebilir yapısı, Megatron-LM gibi dağıtık eğitim çerçeveleriyle birleştiğinde, çok milyar parametreli modellerin pratikte eğitilmesini mümkün kılmıştır [31].

BÜYÜK DİL MODELLERİNİN TEMELLERİ

Transformer Mimarisi: Self-Attention Ve Katmanlı Yapı

Transformer mimarisi, tekrarlayan (RNN) veya evrişimsel (CNN) yapılar yerine tamamen self-attention mekanizmasına dayanarak dizisel veriyi işler. Bu yaklaşım, sıralı işlem zorunluluğunu ortadan kaldırır ve paralel hesaplamayı mümkün kılar. Temel bileşenleri şunlardır: çoklu-başlıklı self-attention (birden fazla dikkat mekanizmasıyla farklı bağlamsal ilişkileri yakalar), konum kodlamaları (sözcüklerin dizideki sıralarını temsil eder), konumsal doğrusal olmayan besleme ağları (her belirteç için bağımsız doğrusal dönüşüm), artık bağlantılar (katmanlar arası bilgi akışını kolaylaştırır) ve katman normalizasyonu (eğitim stabilitesini artırır). Bu yapı, hem paralelleştirilebilirliği güçlendirir hem de uzun menzilli bağıntıları etkili bir şekilde modellemeyi sağlar [1].

Self-attention katmanının hesaplama karmaşıklığı, dizi uzunluğunun karesiyle ölçeklenir ($O(n^2)$), bu da uzun bağlamlarda bellek ve hesaplama maliyetini ciddi şekilde artırır. Bu darboğazı aşmak için iki ana yaklaşım geliştirilmiştir:

- Verimli/seyrek dikkat mekanizmaları:
    - Longformer, yerel kaydırmalı ve küresel dikkat desenlerini birleştirerek yaklaşık doğrusal ölçeklenebilirlik ($O(n)$) sağlar [21].
    - BigBird, rastgele pencereli ve seyrek dikkat desenleriyle teorik ifade gücünü korurken doğrusal karmaşıklık sunar [22].
    - Performer, çekirdek yaklaştırmaları (FAVOR+) kullanarak dikkat hesaplamalarını doğrusal zaman ve uzay karmaşıklığına indirger [23].
- IO-farkındalıklı kesin dikkat:

- FlashAttention, HBM↔SRAM bellek trafiğini döşemeli (tiling) hesaplamalarla optimize ederek dikkat mekanizmasının duvar saati süresini hızlandırır; böylece uzun bağlam pencereleri pratikte daha uygulanabilir hale gelir [24].

Konumsal bilginin temsili, klasik sinüzoidal kodlamaların ötesine geçmiştir. Rotary Positional Embedding (RoPE), sorgu-anahtar uzayında dönmelerle göreli konumu doğrudan dikkat skorlarına işler; uzun bağlama genelleme ve "train-short, test-long" senaryolarında daha istikrarlı davranış raporlanmıştır [25].

Özetle: Transformer'ın katmanlı mimarisi ve self-attention, ölçeklenebilir öğrenmeyi mümkün kıldı; ancak $O(n^2)$ dikkatin hesap/bellek maliyeti, seyrek/lineer dikkat ve IO-farkındalıklı algoritmalarla pratikte yönetilir [1],[22]–[25].

Ön eğitim (pre-training) ve ince ayar (fine-tuning) süreçleri

Ön eğitim, büyük dil modellerinin (LLM'ler) geniş ölçekli metin verileri üzerinde genel dil bilgisi ve bağlamsal anlayış kazanmasını sağlar. İki temel ön eğitim hedefi öne çıkar:

i. Maskeli Dil Modelleme (MLM): BERT gibi modeller, giriş metnindeki bazı belirteçleri (token) gizleyerek, iki yönlü bağlamdan (önceki ve sonraki kelimeler) bu belirteçleri tahmin etmeyi öğrenir. Bu, bağlama duyarlı temsiller oluşturmada etkilidir [8].

ii. Nedensel (Oto-regresif) Dil Modelleme (CLM): GPT ailesi gibi modeller, bir metindeki sıradaki belirteci soldan sağa tahmin eder. Ölçek büyüdükçe, bu modeller görev-özgü uyarlama olmadan bile güçlü few-shot öğrenme yetenekleri sergiler [2].

T5 ailesi ise farklı bir yaklaşım benimser: Tüm görevleri "metin-metne" çerçevesine dönüştürerek, metindeki rastgele aralıkları bozup (span corruption) bunları yeniden oluşturmayı öğrenir. Bu denoising hedefi, çoklu görevlerde genelleme sağlar [26].

İnce ayar (fine-tuning), ön-eğitimli modellerin belirli görevlere uyarlanmasını sağlar. Geleneksel tam ince ayar, tüm model parametrelerini günceller; ancak bu, yüksek hesaplama ve bellek maliyeti nedeniyle pratikte sınırlıdır. Bu nedenle, parametre-verimli ince ayar (PEFT) yöntemleri geliştirilmiştir:

- Adapter modülleri, katmanlar arasına küçük, görev-özgü "şişe-boyun" katmanları ekler ve yalnızca bu katmanları eğitir [27].
- LoRA (Low-Rank Adaptation), çekirdek modeli dondurarak yalnızca düşük-rütbeli güncelleme matrislerini eğitir; böylece milyonlarca parametreyle verimli uyarlama sağlar [28].

- QLoRA, 4-bit nicemlenmiş (quantized) bir taban model üzerinde LoRA'yı kullanarak, tek bir GPU'da 65 milyar parametreli modellere kadar ince ayar yapmayı mümkün kılar [29].

Ayrıca, yönerge ince ayarı (instruction tuning), çok görevli yönerge veri setleri (örneğin, FLAN) üzerinde ince ayar yaparak, modelin sıfır-örnek (zero-shot) performansını sistematik olarak artırır. Bu, modelin talimatları daha iyi anlamasını ve genellemesini sağlar [30].

Pratik Çıkarım: İnce ayar yöntemi, hedef görev ve mevcut kaynaklara göre seçilmelidir. Denetimli ve dar kapsamlı görevlerde Adapter veya LoRA, düşük kaynaklı ortamlarda QLoRA, geniş görev yelpazesinde ise yönerge ince ayarı en yüksek verimi sunar [2, 6, 8, 20, 26–30].

Parametre ölçeği ve hesaplama gereksinimleri

Büyük dil modellerinin (LLM'ler) performansı, ölçek yasaları (scaling laws) ile modellenir: Model kaybı, parametre sayısı, veri boyutu ve hesaplama gücü (FLOP) ile güç yasası (power-law) ilişkisi gösterir [20]. Chinchilla çalışması (2022), sabit bir hesaplama bütçesinde daha küçük bir modelin daha fazla ve kaliteli veriyle eğitilmesinin genellikle daha iyi performans sunduğunu ortaya koydu. Bu, önceki nesil "aşırı büyük ancak az verili" modellerin (örneğin, GPT-3) yetersiz eğitildiğini gösterir; optimal parametre-token dengesi, eğitim verimliliğini artırır [6].

Bu ölçekte eğitim, ileri düzey paralelleştirme teknikleri gerektirir:

- Megatron-LM, iç-katman bölmeli (intra-layer) paralellik ve birleşik boru hattı (pipeline) stratejileriyle, çok milyar parametreli modellerin GPU kümelerinde eğitilmesini mümkün kılar [31].

- Verimli optimizasyon ve iletişim, dağıtık eğitimde kritik önemdedir; ZeRO gibi yöntemler, bellek kullanımını optimize ederek büyük ölçekli eğitimi destekler [32].

Hesaplama maliyetini etkileyen bir diğer faktör, bağlam uzunluğudur. Self-attention'ın $O(n^2)$ karmaşıklığı, uzun bağlamlarda eğitim ve çıkarım maliyetini hızla artırır. FlashAttention, IO-farkındalıklı döşemeli hesaplamalarla bu maliyeti azaltır [24]. Longformer, BigBird ve Performer gibi seyrek dikkat mimarileri, yerel veya rastgele dikkat desenleriyle yaklaşık doğrusal karmaşıklık ($O(n)$) sunarak uzun bağlamları uygulanabilir kılar [21–23].

Veri boyutu, çeşitliliği ve öğrenme kapasitesi

Büyük dil modellerinin (LLM'ler) performansı, yalnızca model ölçeğine değil, aynı zamanda veri miktarı ve çeşitliliğine de bağlıdır. The Pile, 22 farklı kaynaktan (kitaplar, akademik makaleler, kod depoları vb.) derlenen 825 GiB'lik çok alanlı bir veri seti olarak, ham web verilerine kıyasla daha güçlü genelleme sağlar [33]. C4 (Colossal Clean Crawled Corpus), T5

modelinin ön eğitiminde kullanılan, Common Crawl'dan titizlikle filtrelenmiş devasa bir İngilizce korpustur ve geniş ölçekli ön eğitimin temel taşlarından biridir. Ancak, sonraki çalışmalar, filtreleme yöntemlerinin kapsayıcılık ve veri kalitesi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir [3, 26]. Falcon'un RefinedWeb veri seti, agresif filtreleme ve deduplikasyon uygulanmış web verileriyle trilyonlarca belirteç toplayarak, küratörlü veri setlerini aşan modellerin eğitilebileceğini savunur [34].

Çok dillilik ve düşük kaynaklı diller: CCNet ve CC-100, Common Crawl'dan otomatikleştirilmiş yüksek kaliteli tek dilli veri çıkarımı sağlayarak, XLM-R gibi çok dilli modellerin başarısını mümkün kılmıştır. Bu veri hatları, özellikle düşük kaynaklı dillerde (örneğin, Türkçe) genelleme kapasitesini artırır [35, 36]. Türkçe bağlamında, Zemberek gibi morfolojik araçlarla ön işleme, veri kalitesini yükselterek çok dilli modellerin eklemeli dil yapısına uyumunu güçlendirir [4].

Veri kalitesi ve tekrarların etkisi: Büyük web korpuslarında yinelenen (near-duplicate) dizeler yaygındır; bunlar, modelin ezberleme (memorization) riskini ve değerlendirme sızıntısını (data leakage) artırır. Deduplikasyon, ezberlenmiş çıktıları azaltır, eğitim için gereken adım sayısını düşürür ve gizlilik risklerini hafifletir [37, 38]. Ayrıca, toksisite filtreleri ve kaliteli veri seçimi, modelin etik ve güvenilir çıktılar üretmesine katkıda bulunur.

Pratik Çıkarım: Chinchilla ilkesine göre, "daha az ama daha iyi veri" yaklaşımı, aynı hesaplama bütçesiyle daha yüksek performans sağlar. Yüksek çeşitlilik, agresif deduplikasyon, toksisite/kalite filtreleri ve uzun kuyruk (long-tail) alanlardan örnekleme, daha verimli ve genelleyici modeller üretir [6, 33–38].

UYGULAMA ALANLARI VE DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ

Uygulama alanları

Büyük dil modelleri (LLM'ler), çok çeşitli görevlerde kullanılır ve her biri için özel değerlendirme ölçütleri geliştirilmiştir:

I. Metin Üretimi ve Özetleme: Özetleme görevlerinde, klasik n-gram tabanlı ölçütler olan ROUGE [40] ve BLEU [39] uzun süredir kullanılmaktadır; ancak, bu ölçütler semantik benzerliği yakalamada sınırlıdır. BERTScore, bağlamsal gömme (embedding) temsillerine

dayanarak insan yargılarıyla daha yüksek korelasyon sağlar [41]. BLEURT, öğrenilmiş bir metrik olarak daha tutarlı sonuçlar sunar [43]. Olgusal tutarlılık için QAGS ve FactCC gibi denetim yöntemleri, üretilen metnin doğruluğunu değerlendirmede tamamlayıcı rol oynar [56, 57].

II. Soru-Cevap (QA) ve Bilgiye Dayalı Sistemler: Okuduğunu anlama görevlerinde SQuAD veri seti ve EM (Exact Match) ile F1 ölçütleri standarttır [44]. Açık-alan ve kurumsal senaryolarda, RAG (Retrieval-Augmented Generation) mimarileri, dış kaynaklardan alınan pasajlarla halüsinasyonu azaltır ve bilgi kapsama alanını genişletir [7]. RAGAS, referanssız değerlendirme için "bağlama sadakati, yanıt ilgililiği, bağlam geri çağrımı ve isabeti" gibi boyutları ölçer [58].
III. Makine Çevirisi: Tarihsel olarak BLEU baskın olsa da [39], morfolojik olarak zengin dillerde (örneğin, Türkçe) chrF ve chrF++, karakter n-gram tabanlı yaklaşımlarıyla daha tutarlı sonuçlar verir [60]. Öğrenilmiş metrikler COMET ve BLEURT, insan yargılarına daha yakın sıralamalar sağlar [42, 43].
IV. Kod Üretimi: Değerlendirme, genellikle birim test tabanlı pass@k ölçütüyle yapılır; HumanEval ve MBPP en yaygın kıyaslama veri setleridir [49, 50]. Veri sızıntısı ve test kapsamı sorunları nedeniyle, daha zorlayıcı varyantlar (örneğin, HumanEval+) tercih edilir.
V. Muhakeme ve Genel Yetenek: Genel doğal dil anlama (NLU) yetenekleri, GLUE ve SuperGLUE kıyaslamalarıyla ölçülür [45]. HellaSwag ortak akıl muhakemesini, MMLU 57 alanda çoktan seçmeli bilgi testini, BIG-bench 200'den fazla görevi ve GSM8K ilkokul düzeyi matematik problemlerini değerlendirir [46–48, 51].
VI. Alan-Özgü Uygulamalar: Sağlık alanında Med-PaLM ve Med-PaLM 2, USMLE tipi sorularda yüksek doğruluk ve klinik fayda sunar; ancak, gerçek dünya uygulamalarında insan denetimi şarttır [55]. Türkçe bağlamında, BioBERTurk gibi modeller, biyomedikal metinlerde adlandırılmış varlık tanıma ve duygu analizi gibi görevlerde Zemberek destekli veri ön-işlemesiyle başarı gösterir [4, 73].

Değerlendirme ölçütleri ve protokoller

Büyük dil modellerinin (LLM'ler) performansını değerlendirmek için çeşitli ölçütler ve protokoller kullanılır. Bu ölçütler, modelin yeteneklerini, güvenilirliğini ve etik uygunluğunu farklı boyutlarda analiz eder:

[1.] İçsel Ölçütler: Perplexity, olasılıksal dil modelinin bir metindeki "sürpriz" derecesini ölçer; düşük perplexity, modelin metni daha iyi tahmin ettiğini gösterir. Ancak, üretim kalitesi ve kullanıcı

tercihleriyle her zaman korele değildir, bu nedenle dış görev metrikleriyle birlikte değerlendirilir [55, 62].(b) Referans-Tabanlı Otomatik Metrikler:

a. BLEU (makine çevirisi) ve ROUGE (özetleme), n-gram örtüşmesine dayalı hızlı ve yaygın metriklerdir [39, 40]. Ancak, parametreleştirme ve ön işleme farklılıkları karşılaştırılabilirliği zayıflatabilir.
b. BERTScore, BLEURT ve COMET, bağlamsal gömmeler ve öğrenilmiş modellerle semantik hizalamada daha yüksek insan korelasyonu sağlar [41–43].

[2.] Görev ve Kıyaslama Tabanlı Ölçüm:

a. Genel doğal dil anlama (NLU) için GLUE, SuperGLUE, HellaSwag, MMLU, BIG-bench ve GSM8K kıyaslamaları kullanılır [45–48, 51].
b. Okuduğunu anlama (RC) ve soru-cevap (QA) için SQuAD, EM (Exact Match) ve F1 skorlarıyla değerlendirilir [44].
c. Kod üretimi için HumanEval ve MBPP veri setlerinde pass@k ölçütü standarttır [49, 50].

[3.] Diyalog ve Tercih Değerlendirmesi: Geniş yetenekli sohbet sistemlerinde, insan tercihine hizalı değerlendirme için MT-Bench ve Chatbot Arena kullanılır. LLM-as-a-Judge yaklaşımı, pozisyon, kelime sayısı (verbosity) ve kendini yüceltme önyargıları içerebilir; bu nedenle insan yargısıyla kalibrasyon önerilir [52].

[4.] RAG Değerlendirmesi: RAG (Retrieval-Augmented Generation) sistemlerinde, yanıt doğruluğunun yanı sıra geri getirilen bağlamın ilgililiği, odaklılığı ve bağlama sadakati ölçülmelidir. RAGAS, bu boyutları referanssız bir şekilde puanlar [58].

[5.] Güvenlik, Tarafsızlık ve Toplumsal Etkiler:

a. Toksisite: RealToxicityPrompts ve ToxiGen veri setleri, modelin zararlı içerik üretme eğilimini değerlendirir [53, 54].
b. Önyargı: Bu bölümün kapsamı dışında olsa da, BBQ ve StereoSet gibi kıyaslamalar önyargı analizinde sıkça kullanılır.

[6.] En İyi Uygulamalar: Performansın çok boyutlu değerlendirilmesi önerilir: Otomatik metrikler (BLEU, BERTScore), görev doğruluğu (pass@k, F1) ve güvenlik ölçümleri (toksisite, önyargı) bir arada kullanılmalı. Kör karşılaştırmalar ve RAG sistemlerinde geri getirme (retrieval) ile üretme (generation) bileşenlerinin ayrı ayrı puanlanması, daha güvenilir sonuçlar sağlar [52, 58].

Türkçe Bağlamı: Türkçe'de, BERTurk ve BioBERTurk gibi modeller, Zemberek ile ön işlenmiş veri setleri üzerinde değerlendirilir. Örneğin, Türkçe duygu analizi ve adlandırılmış varlık tanıma görevlerinde SQuAD

benzeri F1 metrikleri ve toksisite için uyarlanmış RealToxicityPrompts kullanılır [4, 72, 73].

GÜÇLÜ YÖNLER VE ZORLUKLAR

Güçlü yönler

Genel Amaçlı Aktarım ve Bağlam-İçi Öğrenme: Büyük dil modelleri (LLM'ler), parametre sayısı, veri hacmi ve hesaplama gücü büyüdükçe, görev-agnostik few-shot ve zero-shot bağlam-içi öğrenme (in-context learning) yeteneği sergiler. GPT-3, gradyan güncellemesi olmadan geniş bir görev yelpazesinde güçlü performans göstererek bu özelliği kanıtlamıştır [2]. Yönerge ince ayarı (instruction tuning), örneğin FLAN ile, aynı taban modelde sıfır-örnek performansını sistematik olarak artırır [30]. Chain-of-Thought (CoT) istemleme, çok adımlı mantıksal görevlerde (örneğin, matematik veya muhakeme) açık akıl yürütme adımlarıyla belirgin kazanımlar sağlar [63]. Kullanıcı niyetiyle uyumu artırmak için RLHF (insan geri bildirimiyle pekiştirmeli öğrenme), modelin güvenilirliğini ve talimatlara sadakatini güçlendirir [2].

Üretkenlik Kazanımları: LLM destekli araçlar, pratik üretkenlikte önemli katkılar sunar. Örneğin:

- GitHub Copilot, yazılım geliştirme görevlerinde kontrollü deneylerde %55'e varan hızlanma sağlamıştır [64].
- Orta düzey profesyonel yazma görevlerinde ChatGPT, ortalama süreyi ~%40 azaltırken çıktı kalitesini ~%18 artırmıştır [65].

Bu bulgular, LLM'lerin "genel amaçlı asistan" rolünün, yazılım geliştirme, içerik üretimi ve kurumsal süreçlerde doğrudan değer yarattığını gösterir.

Türkçe Bağlamı: Türkçe'de, BERTurk ve BioBERTurk gibi modeller, Zemberek ile ön işlenmiş veri setleriyle ince ayar yapılarak, duygu analizi ve adlandırılmış varlık tanıma gibi görevlerde yüksek verimlilik sunar. RLHF ve CoT uyarlamaları, Türkçe soru-cevap ve metin üretimi görevlerinde kullanıcı odaklı sonuçları iyileştirir [4, 72, 73].

Zorluklar

(i) Halüsinasyon ve Doğrulanabilirlik: LLM'ler, eğitim verisindeki yanlış bilgileri taklit ederek güvenilir ancak hatalı içerikler (halüsinasyon) üretebilir. TruthfulQA gibi kıyaslamalar, ölçek artsa bile olgusallık (factuality) hatalarının kalıcı olduğunu gösterir [66, 67]. HELM çerçevesi, değerlendirmeyi tek bir metrik yerine fayda, sağlamlık, adalet, güvenlik ve verimlilik gibi çok ölçütlü bir yaklaşımla ele almayı önerir [68]. Bu nedenle, RAG (Retrieval-Augmented Generation) gibi dış bilgi getirimli yöntemler ve QAGS gibi olgusallık ölçütleri kritik önemdedir [7, 56].

(ii) Önyargı, Adalet ve Toksisite: Web verilerinden öğrenen modeller, toplumsal önyargıları (cinsiyet, ırk, din, meslek) içselleştirebilir. StereoSet ve BBQ kıyaslamaları, bu eğilimleri nicel olarak ortaya koyar [54, 55]. Güvenli ve adil kullanım için veri kürasyonu, toksisite filtreleme ve RLHF gibi hizalama teknikleri zorunludur.

(iii) Güvenlik ve Kötüye Kullanım (Jailbreak/Prompt Enjeksiyonu): Dış dünya ile bağlantılı LLM uygulamaları, jailbreak veya dolaylı prompt enjeksiyonu saldırılarına karşı savunmasızdır. Bu saldırılar, güvenlik ilkelerini atlatabilir veya zararlı içerikler üretebilir. Savunmalar, istem-düzeyi (prompt-seeding, içerik temizleme) ve model-düzeyi (zararlı niyete karşı eğitim) önlemlerle çok katmanlı olmalıdır [68, 69].

(iv) Gizlilik ve Ezberleme (Memorization): LLM'ler, eğitim verisindeki bireysel örnekleri ezberleyip sorgularla sızdırabilir. GPT modellerinde veri çıkarım (data extraction) riski deneysel olarak gösterilmiştir [37, 38]. Bu, deduplikasyon, veri karartma ve çıktı filtreleme gibi önlemlerin önemini vurgular.

SONUÇ

Bu çalışma, büyük dil modellerinin (LLM'ler) çağdaş yapay zekâ ekosistemindeki dönüştürücü rolünü şu eksenlerde özetlemektedir: Transformer mimarisinin temsil gücü ve paralelleştirilebilirliği [1], ölçek yasaları ile veri ve hesap arasındaki optimal denge [6, 20], bağlam-içi öğrenme ve yönerge ince ayarı gibi öğrenme şemaları [2, 30], RLHF (insan geri bildirimiyle pekiştirmeli öğrenme) ile kullanıcı niyeti hizalaması [3], ve RAG (geri-getirim destekli üretim) ile bilgi entegrasyonu [7]. Değerlendirme tarafında, geleneksel BLEU, ROUGE ve perplexity ölçütleri [39, 40, 62], semantik ve öğrenilmiş metrikler (BERTScore, COMET, BLEURT) [41–43]

ve görev kıyaslamaları (GLUE, SuperGLUE, MMLU, BIG-bench, GSM8K, HumanEval, MBPP) [45–50] ile birlikte çok ölçütlü bir yaklaşımın gerekliliği vurgulanmıştır.

Bulguların sentezi:

1. Kapasite–Veri–Hesap Dengesi: LLM başarısı, yalnızca parametre sayısına değil, veri miktarı, çeşitliliği ve hesap bütçesi arasındaki dengeye bağlıdır. Chinchilla bulguları, sabit hesap bütçesinde daha küçük modellerin daha fazla ve kaliteli veriyle üstün performans sunduğunu gösterir [6, 20]. Bu, deduplikasyon ve kalite filtrelemesini önceliklendirir [37, 38].

2. Uyum ve Olgusallık: Ölçek artışı, halüsinasyon ve görev-dışı üretimi çözmez. RLHF, yönerge ince ayarı ve RAG, bu sorunları azaltmada etkili bir üçlü oluşturur [3, 7, 30]. Olgusallık için QAGS, FactCC ve RAGAS gibi metrikler tamamlayıcıdır [56–58].

3. Güvenlik, Tarafsızlık ve Yönetişim: RealToxicityPrompts ve ToxiGen, toksisite risklerini belgeler [52, 54]. "Stochastic Parrots" tartışması, veri belgelendirme, telif ve toplumsal etkileri AR-GE gündemine taşır [66]. Jailbreak ve kötüye kullanım tehditleri, çok katmanlı savunmalar gerektirir [69].

Uygulama Pratiği: LLM'ler, yazılım geliştirme (GitHub Copilot, %55 hızlanma) ve profesyonel yazım (ChatGPT, ~%40 süre azalması, ~%18 kalite artışı) gibi alanlarda üretkenlik sağlar [64, 65]. Ancak, yüksek riskli alanlarda (örneğin, Med-PaLM) insan denetimi ve katı protokoller şarttır [59]. Etkin bir mühendislik reçetesi şu unsurları içerir:

- Veri tarafında: Agresif deduplikasyon ve kalite filtreleme [37, 38].
- Modelleme tarafında: PEFT (Adapters, LoRA, QLoRA) [27–29], uzun bağlam için verimli dikkat (Longformer, BigBird, Performer, FlashAttention) ve konumsal kodlama (RoPE) [21–25], büyük ölçekte Megatron-LM ve ZeRO ile dağıtık paralellik [31, 32].
- Değerlendirme tarafında: Çoklu metrik (BLEU, BERTScore, pass@k), insan yargısı kalibrasyonu ve RAG'de ayrı retrieval ve generation puanlaması [39–43, 45–50, 58].

Türkçe Bağlamı: Türkçe'de, BERTurk ve BioBERTurk, Zemberek ile ön işlenmiş verilerle duygu analizi, adlandırılmış varlık tanıma ve biyomedikal görevlerde yüksek performans gösterir. RLHF ve RAG, Türkçe soru-cevap ve metin üretiminde olgusallığı artırır [4, 72, 73].

Açık Araştırma Alanları:

1. Kontrol edilebilir ve şeffaf akıl yürütme (örneğin, Chain-of-Thought ve varyantları) [63].

2. Olgusallık garantileri ve RAG'de güvenilirlik ölçümü [58].

3. Az kaynaklı diller (örneğin, Türkçe) ve alan-özgü uyarlamalar [8].

4. Gizlilik-korumalı eğitim ve çıkarım, veri sızıntısı risklerinin azaltılması [37, 38].

5. Güvenlik ve yönetişim için standartlar ve raporlama pratikleri [66, 69].

LLM'lerin bilimsel, endüstriyel ve toplumsal etkilerini en üst düzeye çıkarırken riskleri azaltmak, yalnızca mimari veya veri sorunu değil; sistem tasarımı, değerlendirme bilimi ve sosyoteknik yönetişim problemidir.

KAYNAKÇA

[1] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 30.

[2] Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., ... & Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. Advances in neural information processing systems, 33, 1877-1901.

[3] Ouyang, L., Wu, J., Jiang, X., Almeida, D., Wainwright, C., Mishkin, P., ... & Lowe, R. (2022). Training language models to follow instructions with human feedback. Advances in neural information processing systems, 35, 27730-27744.

[4] Akın, A. A., & Akın, M. D. (2007). Zemberek, an open source NLP framework for Turkic languages. Structure, 10(2007), 1-5.

[5] Eryiğit, G. (2014, April). ITU Turkish NLP web service. In Proceedings of the Demonstrations at the 14th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (pp. 1-4).

[6] J. Hoffmann et al., "Training Compute-Optimal Large Language Models," 2022. Accessed: Sep. 12, 2025. [Online]. Available: arXiv:2203.15556. (arXiv)

[7] Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., ... & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks. Advances in neural information processing systems, 33, 9459-9474.

[8] Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019, June). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, volume 1 (long and short papers) (pp. 4171-4186).

[9] Katz, S. (2003). Estimation of probabilities from sparse data for the language model component of a speech recognizer. IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, 35(3), 400-401.

[10] Kneser, R., & Ney, H. (1995, May). Improved backing-off for m-gram language modeling. In 1995 international conference on acoustics, speech, and signal processing (Vol. 1, pp. 181-184). IEEE.
[11] Jelinek, F., Mercer, R. L., Bahl, L. R., & Baker, J. K. (1977). Perplexity—a measure of the difficulty of speech recognition tasks. The Journal of the Acoustical Society of America, 62(S1), S63-S63.
[12] Bengio, Y., Ducharme, R., Vincent, P., & Jauvin, C. (2003). A neural probabilistic language model. Journal of machine learning research, 3(Feb), 1137-1155.
[13] Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint arXiv:1301.3781.
[14] Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. D. (2014, October). Glove: Global vectors for word representation. In Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP) (pp. 1532-1543).
[15] Howard, J., & Ruder, S. (2018). Universal language model fine-tuning for text classification. arXiv preprint arXiv:1801.06146.
[16] Peters, M. E., Neumann, M., Iyyer, M., Gardner, M., Clark, C., Lee, K., & Zettlemoyer, L. (2018). Deep contextualized word representations. arXiv 2018. arXiv preprint arXiv:1802.05365, 12.
[17] Schuster, M., & Nakajima, K. (2012, March). Japanese and korean voice search. In 2012 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (pp. 5149-5152). IEEE.
[18] Kudo, T., & Richardson, J. (2018). SentencePiece: A simple and language independent subword tokenizer and detokenizer for neural text processing. arXiv preprint arXiv:1808.06226.
[19] Kudo, T. (2018). Subword regularization: Improving neural network translation models with multiple subword candidates. arXiv preprint arXiv:1804.10959.
[20] Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., Brown, T. B., Chess, B., Child, R., ... & Amodei, D. (2020). Scaling laws for neural language models. arXiv preprint arXiv:2001.08361.
[21] Beltagy, I., Peters, M. E., & Cohan, A. (2020). Longformer: The long-document transformer. arXiv preprint arXiv:2004.05150.
[22] Zaheer, M., Guruganesh, G., Dubey, K. A., Ainslie, J., Alberti, C., Ontanon, S., ... & Ahmed, A. (2020). Big bird: Transformers for longer sequences. Advances in neural information processing systems, 33, 17283-17297.
[23] Choromanski, K., Likhosherstov, V., Dohan, D., Song, X., Gane, A., Sarlos, T., ... & Weller, A. (2020). Rethinking attention with performers. arXiv preprint arXiv:2009.14794.
[24] Dao, T., Fu, D., Ermon, S., Rudra, A., & Ré, C. (2022). Flashattention: Fast and memory-efficient exact attention with io-awareness. Advances in neural information processing systems, 35, 16344-16359.
[25] Su, J., Ahmed, M., Lu, Y., Pan, S., Bo, W., & Liu, Y. (2024). Roformer: Enhanced transformer with rotary position embedding. Neurocomputing, 568, 127063.
[26] Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M., ... & Liu, P. J. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. Journal of machine learning research, 21(140), 1-67.
[27] Houlsby, N., Giurgiu, A., Jastrzebski, S., Morrone, B., De Laroussilhe, Q., Gesmundo, A., ... & Gelly, S. (2019, May). Parameter-efficient transfer learning

for NLP. In International conference on machine learning (pp. 2790-2799). PMLR.
[28] Hu, E. J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., ... & Chen, W. (2022). Lora: Low-rank adaptation of large language models. ICLR, 1(2), 3.
[29] Dettmers, T., Pagnoni, A., Holtzman, A., & Zettlemoyer, L. (2023). Qlora: Efficient finetuning of quantized llms. Advances in neural information processing systems, 36, 10088-10115.
[30] Wei, J., Bosma, M., Zhao, V. Y., Guu, K., Yu, A. W., Lester, B., ... & Le, Q. V. (2021). Finetuned language models are zero-shot learners. arXiv preprint arXiv:2109.01652.
[31] Shoeybi, M., Patwary, M., Puri, R., LeGresley, P., Casper, J., & Catanzaro, B. (2019). Megatron-lm: Training multi-billion parameter language models using model parallelism. arXiv preprint arXiv:1909.08053.
[32] Narayanan, D., Shoeybi, M., Casper, J., LeGresley, P., Patwary, M., Korthikanti, V., ... & Zaharia, M. (2021, November). Efficient large-scale language model training on gpu clusters using megatron-lm. In Proceedings of the international conference for high performance computing, networking, storage and analysis (pp. 1-15).
[33] Gao, L., Biderman, S., Black, S., Golding, L., Hoppe, T., Foster, C., ... & Leahy, C. (2020). The pile: An 800gb dataset of diverse text for language modeling. arXiv preprint arXiv:2101.00027.
[34] Penedo, G., Malartic, Q., Hesslow, D., Cojocaru, R., Cappelli, A., Alobeidli, H., ... & Launay, J. (2023). The RefinedWeb dataset for Falcon LLM: outperforming curated corpora with web data, and web data only. arXiv preprint arXiv:2306.01116.
[35] Wenzek, G., Lachaux, M. A., Conneau, A., Chaudhary, V., Guzmán, F., Joulin, A., & Grave, E. (2019). CCNet: Extracting high quality monolingual datasets from web crawl data. arXiv preprint arXiv:1911.00359.
[36] Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N., Chaudhary, V., Wenzek, G., Guzmán, F., ... & Stoyanov, V. (2019). Unsupervised cross-lingual representation learning at scale. arXiv preprint arXiv:1911.02116.
[37] Lee, K., Ippolito, D., Nystrom, A., Zhang, C., Eck, D., Callison-Burch, C., & Carlini, N. Deduplicating Training Data Makes Language Models Better. arXiv 2022. arXiv preprint arXiv:2107.06499.
[38] Kandpal, N., Wallace, E., & Raffel, C. (2022, June). Deduplicating training data mitigates privacy risks in language models. In International Conference on Machine Learning (pp. 10697-10707). PMLR.
[39] Papineni, K., Roukos, S., Ward, T., & Zhu, W. J. (2002, July). Bleu: a method for automatic evaluation of machine translation. In Proceedings of the 40th annual meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 311-318).
[40] Lin, C. Y. (2004, July). Rouge: A package for automatic evaluation of summaries. In Text summarization branches out (pp. 74-81).
[41] Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., Weinberger, K. Q., & Artzi, Y. (2019). Bertscore: Evaluating text generation with bert. arXiv preprint arXiv:1904.09675.
[42] Rei, R., Stewart, C., Farinha, A. C., & Lavie, A. (2020). COMET: A neural framework for MT evaluation. arXiv preprint arXiv:2009.09025.
[43] Sellam, T., Das, D., & Parikh, A. P. (2020). BLEURT: Learning robust metrics for text generation. arXiv preprint arXiv:2004.04696.

[44] Rajpurkar, P., Zhang, J., Lopyrev, K., & Liang, P. (2016). Squad: 100,000+ questions for machine comprehension of text. arXiv preprint arXiv:1606.05250.
[45] Wang, A., Singh, A., Michael, J., Hill, F., Levy, O., & Bowman, S. R. (2018). GLUE: A multi-task benchmark and analysis platform for natural language understanding. arXiv preprint arXiv:1804.07461.
[46] Wang, A., Pruksachatkun, Y., Nangia, N., Singh, A., Michael, J., Hill, F., ... & Bowman, S. (2019). Superglue: A stickier benchmark for general-purpose language understanding systems. Advances in neural information processing systems, 32.
[47] Hendrycks, D., Burns, C., Basart, S., Zou, A., Mazeika, M., Song, D., & Steinhardt, J. (2020). Measuring massive multitask language understanding. arXiv preprint arXiv:2009.03300.
[48] Cobbe, K., Kosaraju, V., Bavarian, M., Chen, M., Jun, H., Kaiser, L., ... & Schulman, J. (2021). Training verifiers to solve math word problems. arXiv preprint arXiv:2110.14168.
[49] Chen, M., Tworek, J., Jun, H., Yuan, Q., Pinto, H. P. D. O., Kaplan, J., ... & Zaremba, W. (2021). Evaluating large language models trained on code. arXiv preprint arXiv:2107.03374.
[50] Austin, J., Odena, A., Nye, M., Bosma, M., Michalewski, H., Dohan, D., ... & Sutton, C. (2021). Program synthesis with large language models. arXiv preprint arXiv:2108.07732.
[51] Srivastava, A., Rastogi, A., Rao, A., Shoeb, A. A., Abid, A., Fisch, A., ... & Mehta, H. (2023). Beyond the imitation game: Quantifying and extrapolating the capabilities of language models. Transactions on machine learning research.
[52] Gehman, S., Gururangan, S., Sap, M., Choi, Y., & Smith, N. A. (2020). Realtoxicityprompts: Evaluating neural toxic degeneration in language models. arXiv preprint arXiv:2009.11462.
[53] Gehman, S., Gururangan, S., Sap, M., Choi, Y., & Smith, N. A. (2020). Realtoxicityprompts: Evaluating neural toxic degeneration in language models. arXiv preprint arXiv:2009.11462.
[54] Hartvigsen, T., Gabriel, S., Palangi, H., Sap, M., Ray, D., & Kamar, E. (2022). Toxigen: A large-scale machine-generated dataset for adversarial and implicit hate speech detection. arXiv preprint arXiv:2203.09509.
[55] Reiter, E. (2018). A structured review of the validity of BLEU. Computational Linguistics, 44(3), 393-401.
[56] Wang, A., Cho, K., & Lewis, M. (2020). Asking and answering questions to evaluate the factual consistency of summaries. arXiv preprint arXiv:2004.04228.
[57] Kryściński, W., McCann, B., Xiong, C., & Socher, R. (2019). Evaluating the factual consistency of abstractive text summarization. arXiv preprint arXiv:1910.12840.
[58] Es, S., James, J., Anke, L. E., & Schockaert, S. (2024, March). Ragas: Automated evaluation of retrieval augmented generation. In Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations (pp. 150-158).
[59] Singhal, K., Tu, T., Gottweis, J., Sayres, R., Wulczyn, E., Amin, M., ... & Natarajan, V. (2025). Toward expert-level medical question answering with large language models. Nature Medicine, 31(3), 943-950.
[60] Ondřej, B. (2015). Proceedings of the Tenth Workshop on Statistical Machine Translation. (No Title), 1.

[61] Popović, M. (2017, September). chrF++: words helping character n-grams. In Proceedings of the second conference on machine translation (pp. 612-618).
[62] Jelinek, F., Mercer, R. L., Bahl, L. R., & Baker, J. K. (1977). Perplexity—a measure of the difficulty of speech recognition tasks. The Journal of the Acoustical Society of America, 62(S1), S63-S63.
[63] Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Xia, F., Chi, E., ... & Zhou, D. (2022). Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. Advances in neural information processing systems, 35, 24824-24837.
[64] Peng, S., Kalliamvakou, E., Cihon, P., & Demirer, M. (2023). The impact of ai on developer productivity: Evidence from github copilot. arXiv preprint arXiv:2302.06590.
[65] Noy, S., & Zhang, W. (2023). Experimental evidence on the productivity effects of generative artificial intelligence. Science, 381(6654), 187-192.
[66] Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021, March). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? 🦜. In Proceedings of the 2021 ACM conference on fairness, accountability, and transparency (pp. 610-623).
[67] Ji, Z., Lee, N., Frieske, R., Yu, T., Su, D., Xu, Y., ... & Fung, P. (2023). Survey of hallucination in natural language generation. ACM computing surveys, 55(12), 1-38.
[68] Liang, P., Bommasani, R., Lee, T., Tsipras, D., Soylu, D., Yasunaga, M., ... & Koreeda, Y. (2022). Holistic evaluation of language models. arXiv preprint arXiv:2211.09110.
[68] Greshake, K., Abdelnabi, S., Mishra, S., Endres, C., Holz, T., & Fritz, M. (2023, November). Not what you've signed up for: Compromising real-world llm-integrated applications with indirect prompt injection. In Proceedings of the 16th ACM workshop on artificial intelligence and security (pp. 79-90).
[69] Yi, S., Liu, Y., Sun, Z., Cong, T., He, X., Song, J., ... & Li, Q. (2024). Jailbreak attacks and defenses against large language models: A survey. arXiv preprint arXiv:2407.04295.
[70] Cöltekin, C. (2010, May). A Freely Available Morphological Analyzer for Turkish. In LREC (Vol. 2, pp. 19-28).
[71] Sulubacak, U., Gökırmak, M., Tyers, F., Çöltekin, Ç., Nivre, J., & Eryiğit, G. (2016, December). Universal dependencies for Turkish. In Proceedings of COLING 2016, the 26th international conference on computational linguistics: Technical papers (pp. 3444-3454).

Görüş Hattı Dışı Yayılma (NLOS) Teknolojileri

Emin GÜNEY[1]

1- Arş. Gör. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. eminguney@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0098-9018

ÖZET

Görüş hattı dışı (NLOS) algılama teknolojileri, modern trafik yönetiminde vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir. Endüktif döngü ve manyetik dedektörler, dünya genelinde en yaygın kullanılan ve trafik akışı verilerinin belkemiğini oluşturan sensörlerdir. Akustik algılama yöntemleri, düşük maliyet, kolay kurulum ve gizlilik avantajlarıyla özellikle kentsel alanlarda alternatif bir çözüm sunarken, radar tabanlı sensörler çok şeritli yolların güvenilir biçimde izlenmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, çevresel ve yol durumu sensörleri, hava ve yol koşullarına ilişkin verileri trafik güvenliği ve adaptif yönetim stratejileri için kritik hale getirmektedir. Her bir sensör türü belirli sınırlamalara sahip olsa da (ör. döngülerin bakım zorluğu, akustik sensörlerde gürültü etkisi, radar/LiDAR'ın maliyet ve parazit duyarlılığı), bu teknolojiler birlikte ele alındığında trafik akışının daha bütüncül bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır. Gelecekte, sensör dayanıklılığındaki artış, kablosuz iletişim olanaklarının gelişmesi ve çoklu sensör füzyonu yaklaşımlarının yaygınlaşmasıyla NLOS algılamanın akıllı ulaşım sistemlerindeki stratejik önemi daha da güçlenecektir.

Anahtar Kelimeler – Görüş Hattı Dışı (NLOS) Algılama; Endüktif Döngü Dedektörleri; Akustik Araç Algılama; Radar Tabanlı Trafik Sensörleri; Çevresel Ve Yol Durumu Sensörleri; Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS); Trafik Akışı İzleme.

GİRİŞ

Trafik yönetiminde güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir ulaşım ağı oluşturmanın temel unsurlarından biri, doğru, güvenilir ve kesintisiz veri toplanmasıdır. Trafik akışının, araç yoğunluğunun, hız bilgilerinin ve yol koşullarının sürekli olarak izlenmesi, yalnızca mevcut trafik durumunu anlamakla kalmaz; aynı zamanda geleceğe yönelik tahmin modelleri, dinamik trafik ışığı optimizasyonları ve otonom sürüş sistemleri için de kritik bir veri kaynağı oluşturur. Bu bağlamda, geleneksel kamera tabanlı ve görüş hattı (Line-of-Sight, LOS) sistemlerinin ötesine geçen görüş hattı dışı (Non-Line-of-Sight, NLOS) algılama teknolojileri, modern akıllı ulaşım sistemlerinin ayrılmaz bir bileşeni haline gelmiştir.

NLOS sensörleri, araçların doğrudan optik gözlem gerektirmeden tespit edilmesini mümkün kılar. Bu teknolojiler, altyapıya gömülü donanımlar, çevresel sinyal tabanlı çözümler veya pasif akustik yöntemler aracılığıyla, düşük görüş koşullarında ya da aracın kısmen ya da tamamen engellendiği durumlarda bile güvenilir veri sağlayabilmektedir. Örneğin yoğun sis, yağmur, kar veya yol üzerindeki engeller gibi durumlarda kamera tabanlı sistemler yetersiz kalırken, NLOS sensörleri bu boşluğu doldurarak trafik yönetiminde sürekliliği güvence altına alır.

En yaygın kullanılan NLOS sensörlerinden biri olan endüktif döngü dedektörleri, yıllardır otoyol ve kavşak kontrol sistemlerinde standart bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Asfalt yüzeyine gömülü bu dedektörler, üzerinden geçen araçların metal kütlelerinden kaynaklanan elektromanyetik alan değişimlerini ölçerek araç varlığını, yoğunluğunu ve hızını belirler. Düşük maliyetli olmaları, uzun ömürlü çalışabilmeleri ve geniş çapta kabul görmeleri bu sistemlerin güçlü yanlarıdır. Ancak, kurulum için yolun kazılması gerekmesi ve bakım süreçlerinin zahmetli olması önemli sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Benzer şekilde, manyetik sensörler de araçların manyetik alan üzerindeki etkilerini kullanarak algılama yapar. Endüktif döngülere kıyasla daha küçük boyutlu ve daha kolay monte edilebilir olan bu sensörler, özellikle kentsel alanlarda ve geçici trafik düzenlemelerinde önemli avantajlar sunar. Bununla birlikte, metal yoğunluğu düşük olan araçlarda hassasiyetin azalabilmesi ve bazı çevresel gürültülere karşı duyarlılık göstermeleri zayıf yönler arasında değerlendirilebilir. Bir diğer önemli NLOS teknolojisi olan akustik sensörler, araçların çıkardığı motor sesi, lastik-yol teması veya egzoz titreşimleri gibi akustik imzaları analiz ederek araç varlığı ve türü hakkında bilgi üretir. Gelişmiş akustik sınıflandırma algoritmaları sayesinde yalnızca araç varlığını tespit etmekle kalmayıp, araç tiplerini (otomobil, kamyon, otobüs vb.) ayırt etme kapasitesine de sahiptirler. Ancak yoğun rüzgâr, yağış veya çevresel gürültü gibi faktörler akustik sensörlerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir.

NLOS sistemleri arasında giderek daha fazla önem kazanan bir başka yaklaşım da radar tabanlı trafik sensörleridir. Mikrodalga veya milimetre dalga radarları, hem araçların varlığını hem de hızlarını yüksek doğrulukla ölçebilmektedir. Bu sensörler, özellikle otoyollarda hız denetimi, çarpışma önleyici sistemler ve gelişmiş sürücü destek sistemlerinde (ADAS) kritik bir rol oynamaktadır. Radar tabanlı çözümler, olumsuz hava koşullarına karşı oldukça dayanıklı olmalarına rağmen, yüksek maliyetleri ve kurulum karmaşıklıkları nedeniyle sınırlı ölçeklerde uygulanabilmektedir. Bunlara ek olarak, çevresel ve yol durumu sensörleri de NLOS algılama teknolojilerinin tamamlayıcı bir parçasını oluşturur. Yol yüzey sıcaklığı, nem, buzlanma, yağış yoğunluğu gibi parametreleri sürekli izleyen bu sensörler, yalnızca trafik yönetimi değil aynı zamanda sürücü güvenliği için de kritik bilgiler sağlar. Örneğin, yol yüzeyinde buzlanma tespit eden bir sistem, anında değişken hız limitlerini devreye sokarak kazaların önlenmesine katkı sunabilir.

Sonuç olarak, NLOS sensörleri; endüktif döngülerden manyetik dedektörlere, akustik sistemlerden radar ve çevresel sensörlere kadar geniş bir teknoloji yelpazesi sunmaktadır. Bu sistemler, yalnızca kamera tabanlı görüş hattı (LOS) çözümlerini tamamlamakla kalmayıp, onların sınırlılıklarını da ortadan kaldırarak daha kapsayıcı, güvenilir ve sürdürülebilir bir trafik yönetim altyapısı ortaya koymaktadır. Gelecekte

akıllı ulaşım sistemlerinin gelişimiyle birlikte, NLOS sensörlerinin diğer veri toplama yöntemleriyle (örneğin kamera görüntüleri, LiDAR verileri veya araç-araç/araç-altyapı iletişim protokolleri) bütünleştirilmesi beklenmektedir. Bu sayede hem gerçek zamanlı karar verme süreçleri desteklenecek hem de daha güvenli, verimli ve çevre dostu ulaşım ağlarının oluşturulmasına katkı sağlanacaktır.

Endüktif Döngü ve Manyetik Dedektörler

Endüktif döngü dedektörleri, en eski ve en yaygın kullanılan trafik sensörlerinden biridir. Bir döngü dedektörü, yolun içine gömülen tel bobinlerden oluşur ve üzerlerinden geçen büyük metal nesnelerin (araçların) endüktanstaki bozulmalarını algılar (Coursey vd., 2024; Chen, 2002). Döngü sensörleri, birçok trafik sinyal denetleyicisi ve otoyol izleme sisteminin belkemiğini oluşturur. Örneğin, SCATS ve SCOOT gibi modern uyarlanabilir sinyal sistemleri, uygun zamanlama planlarını seçmek için döngü dedektörlerinden alınan gerçek zamanlı trafik hacimlerine dayanır. Döngüler, araç varlığını ve dingil sayısını doğru bir şekilde tespit edebilir; çiftler halinde yerleştirildiklerinde araç hızını ve uzunluğunu da tahmin edebilirler. Otoyollarda binlerce döngü sensörü, trafik yönetim merkezlerine veri iletir, binlerce döngü dedektöründen aldığı verileri gerçek zamanlı trafik akışı ölçümleri için kullanır (Seyond, 2025; Chen vd., 2024).

Yaygınlıklarına ve doğruluklarına rağmen döngü dedektörlerinin önemli sınırlamaları vardır. Kurulum işlemi zahmetlidir; yolun kesilmesini gerektirir, bu da trafik aksaklıklarına ve bakım maliyetlerine yol açar. Ömürleri sınırlıdır (genellikle birkaç yıl), çünkü asfalt aşınır ve araç basıncı etkiler (Güney ve Bayılmış, 2022). Birçok kavşakta çalışmayan ya da bakımı yapılmamış döngüler vardır, bu da performansı düşürür (Mei vd., 2023; Jiang vd., 2024). Ayrıca, çalışan bir döngü bile yalnızca üzerinden araç geçtiğinde tespit yapar ve bu da trafik koşulları hakkında kısmi bilgi sağlar (Ghaffarpasand vd., 2023). Döngüler yalnızca araç üzerlerinden geçtiğinde etkinleşir; bu nedenle kuyruk uzunluklarını veya yaklaşan araçları gözlemleyemezler. Bu sınırlı görüş, yalnızca döngü kullanan trafik sinyallerinin gerçek zamanlı trafik desenlerini tam olarak algılayamamasına neden olur ve genellikle mühendisler tarafından manuel ayarlamalar yapılmasını gerektirir. Bir diğer sorun ise veri zenginliğidir: endüstri standardı trafik sistemleri genellikle yalnızca akış sayımlarına güvenir; oysa gelişmiş kontrol algoritmaları (ör. pekiştirmeli öğrenme ajanları) daha zengin durum bilgisi ister. Pratikte, saha sensörlerinden yalnızca akış güvenilir şekilde toplanabilir, bu da simülasyondaki ayrıntılı araç durumlarına kıyasla çok daha sınırlı bir girdidir. Nitekim, AI tabanlı trafik denetleyicilerini uygulanabilir kılmaya yönelik güncel araştırmalar (Federal Highway Administration, 2025), algoritmaları yalnızca yaygın olarak mevcut sensör verilerini (ör. döngü sayımları veya doluluk oranı) girdi olarak kullanacak şekilde sınırlar.

Endüktif döngülerin bazı dezavantajlarını aşmak için manyetometre sensörleri modern bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Güney, Bayilmis ve Cakan, 2022). Bunlar, araçların yarattığı Dünya'nın manyetik alanındaki bozulmaları algılayan, yol yüzeyine gömülen veya monte edilen küçük kablosuz cihazlardır. Döngülere benzer bir prensipte çalışırlar, ancak kurulumu daha kolaydır (küçük bir delik açmak veya yüzeye monte etmek yeterlidir) ve bakımı da daha basittir (batarya ile çalışır, yol kesmeden değiştirilebilir). Manyetometre sensörleri de döngüler gibi noktasal araç tespiti sağlar ve birden fazla ünite birlikte hız veya araç uzunluğunu tahmin edebilir. Bazı akıllı şehir projelerinde, esnek bir retrofit çözümü olarak kullanılmışlardır; ancak uzun vadeli batarya ömrü ve iletişim güvenilirliği dikkate alınmalıdır. Genel olarak, endüktif ve manyetik dedektörler hala temel NLOS sensörleri olarak kalmakta, trafik sinyal zamanlaması ve otoyol akış yönetimi için araç sayısı, varlığı ve doluluk gibi temel verileri sağlamaktadır.

Akustik Araç Algılama

Akustik algılama, genellikle araç motorları, egzoz ve lastiklerden çıkan ses dalgalarını kullanarak araçları tespit eder. Bu sensörler görüş hattı görünürlüğüne ihtiyaç duymaz; bir araç, virajın arkasında ya da karanlık veya sisli bir ortamda olsa bile duyulabilir. Akustik sensörler pasiftir (sinyal yaymazlar), bu nedenle ek elektromanyetik gürültü oluşturmazlar veya spektrum lisansı gerektirmezler (Du vd., 2023). Araçların ses imzaları gerçek zamanlı olarak analiz edilerek çalışırlar. Örneğin, yol kenarına yerleştirilmiş mikrofon dizileri, ses yoğunluğu ve varış zamanı farklarına göre aracın konumunu ve yönünü belirleyebilir. Yakın tarihli bir çalışmada (Zhang vd., 2023), mikrofonları bir işlemciyle birleştiren kompakt bir akustik sensör ("Traffic Ear"), araçları motor gürültüsüne göre sınıflandırmış ve hızlarını tahmin etmiştir; üstelik trafik akışını kesmeden. Bu sistemin ses tabanlı makine öğrenimi analizi, araç tiplerini (ve yakıt türlerini) otomatik plaka tanıma kameralarıyla karşılaştırıldığında yalnızca %1–4 belirsizlik ile ayırt edebilmiştir. Bu da akustik algılamanın yalnızca araç varlığını değil, aynı zamanda araç sınıfı gibi daha zengin bilgileri de toplayabilme potansiyelini göstermektedir.

Akustik araç algılamada birçok yöntem geliştirilmiştir: basit iki mikrofonlu kurulumlardan (ses sinyallerinin çapraz korelasyonu ile araç tespiti) çok şeritli araçları takip edebilen büyük mikrofon dizilerine kadar. Örneğin, araştırmacılar paralel ve dikey ses yoğunluğunu karşılaştırarak araç sayısını ve yönünü tahmin eden çift mikrofon algoritmaları geliştirmiştir. Saha testlerinde, 24 saatlik yol kenarı ses kaydı kullanılarak, %95'in üzerinde doğrulukla araç sayımı yapılabildiği gösterilmiştir (Xie vd., 2025). Akustik sensörlerin avantajları; düşük maliyetli olmaları, küçük boyutları ve aydınlatma koşullarından bağımsız olmalarıdır (gece-gündüz fark etmeden

çalışabilirler). Ayrıca, kameraların kaçırabileceği bazı olayları da algılayabilirler; ör. araç korna sesi veya kaza sesi – bu, olay tespiti için faydalıdır.

Bununla birlikte, akustik algılamanın bazı zorlukları vardır. Arka plan gürültüsü (rüzgar, yağmur, çevresel sesler) tespiti bozabilir; bu nedenle sağlam sinyal işleme ve gürültü filtreleme gerekir. Çok yoğun trafikte, birden fazla aracın sesinin çakışması doğruluğu düşürebilir, ancak gelişmiş dizi işleme ve makine öğrenimi bu sorunu azaltmaktadır. Ayrıca, akustik sensörler ortam özelliklerine göre kalibrasyon gerektirir. Henüz döngüler veya kameralar kadar yaygın olmasa da, şehirler daha az müdahaleci ve gizliliği koruyan izleme yöntemleri aradıkça akustik trafik sensörleri ilgi çekmektedir. Özellikle, döngü kurulumu zor olan ve video analitiğinin maliyetli ya da gizlilik açısından sorunlu olduğu akıllı kavşaklar ve kentsel yollarda öne çıkmaktadır. Nitekim, akustik dedektörler ambulans sirenlerini algılayarak sinyalleri öncelikli yeşile çevirmek için kullanılmıştır; bu da aracın görüş alanı dışında ama duyulabilir olduğu tipik bir NLOS uygulamasıdır.

Diğer NLOS ve Çevresel Sensörler

Döngü ve akustik dedektörlerin ötesinde, ulaşım sistemlerinde farklı NLOS teknolojileri de kullanılmaktadır. Radar tabanlı trafik sensörleri, otoyollarda döngülere alternatif olarak yaygındır. Yol kenarına yerleştirilen radar üniteleri, radyo dalgaları gönderip yansımalardan araç hızını, sayısını ve doluluğunu ölçer. Radar dedektörleri, yol kesme gerektirmeden çok şeritli kapsama sağlar ve çoğu hava koşulunda güvenilir çalışır. Günümüzde birçok otoyol yönetim sistemi, döngü istasyonlarının yerine veya yanına radar sensörleri yerleştirmektedir (Ripka, 2002). Örneğin, Tennessee'deki Interstate-24 üzerinde, 17 millik koridorda 49 radar dedektörü kurulmuş ve her 30 saniyede bir şerit bazında hız, hacim ve doluluk verisi toplanmıştır (Güney vd., 2024). Bu yüksek çözünürlüklü sensör ağı, otoyoldaki kazaları veya olağandışı tıkanıklıkları hızlıca tanımlayabilen anomali tespit sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Araştırmacılar, bu tür durumlarda kamera görüntülerine güvenmenin genellikle depolama ve gizlilik sorunları nedeniyle pratik olmadığını; buna karşılık büyük ölçekli otoyol veri kümelerinin çoğunlukla döngü veya radar ölçümlerine dayandığını belirtmektedir.

Radar ve LiDAR sensörlerinin fiziksel anlamda genellikle görüş hattı gerektirdiği unutulmamalıdır – yani araçları görmek için doğrudan yol gerekir. Bu nedenle, bu sensörler ayrı bir bölümde ele alınmaktadır. Ancak sabit altyapıda kullanıldıklarında, NLOS dedektörleriyle benzer şekilde trafik verisi sağlarlar. Radar sensörleri, döngü benzeri verileri müdahalesiz şekilde toplar; bazı elektromanyetik parazitlere ve yoğun trafikte azalan doğruluğa rağmen yaygın olarak kullanılmaktadır. LiDAR üniteleri, daha da ayrıntılı ölçümler (ör. araçların 3B yörüngelerini haritalama) sağlayabilir,

ancak daha pahalıdır ve ışık/ hava koşullarına daha hassastır. Pratikte kurumlar, maliyet, veri ihtiyacı ve çevresel faktörlere göre sensör seçer: örneğin, akıllı bir kavşak, tüm yaklaşımları kapsayacak şekilde mikrodalga/radar sensörleri kullanabilir ve birkaç kamera ile doğrulama veya dönüş hareketi sayımı yapabilir.

Bir diğer önemli NLOS sensör kategorisi çevresel ve yol durumu sensörleridir. Bunlar doğrudan araçları algılamaz, ancak trafik güvenliği ve yönetimini kritik biçimde etkileyen koşulları izler. Yol Hava Durumu Bilgi Sistemleri (RWIS), hava ve yol koşullarını gerçek zamanlı toplamak için kurulur. Bu sistemlerde hava sıcaklığı, nem, yağış (yağmur/kar), görüş mesafesi (sis sensörleri), rüzgar hızı ve yol yüzeyi sıcaklığı/nemliliğini ölçen sensörler bulunur. Bazı sensörler, yol yüzeyinin ıslak, buzlu ya da buz çözücü kimyasallarla işlenmiş olup olmadığını tespit etmek için gömülü problar veya kızılötesi cihazlar kullanır. Bu tür çevresel sensörler, proaktif trafik yönetimi için zekâlı ulaşım altyapısının bir parçasıdır. Örneğin, yol yüzeyi sensörleri don yağışı riski gösterirse, otoyol otoritesi hız limitlerini otomatik olarak düşürebilir ve buz çözücü ekiplerini önceden yola çıkarabilir. Sis sensörleri, kavşaklarda yoğun sis durumunda daha uzun sarı/kırmızı süreleri tetikleyebilir veya yol kenarı hava durumu verileri uyarlanabilir sinyal algoritmalarına beslenerek trafik yavaşlamalarına uyum sağlayabilir. Bu şekilde, insan sürücülerin ve trafik sistemlerinin tepki vermesi gereken çevresel faktörler sürekli izlenir. Araştırmalar, olumsuz hava koşullarını dikkate alan stratejilerin (ör. ön uyarılar veya hız düşürme) kazaları azalttığını göstermektedir (Schroeder vd., 2007).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Görüş hattı dışı algılama teknolojileri, trafik izleme ve yönetiminin temel katmanını oluşturur. Endüktif döngüler ve modern varyantları, dünya çapındaki yol ağlarında gerçek zamanlı trafik akışı verilerinin büyük kısmını sağlamaya devam etmekte, sinyal denetleyicileri ve trafik merkezlerini beslemektedir. Akustik sensörler, özellikle müdahalesiz kurulumun gerektiği veya geleneksel sensörlerin pratik olmadığı durumlarda umut verici bir tamamlayıcıdır. Radar tabanlı dedektörlerden hava durumu istasyonlarına kadar diğer NLOS yaklaşımları ise trafik sistemlerinin hem araçlara hem de onların çalıştığı çevresel koşullara sürekli bir farkındalık sağlamasına yardımcı olur. Temel zorluklar, her bir teknolojinin sınırlamalarında yatmaktadır – döngüler noktasal ve arızaya eğilimlidir, akustik sensörler

gürültüden etkilenir, radar/LiDAR pahalı olabilir ya da parazite duyarlı olabilir. Bunun yanında, bu heterojen veri kaynaklarının entegrasyonunda da zorluklar vardır. Devam eden araştırmalar, bu zorlukları çözmeye çalışmaktadır: örneğin, çoklu sensör füzyon çerçeveleri, NLOS sensörlerini kameralar veya araçtan-altyapıya (V2X) verilerle birleştirerek bireysel zayıflıkları aşmayı hedefler. Yine de, AI ve bağlantılı araç teknolojileri ilerlese de, döngü dedektörleri gibi denenmiş ve güvenilir NLOS sensörleri vazgeçilmezdir. Bunlar, trafik talebinin güvenilir ve nicel ölçümlerini sağlar ve hem günlük işlemlerde (ör. akıllı sinyaller) hem de gelişmiş uygulamalarda (ör. olay tespit sistemleri veya saha sensör girdilerine dayalı pekiştirmeli öğrenme tabanlı trafik kontrolü kritik rol oynamıştır. Gelecekte, sensör dayanıklılığı, kablosuz bağlantı ve sinyal işleme (ör. fiber-optik Dağıtılmış Akustik Algılama ile sürekli trafik izleme alanlarındaki gelişmeler, NLOS algılamanın akıllı ulaşım sistemlerindeki rolünü daha da güçlendirecektir. Bu teknolojiler sayesinde kurumlar, otoyol ve kavşakları her koşulda sağlam şekilde izleyebilir ve nihayetinde daha güvenli ve verimli yol ağları sağlayabilirler.

REFERANSLAR

Coursey, A., Ji, J., Quinones Grueiro, M., Barbour, W., Zhang, Y., Derr, T., Biswas, G., & Work, D. (2024). FT-AED: Benchmark dataset for early freeway traffic anomalous event detection. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 15526–15549.

Chen, C. (2002). Freeway performance measurement system (PeMS). University of California, Berkeley.

Güney, E., & Bayılmış, C. (2022). An implementation of traffic signs and road objects detection using faster R-CNN. Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences, 5(2), 216–224.

Seyond. (2025). Inductive loops vs LiDAR technology for traffic detection and actuation. Retrieved June 29, 2025, from https://simpl.seyond.com/comparing-inductive-loops-and-lidar-technology.

Chen, H., Jiang, Y., Guo, S., Mao, X., Lin, Y., & Wan, H. (2024). Difflight: A partial rewards conditioned diffusion model for traffic signal control with missing data. Advances in Neural Information Processing Systems, 37, 123353–123378.

Mei, H., Li, J., Shi, B., & Wei, H. (2023). Reinforcement learning approaches for traffic signal control under missing data. In Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence (pp. 2261–2269).

Jiang, H., Xiong, X., Li, Z., Mao, H., Sui, G., Ruan, J., Cheng, Y., Wei, H., Ketter, W., & Zhao, R. (2024). GuideLight: "Industrial solution" guidance for more practical traffic signal control agents. arXiv preprint arXiv:2407.10811.

Ghaffarpasand, O., Almojarkesh, A., Morris, S., Stephens, E., Chalabi, A., Almojarkesh, U., Almojarkesh, Z., & Pope, F. D. (2023). Traffic noise assessment using intelligent acoustic sensors (traffic ear) and vehicle telematics data. Sensors, 23(15), 6964. MDPI.

Federal Highway Administration. (2025). How does the road weather information system work? Retrieved June 29, 2025, from https://ops.fhwa.dot.gov/weather/resources/publications/tech_briefs/rwis.htm

Güney, E., Bayilmiş, C., & Cakan, B. (2022). An implementation of real-time traffic signs and road objects detection based on mobile GPU platforms. IEEE Access, 10, 86191–86203.

Du, W., Dash, A., Li, J., Wei, H., & Wang, G. (2023). Safety in traffic management systems: A comprehensive survey. Designs, 7(4), 100. MDPI.

Zhang, Y., Quinones-Grueiro, M., Zhang, Z., Wang, Y., Barbour, W., Biswas, G., & Work, D. (2023). Marvel: Multi-agent reinforcement-learning for large-scale variable speed limits. arXiv preprint arXiv:2310.12359.

Xie, D., Wu, X., Guo, Z., Hong, H., Wang, B., & Rong, Y. (2025). Intelligent traffic monitoring with distributed acoustic sensing. Seismological Research Letters. Seismological Society of America.

Ripka, P. (2002). Magnetic sensors and magnetometers. Measurement Science and Technology, 13(4), 645.

Güney, E., Bayılmış, C., Çakar, S., Erol, E., & Atmaca, Ö. (2024). Autonomous control of shore robotic charging systems based on computer vision. Expert Systems with Applications, 238, 122116.

Schroeder, J., Galler, S., Kyamakya, K., & Jobmann, K. (2007, March). NLOS detection algorithms for ultra-wideband localization. In 2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (pp. 159-166). IEEE.

Video Kameraya Dayalı Algılama Teknolojileri

Emin GÜNEY[1]

1- Arş. Gör. Dr.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. eminguney@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0098-9018

ÖZET

Günümüzde akıllı ulaşım sistemlerinin gelişimi, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz süreçlerine dayanan algılama teknolojilerinin etkinliğini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, video kameraya dayalı algılama sistemleri, yüksek çözünürlüklü görüntü verilerini kullanarak trafik akışını izleme, nesne tespiti ve davranış analizi yapma kabiliyetleri sayesinde öne çıkmaktadır. Sabit, hareketli ve insansız hava aracı tabanlı kameralar aracılığıyla elde edilen görüntüler, derin öğrenme ve bilgisayarla görme algoritmaları kullanılarak işlenmekte; böylece araç, yaya ve trafik ışığı gibi unsurların konum, hız ve yön bilgileri çıkarılmaktadır. Bu bölümde, video kamera tabanlı algılama teknolojilerinin temel ilkeleri, görüntü oluşum modelleri (fotometrik ve geometrik), 2B görüntüden 3B sahne modellemesine geçiş, derin öğrenme tabanlı nesne tespiti ve çoklu nesne takibi kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Ayrıca optik akış (optical flow) ve uç bilişim (edge computing) yaklaşımlarının trafik izleme sistemlerine entegrasyonu incelenmiştir. Gerçek zamanlı kırmızı ışık ihlali tespiti, şerit ihlali ve tehlikeli sürüş davranışlarının belirlenmesi gibi uygulamalar, yapay zekâ destekli kamera sistemlerinin güvenli trafik yönetiminde oynadığı kritik rolü göstermektedir. Elde edilen bulgular, kamera tabanlı sistemlerin düşük maliyet, yüksek doğruluk ve ölçeklenebilirlik avantajları sayesinde, akıllı şehir altyapılarında sürdürülebilir ulaşım çözümleri için güçlü bir temel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Video Tabanlı Algılama Sistemleri; Akıllı Ulaşım Sistemleri; Derin Öğrenme; Nesne Tespiti; Çoklu Nesne Takibi; Bilgisayarla Görme; Optik Akış; Trafik İhlali Tespiti; Yapay Zekâ; Otonom Trafik İzleme.

GİRİŞ

Günümüzde kentleşme hızının artması, ulaşım altyapısına binen yükü ciddi biçimde artırmış; bu da trafik yönetimi, güvenlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yeni teknolojik çözümleri zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda, video kameraya dayalı algılama sistemleri, trafik izleme, olay tespiti ve davranış analizi gibi çok sayıda uygulamada vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu teknolojiler, kamera görüntülerinden gerçek zamanlı olarak elde edilen yüksek çözünürlüklü verilerin, derin öğrenme ve bilgisayarla görme algoritmalarıyla işlenmesine dayanır. Bu sayede araçların, yayaların ve diğer yol unsurlarının konum, hız ve davranış bilgileri çıkarılarak trafik akışı optimize edilebilmektedir. Sabit, hareketli veya insansız hava aracı (drone) tabanlı kameralar aracılığıyla toplanan veriler, yapay zekâ destekli sistemler için geniş bir veri tabanı oluşturarak akıllı ulaşım altyapısının temelini teşkil eder. Kamera tabanlı sistemlerin en önemli avantajı, yüksek bilgi yoğunluğu, düşük kurulum

maliyeti ve çok amaçlı kullanım esnekliğidir. Geleneksel sensör teknolojilerine (radar, lidar, ultrasonik sensör vb.) kıyasla, 2B ve 3B sahne analizine olanak tanıyan bu sistemler; aynı donanım altyapısı üzerinden hem nesne tespiti hem de takip işlemlerini gerçekleştirebilir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen CNN, ViT, DETR, DeepSORT, ByteTrack gibi ileri derin öğrenme mimarileri, bu sistemlerin doğruluk, hız ve adaptasyon kabiliyetlerini önemli ölçüde artırmıştır.

Bu bölümde, video kameraya dayalı algılama teknolojilerinin temel ilkeleri, görüntü oluşum modelleri, derin öğrenme tabanlı nesne tespiti ve takip yöntemleri ile bunların akıllı ulaşım sistemlerindeki uygulamaları kapsamlı biçimde ele alınmaktadır.

Video Kameraya Dayalı Algılama Teknolojileri

Video kameraya dayalı algılama teknolojileri, kaza riskini azaltmak ve yol güvenliğini artırmak amacıyla uzun süredir trafik kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır (Nair, 2024). Görüntülerden gerçek zamanlı olarak zengin bilgi çıkarabilme yeteneği; hareketli nesnelerin tespiti ve takibi, poz tahmini ve araçların konumlandırılması gibi çok çeşitli uygulamalara imkân tanımaktadır. Bu sistemler, maliyet etkinlikleri ve ölçeklenebilirlikleri sayesinde kentsel alanların tamamını hızlı biçimde kapsayabilmektedir. Gelişmiş görüntü işleme ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kamera tabanlı sistemler, trafik verisinin kapsamlı analizine olanak tanır. Bu sistemler, görüntü oluşumunun temel prensiplerine—fotometrik ve geometrik modelleme—ve akıllı ulaşım sistemlerinin gerektirdiği üst düzey bilgisayarla görme görevlerine dayanmaktadır (Szeliski, 2022:44). Bu faydalar, kamera tabanlı teknolojileri akıllı şehir altyapılarında geniş ölçekli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Çeşitli trafik izleme senaryolarına uyum sağlamak için farklı kamera konfigürasyonları tasarlanmıştır. Sabit kameralar, kavşaklarda veya otoyollarda trafik akışını ve kazaları izlemek için monte edilmektedir.

PTZ (Pan-Tilt-Zoom) kameralar, operatörlere belirli bir alanı yakından izleme veya hareketli hedefleri takip etme imkânı vererek dinamik kontrol avantajı sağlar. Buna keskin bir karşıtlık olarak, insansız hava araçlarına (drone) yerleştirilen kameralar; büyük ölçekli festivaller veya afetler gibi geçici gözetim senaryolarında mobiliteleri ve panoramik görünümleri sayesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, hareketli otobüslere, devriye araçlarına veya tramvaylara monte edilen kameralar, dinamik sahne algısını desteklemekte ve ulaşım güzergâhları boyunca yol koşullarının sürekli izlenmesini sağlamaktadır (Zhang vd., 2023). Kameralardan elde edilen görüntü verilerini etkin biçimde işlemek ve yorumlamak için görüntü oluşumunun temellerini bilmek kritik öneme sahiptir.

Görüntü oluşumu, gerçek 3B dünya sahnelerinin kameralar aracılığıyla 2B görüntülere yansıtılmasını ifade eder. Bu süreç;

aydınlatmanın nesnelerle etkileşime girmesi, yansıyan ışığın kameranın optik sisteminden (ör. lens) geçerek görüntü sensörüne ulaşmasıyla başlar. Bu ışık dijital görüntüyü oluşturur (Szeliski, 2022). İki temel bileşeni vardır: geometrik model, 3B sahnedeki noktaların 2B görüntü düzlemine nasıl yansıtıldığını tanımlar (Hartley ve Zisserman, 2003); fotometrik model ise piksel değerlerinin aydınlatma şiddetine, yüzeylerin yansıtma özelliklerine ve kamera ayarlarına nasıl bağlı olduğunu açıklar (Bhuyan vd., 2019).

Bu öncü modeller, modern ulaşım uygulamalarında yapay zekâ temelli analiz ve karar verme için temel bir yapı taşını oluşturmaktadır. Son yıllarda ulaşıma yönelik bilgisayarla görme uygulamaları, gerçek zamanlı analitiği mümkün kılan yapay zekâ destekli görsel işleme zincirlerine odaklanmıştır. Evrişimsel sinir ağları (CNN) ve görsel dönüştürücüler (ViT) gibi derin öğrenme çerçeveleri, araç tespiti, plaka okuma ve çoklu nesne takibi gibi görevlerde doğruluk ve verimliliği büyük ölçüde artırmıştır (LeCun vd., 2015; Janiesch vd., 2021).

Ayrıca kenar bilişim (edge computing) sayesinde kamera akışlarının düşük gecikmeli şekilde işlenmesi mümkün hale gelmiş; bu da acil durum müdahalesi veya dinamik trafik ışığı kontrolü gibi zaman kritik uygulamalar için elzem bir senaryo oluşturmuştur (Dolatyabi vd., 2025). Bu gelişmeler, veri merkezli ve otomasyona dayalı kentsel mobilite sistemlerine yönelik daha geniş bir eğilimin parçasıdır. Çalışmadaki amaç, video kameraya dayalı algılama teknolojilerinin modern ulaşım ekosistemlerine kattığı değeri ortaya koymak; bu teknolojilerin operasyonel güçlü yönlerini, teknik dayanaklarını ve farklı kullanım modlarını açıklamaktır.

2B Görüntülere Dayalı Algılama Teknolojileri

Akıllı ulaşım sistemleri, trafik sahnelerini görmek, izlemek ve yönetmek için giderek daha fazla görsel bilgiden yararlanmaktadır. Çeşitli algılama yöntemleri geliştirilmiş olsa da, esas olarak kameralara dayalı iki boyutlu (2B) sistemler, gerçek zamanlı trafik çalışmaları için maliyet ve ölçek açısından verimli bir çözüm olarak kabul edilmiştir (Güney ve Bayılmış, 2022). 2B kamera sistemleri, araç tespiti, hareketli araç takibi, davranış analizi ve olay tespiti gibi çok çeşitli bilgisayarla görme uygulamaları için uygun zengin mekânsal ve zamansal bilgiye sahip ardışık görüntüler yakalar. Nokta tabanlı veya düşük boyutlu sensörlere kıyasla, 2B kameralar piksel düzeyinde ve semantik düzeyde yüksek ayrıntılı görsel girişler sunar; bu sayede sahnedeki nesnelerin tespitinin yanı sıra hareketlerinin, etkileşimlerinin ve bağlamlarının da takibini mümkün kılar.

Derin Öğrenmenin Temelleri

Derin Sinir Ağları (DNN), veriyi çok katmanlı gizli katmanlardan geçirerek doğrusal olmayan dönüşümler uygulayan ağlardır. CNN'ler özellikle görüntü verileri için optimize edilmiştir. Ayrıca yinelenen sinir ağları (RNN), dönüştürücüler (Transformer) ve çok katmanlı algılayıcılar

(MLP) gibi farklı mimariler de çok modlu trafik analitiği sistemlerine entegre edilebilmektedir (LeCun vd., 2015; Janiesch vd., 2021). Öğrenme süreçleri, geri yayılım ve stokastik gradyan inişi gibi yöntemlere dayanır. Bu mimariler; nesne tespiti, takip ve yol sahnelerinin gerçek zamanlı yorumlanması gibi görevlerde etkinlik sağlar (Dolatyabi vd., 2025).

Nesne Tespit ve Takibi

Nesne tespiti, bir görüntü ya da video karesinde ilgi alanı bölgelerinin tespit edilmesi ve yerelleştirilmesi sürecidir (Zou vd., 2023). İlk yöntemler, Viola–Jones dedektörü (Viola ve Jones, 2001) ve DPM modeli (Felzenszwalb vd., 2009) gibi el ile çıkarılmış özelliklere dayanıyordu. Ancak dinamik trafik senaryolarında sınırlı kaldılar. Günümüzde tespit algoritmaları üç ana gruptadır: İki aşamalı dedektörler: R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN (Girshick, 2014; Ren vd., 2015). Tek aşamalı dedektörler: YOLO, SSD (Redmon vd., 2016; Liu vd., 2016). Dönüştürücü tabanlı dedektörler: DETR, Deformable DETR (Carion vd., 2020; Zhu vd., 2020).

Nesne takibi, video tabanlı sistemlerde ardışık kareler arasında nesne yörüngelerini belirleme sürecidir (Jimenez vd., 2022). Genellikle tespit tabanlı takip modeli (TBD) kullanılır; burada YOLO veya Faster R-CNN çıktıları ilişkilendirilir. Takip yöntemleri çevrimiçi (gerçek zamanlı) ve çevrimdışı (tüm veri üzerinde optimizasyon) olarak ikiye ayrılır (Luo vd., 2020). Gelişmiş yöntemler (DeepSORT, FairMOT, TrackFormer) örtüşme ve ışık değişimlerine dayanıklılığı artırır (Fei vd., 2023).

Optik Akış

Optik akış, ardışık iki görüntü karesi arasındaki parlaklık değişimlerinden yola çıkarak sahnedeki nesnelerin, kameranın veya gözlemcinin hareketini piksel düzeyinde tahmin etmeyi amaçlayan bir tekniktir (Shah, 2021). Diğer bir deyişle, görüntü dizilerindeki her bir pikselin zamanla nasıl yer değiştirdiğini hesaplayarak, hareketin yönü ve büyüklüğü hakkında bilgi üretir. Bu yöntem özellikle video tabanlı nesne takibi, derinlik tahmini, hareket analizi ve otonom sistemlerde çevre algısı gibi uygulamalarda kritik rol oynar.

Klasik optik akış algoritmaları arasında Horn–Schunck (küresel akış tahmini yapan, tüm görüntü üzerinde düzgünlük varsayımına dayanan) ve Lucas–Kanade (yerel pencereler içinde hareket tahmini yapan) yöntemleri yer alır. Bu algoritmalar, düşük hesaplama karmaşıklıkları sayesinde uzun yıllar boyunca endüstriyel ve akademik çalışmalarda kullanılmıştır. Ancak bu geleneksel yaklaşımlar, yüksek hızda hareket eden nesneler, ani aydınlatma değişimleri veya karmaşık sahne geometrileri gibi zorlu durumlarda doğruluk kaybı yaşayabilmektedir (Ke vd., 2018).

Kırmızı Işık ve Şerit İhlali Tespiti

Kırmızı ışık ihlalleri, kavşak kazalarının en yaygın sebeplerindendir (Jahangiri ve Rakha, 2016; Owais vd., 2025). Modern sistemler, araç yörüngelerini analiz ederek ihlalleri tespit eder (Yan vd., 2024; Schicktanz vd., 2025). Şerit ihlali ve tehlikeli sürüş davranışları için; şerit segmentasyonu (Vu vd., 2022), araç tespiti (Al-Hameed vd., 2023) ve takip (Mutlukaya vd., 2024; Torres vd., 2023) yaklaşımları kullanılmaktadır. Ayrıca otoenkoder tabanlı ağlar, anormal sürüş davranışlarını belirleyebilmektedir (Hu vd., 2020).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Video kameraya dayalı algılama sistemleri, modern ulaşım altyapısının dijital dönüşümünde temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Yüksek çözünürlüklü görüntülerden çıkarılan semantik bilgiler aracılığıyla trafik akışının dinamik biçimde yönetilmesi, kaza ve şerit ihlallerinin tespiti, anormal sürüş davranışlarının belirlenmesi ve yol güvenliğinin artırılması mümkün hale gelmiştir. Derin öğrenme tabanlı nesne tespit ve takip algoritmalarının olgunlaşmasıyla birlikte, bu sistemler yalnızca pasif birer gözlem aracı olmaktan çıkarak çevresinden öğrenebilen, yorum yapabilen ve karar verebilen otonom bileşenlere dönüşmüştür. Gerçek zamanlı nesne tespit algoritmaları, yüksek kare hızında video işleyebilme yeteneğiyle olaylara anında tepki vermeyi sağlarken; çoklu nesne takip (MOT) algoritmaları karmaşık trafik senaryolarında yüksek doğruluk oranlarına ulaşmaktadır. Bununla birlikte, kamera tabanlı algılama sistemlerinin performansı; değişken aydınlatma koşulları, olumsuz hava etkileri, kamera kalibrasyon hataları ve veri gizliliği gibi çevresel ve etik faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle gelecekteki araştırmaların odak noktası, çoklu sensör füzyonu (kamera–LiDAR–radar), drone tabanlı üç boyutlu algılama, kenar bilişim tabanlı işlem mimarileri ve gizlilik korumalı yapay öğrenme yaklaşımları gibi alanlara kaymaktadır. Sonuç olarak, video kameraya dayalı algılama teknolojileri yalnızca mevcut ulaşım altyapısının etkinliğini ve güvenliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda otonom araçlar, akıllı şehirler ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin gelişiminde de vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.

REFERANSLAR

Nair, A., Patil, V., Nair, R., Shetty, A., ve Cherian, M. (2024). A review on recent driver safety systems and its emerging solutions. *International Journal of Computers and Applications*, 46(3), 137–151.

Viola, P., ve Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*, 1, I–I. IEEE.

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: Algorithms and applications.* Springer Nature.

Hartley, R. (2003). *Multiple view geometry in computer vision.* Cambridge University Press.

Bhuyan, M. K. (2019). *Computer vision and image processing: Fundamentals and applications.* CRC Press.

Zou, Z., Chen, K., Shi, Z., Guo, Y., ve Ye, J. (2023). Object detection in 20 years: A survey. *Proceedings of the IEEE*, 111(3), 257–276.

Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., ve Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 580–587.

Girshick, R. (2015). Fast R-CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 1440–1448.

Ren, S., He, K., Girshick, R., ve Sun, J. (2015). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 91–99.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., ve Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.

Redmon, J., ve Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767.*

Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., ve Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934.*

Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., ve Berg, A. C. (2016). SSD: Single shot multibox detector. *Proceedings of ECCV*, 21–37.

Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., ve Dollár, P. (2020). Focal loss for dense object detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(2), 318–327.

Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., ve Zagoruyko, S. (2020). End-to-end object detection with transformers. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 213–229.

Zhu, X., Su, W., Lu, L., Li, B., Wang, X., ve Dai, J. (2020). Deformable DETR: Deformable transformers for end-to-end object detection. *arXiv preprint arXiv:2010.04159.*

Felzenszwalb, P. F., Girshick, R., McAllester, D., ve Ramanan, D. (2009). Object detection with discriminatively trained part-based models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(9), 1627–1645.

Khanam, R., Hussain, M., Hill, R., ve Allen, P. (2024). A comprehensive review of convolutional neural networks for defect detection in industrial applications. *IEEE Access.*

LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., ve Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324.

LeCun, Y., Bengio, Y., ve Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
Janiesch, C., Zschech, P., ve Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685–695.
O'Shea, K., ve Nash, R. (2015). An introduction to convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:1511.08458.*
Khan, A., Sohail, A., Zahoora, U., ve Qureshi, A. S. (2020). A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks. *Artificial Intelligence Review*, 53(8), 5455–5516.
Jiménez-Bravo, D. M., Lozano Murciego, Á., Sales Mendes, A., Sánchez San Blás, H., ve Bajo, J. (2022). Multi-object tracking in traffic environments: A systematic literature review. *Neurocomputing*, 494, 43–55.
Luo, W., Xing, J., Milan, A., Zhang, X., Liu, W., ve Kim, T.-K. (2021). Multiple object tracking: A literature review. *Artificial Intelligence*, 293, 103448.
Fei, L., ve Han, B. (2023). Multi-object multi-camera tracking based on deep learning for intelligent transportation: A review. *Sensors*, 23(8), 3852.
Valverde, J. C., Garcia, F., Cordero, J. M. A., ve Perez, J. M. (2018). A deep learning approach to traffic lights: Detection, tracking, and classification. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2372–2377. IEEE.
Giachetti, A., Campani, M., ve Torre, V. (2002). The use of optical flow for road navigation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(1), 34–48.
Shah, S. T. H., ve Xuezhi, X. (2021). Traditional and modern strategies for optical flow: An investigation. *SN Applied Sciences*, 3(3), 289.
Ke, R., Li, Z., Tang, J., Pan, Z., ve Wang, Y. (2018). Real-time traffic flow parameter estimation from UAV video based on ensemble classifier and optical flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 54–64.
Sun, W., Sun, M., Zhang, X., ve Li, M. (2020). Moving vehicle detection and tracking based on optical flow method and immune particle filter under complex transportation environments. *Complexity*, 2020(1), 3805320.
Dolatyabi, P., Regan, J., ve Khodayar, M. (2025). Deep learning for traffic scene understanding: A review. *IEEE Access.*
Yan, M., Zhuang, M., ve Kwok, A. P. K. (2024). Exploring the effects of traffic light countdown displays on the driving behaviours of drivers with different personality dispositions: A VR-simulated study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 105, 99–115.
Owais, M., ve El Sayed, M. A. (2025). Red light crossing violations modelling using deep learning and variance-based sensitivity analysis. *Expert Systems with Applications*, 267, 126258.
Jahangiri, A., Rakha, H., ve Dingus, T. A. (2016). Red-light running violation prediction using observational and simulator data. *Accident Analysis & Prevention*, 96, 316–328.
Franklin, R. J., vd. (2020). Traffic signal violation detection using artificial intelligence and deep learning. *5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, 839–844. IEEE.
Schicktanz, C., ve Gimm, K. (2025). Detection and analysis of corner case scenarios at a signalized urban intersection. *Accident Analysis & Prevention*, 210, 107838.

Hu, J., Zhang, X., ve Maybank, S. (2020). Abnormal driving detection with normalized driving behavior data: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(7), 6943–6951.
Torres, J. M., Gumaru, M. A. E., Luna, E. A. N., Quiroga, L. H., Generalao, K. J., ve Serrano, K. K. D. (2023). Automated classification of vehicles and violation detection in special purpose lanes. *IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, 1–6. IEEE.
Arnob, F. A., Fuad, A., Nizam, A. T., Barua, S., Choudhury, A. A., ve Islam, M. (2020). An intelligent traffic system for detecting lane-based rule violation. *International Conference on Advances in the Emerging Computing Technologies (AECT)*, 1–6. IEEE.
Mutlukaya, İ., Karakurt, R. C., Çetinkaya, Ş., ve Bayraktar, E. (2024). Visual detection and tracking of lane violations for heavy vehicles. *Neural Computing and Applications*, 36(36), 22633–22652.
Al Mudawi, N., Qureshi, A. M., Abdelhaq, M., Alshahrani, A., Alazeb, A., Alonazi, M., ve Algarni, A. (2023). Vehicle detection and classification via YOLOv8 and deep belief network over aerial image sequences. *Sustainability*, 15(19), 14597.
Vu, D., Ngo, B., ve Phan, H. (2022). HybridNets: End-to-end perception network. *arXiv preprint arXiv:2203.09035.*

Transfer Fonksiyonu Tabanlı JAYA Algoritması ile Öznitelik Seçimi

Gürcan YAVUZ[1]

1- Doç. Dr.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. gurcanyavuz@gmail.com ORCID No: 0000-0002-2540-1930

ÖZET

Öznitelik seçimi, yüksek boyutlu veri kümeleri üzerinde çalışan makine öğrenmesi ve veri madenciliği uygulamalarında en önemli ön işleme adımlarından biridir. Bu yöntem ile sınıflandırmaya katkısı sınırlı, yinelenen veya gürültü içeren öznitelikler elenmekte ve daha küçük, anlamlı altkümeler elde edilmektedir. Böylece hem sınıflandırma başarımı artmakta hem de hesaplama maliyeti azalmaktadır. Ayrıca daha az sayıda öznitelik ile kurulan modellerin yorumlanabilirliği de kolaylaşmaktadır. Öznitelik seçiminin avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Uygun öznitelik seçimi, üstel büyüklükte arama uzayı nedeniyle doğası gereği zorlu bir kombinatoryal optimizasyon problem haline gelebilmektedir.

Son yıllarda bu tür problemlerin çözümünde meta-sezgisel yöntemlerin etkinliği dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, Rao tarafından önerilen ve parametre gerektirmeyen yapısıyla öne çıkan JAYA algoritmasının ikili versiyonu geliştirilmiştir. JAYA algoritmasının temel mantığı, her iterasyonda çözümleri mevcut popülasyondaki en iyi bireye yaklaştırırken aynı zamanda en kötü bireyden uzaklaştırmaktır. Sürekli optimizasyon için tasarlanmış olan algoritma, transfer fonksiyonları aracılığıyla ikili arama uzayına uyarlanmıştır. Çalışmada S-, V- ve U-şekilli olmak üzere toplam 10 transfer fonksiyonu entegre edilmiş ve performansları sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Deneysel sonuçlar, S-şekilli fonksiyonların genel olarak en kararlı ve yüksek doğruluk sağlayan seçenekler olduğunu ortaya koymuştur. V-şekilli fonksiyonlar çeşitlilik sağlamasına rağmen doğruluk açısından zayıf kalırken, U-şekilli fonksiyonlar belirli veri kümelerinde rekabetçi sonuçlar üretmiştir. Bulgular, transfer fonksiyonlarının seçiminde yapılacak tercihin ikili meta-sezgisel algoritmaların başarımı üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Öznitelik Seçimi, JAYA Algoritması, İkili Optimizasyon, Transfer Fonksiyonu, Meta-Sezgisel Yöntemler.

GİRİŞ

Öznitelik seçimi, yüksek boyutlu veri kümeleri üzerinde gerçekleştirilen makine öğrenmesi ve veri madenciliği uygulamalarında temel bir ön işleme adımıdır (Sadeghian vd., 2025). Bu aşamada, sınıflandırma ya da tahmin sürecine katkısı düşük olan, yinelenen veya gürültü içeren öznitelikler veri kümesinden çıkarılarak daha küçük ve anlamlı altkümeler oluşturulur. Böylece sınıflandırma doğruluğu artmakta, hesaplama maliyeti azalmaktadır (Yavuz vd., 2025). Ayrıca daha az öznitelik ile çalışıldığında öğrenme modellerinin genellenebilirliği de güçlenmektedir. Özellikle sağlık, metin madenciliği ve görüntü işleme gibi alanlarda örnek sayısının görece az, öznitelik sayısının ise oldukça yüksek olması, “boyutluluk laneti” olarak

bilinen temel zorluğu ortaya çıkarmaktadır (Sadeghian vd., 2025). Bu nedenle öznitelik seçimi yalnızca hesaplama verimliliği açısından değil, aynı zamanda modellerin yorumlanabilirliği bakımından da kritik öneme sahiptir.

Literatürde öznitelik seçimi yöntemleri genel olarak filtre, sarmalama (wrapper) ve gömülü (embedded) yaklaşımlar altında sınıflandırılmaktadır. Filtre yöntemleri, herhangi bir sınıflandırıcıya bağlı olmadan istatistiksel ölçütler yardımıyla özniteliklerin önemini değerlendirir. Sarmalama yöntemleri, aday öznitelik altkümelerinin başarımını doğrudan bir sınıflandırıcı üzerinden ölçer. Bu yaklaşım çoğu zaman daha yüksek doğruluk sağlar ancak hesaplama maliyeti yüksektir. Gömülü yöntemler ise öznitelik seçimini öğrenme algoritmasının yapısına entegre ederek hem doğruluk hem de verimlilik arasında denge kurar. Bununla birlikte, hangi yaklaşım benimsenirse benimsensin, çok boyutlu veri kümelerinde mümkün olan öznitelik kombinasyonlarının sayısının üstel biçimde artması hesaplama maliyetinin arıtmasına yol açar.

Son yıllarda meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri öznitelik seçimi problemlerine yoğun biçimde uygulanmıştır (Sadeghian vd., 2025). Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Harris Şahin Optimizasyonu (HHO) (Peng vd., 2024) gibi doğadan esinlenen algoritmalar, geniş arama uzayını keşfetme yetenekleri ve umut vadeden çözümleri etkin biçimde belirleyebilmeleri nedeniyle öne çıkmaktadırlar. Stokastik ve popülasyon tabanlı yapıları sayesinde erken yakınsama riskini azaltarak daha çeşitli öznitelik altkümelerinin araştırılmasına olanak tanırlar. Bununla birlikte, bu algoritmaların özgün yapısı sürekli optimizasyon problemlerine yöneliktir ve öznitelik seçimi gibi ikili problem türlerine doğrudan uygulanmaları mümkün değildir. Bu nedenle, algoritmaların ikili biçime uyarlanması gerekmektedir (Yang vd., 2025). Bu uyarlama ile algoritmaların ürettiği sonuçlar 0–1 değerlerine dönüştürülmekte ve bu sayede öznitelik seçimi problemi çözülebilmektedir.

Bu çalışmada, özel parametre gerektirmeyen yapısı ve uygulanabilirliğiyle öne çıkan JAYA algoritmasının ikili versiyonu ele alınmaktadır (Rao ve Rai, 2017). JAYA, diğer meta-sezgisel yöntemlerden farklı olarak yalnızca popülasyon büyüklüğü ve iterasyon sayısı gibi temel parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, öznitelik seçimi ikili bir problem yapısı gerektirdiğinden, algoritmanın sürekli arama uzayındaki güncelleme adımlarının transfer fonksiyonları aracılığıyla ikili değerlere dönüştürülmesi zorunludur. Bu kapsamda çalışmada, S-şekilli, V-şekilli ve U-şekilli olmak üzere toplam on adet transfer fonksiyonu sistematik olarak incelenmiş, bu fonksiyonların öznitelik seçimi üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde değerlendirilmiş ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

YÖNTEM

Jaya Algoritması

Bu çalışmada, Rao tarafından 2016 yılında önerilen, herhangi bir kontrol parametresine ihtiyaç duymayan ve adını Sanskritçede "zafer" anlamına gelen kelimeden alan JAYA algoritmasının ikili optimizasyon problemine uyarlanması ele alınmaktadır (Rao ve Rai, 2017). Algoritmanın temel prensibi, her iterasyonda popülasyondaki en iyi çözüme yaklaşırken aynı zamanda en kötü çözümden uzaklaşmaktır. Bu mekanizma sayesinde çözümler, iterasyonlar boyunca giderek daha uygun bireyler yönünde güncellenir. Parametre bağımsız yapısı, algoritmanın uygulanmasını kolaylaştırmakta ve kullanıcı açısından ek ayarlama ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

JAYA algoritması basit bir yapıya sahiptir ve algoritmaya ait sözde kod Tablo 1'de verilmiştir. JAYA, sadece bir tane güncelleme adımına sahiptir. Bu güncelleme mekanizması, her bireyin konumunu mevcut popülasyondaki en iyi çözümden yararlanarak iyileştirmeyi ve aynı zamanda en kötü çözümden uzaklaştırmayı hedefler. Güncelleme denkleminde Xti,j, i. bireyin j. boyuttaki mevcut değerini ifade ederken, Xtbest,j popülasyondaki en iyi çözümün ilgili boyutunu, Xtworst,j ise en kötü çözümün aynı boyuttaki değerini göstermektedir. Rastgele üretilen r1,j ve r2,j katsayıları, keşif ve sömürü süreçlerine çeşitlilik katmak amacıyla kullanılır. İlk terim olan r1,j(Xtbest,j - |Xti,j|), bireyin en iyi çözüme doğru yönelmesini sağlarken; ikinci terim olan r2,j(Xtworst,j - |Xti,j|), bireyin en kötü çözümden uzaklaştırılmasına hizmet eder. Böylece her iterasyonda bireyler, daha kaliteli çözümlere doğru ilerlerken düşük kaliteli çözümlerden uzaklaşır ve popülasyonun genel uygunluğu artırılmış olur.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^{t} + r_{1,j}\left(X_{best,j}^{t} - \left|X_{i,j}^{t}\right|\right) - r_{2,j}\left(X_{worst,j}^{t} - \left|X_{i,j}^{t}\right|\right) \quad (1)$$

Tablo 1: Geleneksel Jaya Algoritmasının Sözde Kodu

1. Popülasyon boyutunu ve iterasyon sayısını belirle.
2. Rastgele çözümler ile popülayonu üret.
3. ite := 1
4. **While** (Sonlandırma kriterleri sağlanana kadar devam et)
5. Popülasyonun en iyi ve en kötü çözümlerini belirle.
6. **for** i=1'den NP'ye kadar
7. Çözümleri Denklem 1 ile güncelle.
8. i :=i + 1
9. **End**
9. **End**
10. ite := ite + 1
11. En iyi çözümü döndür.

JAYA algoritması temel olarak sürekli optimizasyon problemleri için geliştirilmiştir. Bu nedenle, ikili yapıya sahip olan öznitelik seçimi problemine doğrudan uygulanması mümkün değildir. Algoritmanın bu problem türüne uyarlanabilmesi için sürekli biçimde temsil edilen bireylerin 0 ve 1 değerleriyle ifade edilen ikili yapılara dönüştürülmesi gerekmektedir. İkili öznitelik seçimi yaklaşımında her birey, ilgili özniteliğin seçilip seçilmediğini gösteren bir bit dizisiyle temsil edilir. İterasyon sürecinde aday çözümler sürekli değerler üretse de, bu değerler doğrudan kullanılmaz; önce transfer fonksiyonları olarak adlandırılan dönüşüm mekanizmalarından geçirilir ve ardından elde edilen olasılıklar doğrultusunda 0 veya 1 değerlerine çevrilir.

Bu çalışmada, JAYA algoritmasının ikili öznitelik seçimi problemine uyarlanabilmesi için literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı transfer fonksiyonu ailesi dikkate alınmıştır. Transfer fonksiyonlarına ait denklemler Tablo 2'de verilmiştir. Bu aileler, sürekli değerlerin olasılık temelli olarak ikili değerlere dönüştürülme biçimlerini temsil etmektedir.

S-şekilli fonksiyonlar (TF1–TF4): Sürekli değerleri 0 ile 1 arasına düzgün ve kademeli biçimde haritaladıkları için keşif ve sömürü arasında dengeli bir yapı sunarlar. Bu nedenle pek çok çalışmada varsayılan yaklaşım olarak tercih edilmişlerdir.

V-şekilli fonksiyonlar (TF5–TF7): Daha agresif bir yapıya sahiptirler ve bitlerin ters çevrilmesini daha yüksek olasılıkla tetiklerler. Bu özellik, popülasyonda çeşitliliği artırarak erken yakınsamanın önüne geçmeyi amaçlamaktadır.

U-şekilli fonksiyonlar (TF8–TF10): Daha az incelenmiş bir aile olup, uç olasılık değerlerine odaklanarak bazı özniteliklerin güçlü biçimde seçilmesine veya elenmesine yol açarlar. Bu durum, belirli problemlerde daha seçici altkümeler üretme potansiyeli sunarken, dengesiz sonuçlar üretme riskini de beraberinde getirmektedir.

Tablo 2: Transfer fonksiyonları

tf_1 – (S-şekil)	$s(x) = 1 / (1 + \exp(-2x))$
tf_2 – (S-şekil)	$s(x) = 1 / (1 + exp(-x))$
tf_3 - (S-şekil)	$s(x) = 1 / (1 + exp(-x/2))$
tf_4 – (S-şekil)	$s(x) = 1 / (1 + exp(-x/3))$
tf_5 – (V-şekil)	$s(x) = \lvert erf((\sqrt{\pi} / 2) \cdot x) \rvert$
tf_6 – (V-şekil)	$s(x) = \lvert\tanh(x)\rvert$
tf_7 – (V-şekil)	$s(x) = \lvert x / sqrt(1 + x\text{^}2) \rvert$
tf_8 – (U-şekil)	$s(x) = min(\lvert x\rvert\text{^}2, 1)$
tf_9 – (U-şekil)	$s(x) = min(\lvert x\rvert\text{^}3, 1)$
tf_10 – (U-şekil)	$s(x) = min(\lvert x\rvert\text{^}4, 1)$

JAYA algoritmasının öznitelik seçimi probleminde kullanırken ikili sayı dönüşümü yapmak kadar önerilecek algoritmanın kullanacağı uygunluk fonksiyonunun da doğru şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu

uygunluk fonksiyonunun amacı, yalnızca sınıflandırma doğruluğunu en üst düzeye çıkarmak değil, aynı zamanda gereksiz öznitelikleri eleyerek daha küçük ve anlamlı altkümeler elde etmektir. Sadece doğruluk değerine odaklanmak, fazla sayıda özniteliğin seçilmesine ve modelin gereksiz yere karmaşıklaşmasına yol açabilmektedir. Benzer şekilde yalnızca altkümenin boyutunu küçültmeye çalışmak da sınıflandırma performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan uygunluk fonksiyonu Denklem 2'de verilmiştir ve her iki kriteri aynı anda dikkate almaktadır. Denklemde yer alan hata oranı (H) sınıflandırma başarımını, seçilen öznitelik sayısının orijinal öznitelik sayısına oranı ise (|S|/|T|) altkümenin boyutunu temsil etmektedir. Katsayılar α (0.9) sınıflandırma hatasının ağırlık katsayısını ve β (0.1) seçilen öznitelik sayısının ağırlık katsayısı olmak üzere bu iki ölçüt arasındaki dengeyi belirleyerek algoritmanın hem yüksek doğruluk hem de daha az öznitelik seçimi sağlamasına imkân tanımaktadır.

$$Uygunluk = \alpha \cdot H + \beta \cdot (|S| / |T|) \quad (2)$$

DENEYLER

JAYA algoritmasının öznitelik seçimi problemine uyarlanabilirliğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir deneysel çalışma yürütülmüştür. Önerilen yaklaşımda algoritmaya toplam on farklı transfer fonksiyonu entegre edilmiş ve bu fonksiyonların performansa etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Deneyler, UCI makine öğrenmesi deposundan (https://archive.ics.uci.edu/) alınan yedi farklı veri kümesi (Tablo 3) üzerinde gerçekleştirilmiştir (Asuncion ve Newman, 2007). Parametre ayarları olarak popülasyon büyüklüğü 30, maksimum iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiş, her algoritma varyantı 51 bağımsız çalıştırma ile test edilmiştir. Sınıflandırıcı olarak k-en yakın komşu (k-NN) kullanılmış ve komşuluk parametresi k=5 değerinde sabitlenmiştir. Veri kümeleri, %70 eğitim ve %30 test oranında ikiye ayrılarak değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 3: Veri seti özellikleri

DsID	Veriseti ismi	Özellik sayısı	Örnek Sayısı
ds1	ionosphere	34	351
ds2	dermatology	34	358
ds3	cnae	856	540
ds4	BreastEW	30	569
ds5	Sonar	60	208
ds6	Zoo	16	101
ds7	Wine	13	178

Elde edilen bulgular, transfer fonksiyonlarının algoritmanın başarımında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Tablo 4, algoritmaların öznitelik seçimi işlemi sonucunda veri setlerinde seçtiği ortalama öznitelik sayılarını göstermektedir. Buna göre, S-şekilli fonksiyonların (ja_tf_1–ja_tf_2) genellikle daha az öznitelik seçerek daha kompakt çözümler ürettiği görülmektedir. V- ve U-şekilli fonksiyonlar (ja_tf_5–ja_tf_10) ise daha büyük öznitelik altkümeleri seçmiş, bu da modelin basitliği açısından dezavantaj yaratmıştır.

Sınıflandırma doğrulukları ve standart sapmalar Tablo 5'te verilmiştir. Burada, S-şekilli fonksiyonlara karşılık gelen ja_tf_1 ve ja_tf_2 en yüksek ortalama doğruluk (sırasıyla %98.38 ve %97.04) ve en düşük sıralama değerleri (1.57 ve 1.71) ile öne çıkmıştır. V-şekilli fonksiyonlar (ja_tf_5–ja_tf_7) yüksek standart sapmalarla daha düşük ortalama doğruluk değerlerine ulaşmış, özellikle ja_tf_7 en zayıf sıralama performansını göstermiştir. U-şekilli fonksiyonlar (ja_tf_8–ja_tf_10) bazı veri kümelerinde rekabetçi sonuçlar üretmiş olsa da genel sıralamada S-şekilli fonksiyonların gerisinde kalmıştır. Genel olarak, deneysel sonuçlar S-şekilli transfer fonksiyonlarının İkili JAYA algoritması için en uygun seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. V-şekilli fonksiyonlar çeşitliliği artırmasına karşın doğruluk açısından zayıf kalmış, U-şekilli fonksiyonlar ise belirli senaryolarda rekabetçi olsa da kararlılık bakımından sınırlı bulunmuştur.

Tablo 4: Algoritmaların seçtiği ortalama öznitelik sayısı

Algo.	ds1	ds2	ds3	ds4	ds5	ds6	ds7
ja_tf_1	**1.54E+01**	1.65E+01	4.30E+02	1.39E+01	**2.86E+01**	8.07E+00	5.97E+00
ja_tf_2	1.55E+01	1.70E+01	4.31E+02	**1.34E+01**	2.98E+01	7.93E+00	**5.83E+00**
ja_tf_3	1.65E+01	1.75E+01	4.29E+02	1.48E+01	2.97E+01	7.83E+00	6.60E+00
ja_tf_4	1.59E+01	1.73E+01	4.28E+02	1.42E+01	2.98E+01	8.40E+00	6.07E+00
ja_tf_5	2.05E+01	1.69E+01	4.29E+02	1.70E+01	3.15E+01	7.70E+00	6.40E+00
ja_tf_6	1.81E+01	1.64E+01	4.25E+02	1.61E+01	3.17E+01	7.70E+00	6.30E+00
ja_tf_7	1.92E+01	**1.61E+01**	4.26E+02	1.65E+01	3.09E+01	**7.43E+00**	6.63E+00
ja_tf_8	1.96E+01	1.82E+01	**4.24E+02**	1.81E+01	3.22E+01	9.07E+00	7.40E+00
ja_tf_9	2.06E+01	1.93E+01	4.27E+02	1.89E+01	3.36E+01	9.30E+00	8.53E+00
ja_tf_10	2.10E+01	1.97E+01	4.26E+02	2.00E+01	3.29E+01	9.53E+00	8.80E+00

Tablo 5: Algoritmaların elde ettiği ortalama ve standart sapma değerleri

Algo.	ds1-std-mean	ds2-std-mean	ds3-std-mean	ds4-std-mean	ds5-std-mean	ds6-std-mean	ds7-std-mean	Ort. rank
ja-tf-1	3.232E+00 **8.527E+01**	1.506E+00 **9.838E+01**	6.270E+00 7.140E+01	1.900E+00 9.375E+01	5.763E+00 **8.446E+01**	3.977E+00 9.300E+01	7.668E+00 **9.145E+01**	**1.57**
ja_tf_2	3.061E+00 8.476E+01	2.485E+00 9.704E+01	4.913E+00 **7.213E+01**	2.356E+00 **9.386E+01**	6.044E+00 8.290E+01	5.230E+00 **9.311E+01**	8.289E+00 9.050E+01	1.71
ja_tf_3	3.498E+00 8.444E+01	2.455E+00 9.723E+01	5.959E+00 6.878E+01	2.227E+00 9.290E+01	7.302E+00 8.258E+01	9.447E+00 8.989E+01	7.857E+00 8.899E+01	3.29
ja_tf_4	3.665E+00 8.397E+01	4.254E+00 9.486E+01	5.432E+00 7.114E+01	2.311E+00 9.355E+01	5.806E+00 8.081E+01	5.439E+00 **9.311E+01**	9.735E+00 8.849E+01	3.29
ja_tf_5	2.443E+00 8.337E+01	4.306E+00 7.293E+01	4.754E+00 6.307E+01	2.567E+00 9.073E+01	4.865E+00 7.253E+01	7.287E+00 7.856E+01	5.467E+00 6.969E+01	7.43
ja_tf_6	3.045E+00 8.200E+01	5.527E+00 7.327E+01	6.169E+00 6.135E+01	2.185E+00 9.161E+01	5.184E+00 7.462E+01	7.083E+00 8.044E+01	4.717E+00 6.887E+01	7.57
ja_tf_7	2.514E+00 8.194E+01	6.483E+00 7.125E+01	6.275E+00 6.457E+01	2.525E+00 9.124E+01	5.910E+00 7.387E+01	7.441E+00 7.833E+01	4.833E+00 6.943E+01	8.00
ja_tf_8	1.851E+00 8.263E+01	5.700E+00 7.483E+01	5.836E+00 5.954E+01	2.095E+00 9.171E+01	5.140E+00 7.242E+01	5.098E+00 8.056E+01	4.323E+00 6.881E+01	7.57
ja_tf_9	2.063E+00 8.171E+01	4.944E+00 7.464E+01	6.095E+00 6.053E+01	2.125E+00 9.206E+01	5.705E+00 7.134E+01	4.989E+00 7.867E+01	4.605E+00 6.962E+01	7.57
ja_tf_10	2.513E+00 8.114E+01	4.146E+00 7.449E+01	6.794E+00 6.199E+01	2.308E+00 9.192E+01	5.343E+00 7.516E+01	6.005E+00 8.078E+01	4.132E+00 6.931E+01	6.86

SONUÇ

Bu çalışmada JAYA algoritması, öznitelik seçimi problemine yönelik olarak ikili forma dönüştürülmüş ve toplam on adet transfer fonksiyonunun etkisi kapsamlı biçimde incelenmiştir. Yapılan deneyler, transfer fonksiyonlarının algoritma performansını doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgulara göre S-şekilli fonksiyonlar, istikrar ve doğruluk bakımından en güçlü aileyi oluştururken; U-şekilliler belirli problemlerde rekabetçi sonuçlar verse de genel olarak sınırlı kalmıştır. V-şekilli fonksiyonlar ise çeşitliliği artırmalarına rağmen çözüm kalitesinde düşüşe yol açmıştır.

Bu sonuçlar, ikili meta-sezgisel algoritmalarda transfer fonksiyonu seçiminin kritik bir adım olduğunu bir kez daha göstermektedir. Çalışmanın özgün katkısı, literatürde görece az incelenmiş olan U-şekilli fonksiyonların da sistematik biçimde değerlendirilmesi ve bu fonksiyonların güçlü ve zayıf yönlerinin ortaya konmasıdır.

Gelecek araştırmalarda, transfer fonksiyonunun dinamik biçimde seçilmesine imkân tanıyacak adaptif stratejilerin geliştirilmesi, yerel arama yöntemleriyle hibrit modellerin tasarlanması ve yöntemin biyoinformatik, metin sınıflandırma veya tıbbi tanı gibi yüksek boyutlu gerçek veri kümelerine uygulanması planlanmaktadır.

REFERANSLAR

Asuncion, A., & Newman, D. (2007, November). *UCI machine learning repository*.

Peng, L., Li, X., Yu, L., Heidari, A. A., Chen, H., & Liang, G. (2024). Q-learning guided mutational Harris hawk optimizer for high-dimensional gene data feature selection. *Applied Soft Computing*, *161*, 111734.

Rao, R. V., ve Rai, D. P. (2017). Optimisation of welding processes using quasi-oppositional-based Jaya algorithm. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, *29*(5), 1099-1117.

Sadeghian, Z., Akbari, E., Nematzadeh, H., & Motameni, H. (2025). A review of feature selection methods based on meta-heuristic algorithms. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, *37*(1), 1-51.

Yavuz, G., Moghanjoughi, M. K., Dumlu, H., & Çakir, H. İ. (2025). A Feature Selection Method Combining Filter and Wrapper Approaches for Medical Dataset Classification. *Vietnam Journal of Computer Science*, 1-19.

Zhang, J., Yan, F., & Yang, J. (2025). Binary plant rhizome growth-based optimization algorithm: an efficient high-dimensional feature selection approach. *Journal of Big Data*, *12*(1), 13.

Uzay Aracı Seyrüseferinde Konum ve Yönelim Belirleme Sensörleri

Harun ÇELİK[1]
Mahi Bilge YILMAZ[2]

1- Dr. Öğr. Üyesi, Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uzay Mühendisliği Bölümü, haruncelik@erciyes.edu.tr, https://orcid.org/0000-0001-5352-3428
2- Arş. Gör., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, https://orcid.org/0009-0001-3628-4848

ÖZET

Hava araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen elektronik sistemler aviyonik sistemler olarak isimlendirilebilirken uzay araçlarında kullanılmak üzere geliştirilen elektronik sistemler de astriyonik olarak isimlendirilebilmektedir. Astriyonik sistemlerden hayati öneme sahip olanları arasında uzay aracının seyrüseferinde kullanılan konum ve yönelim belirleme sistemleri bulunur. Bu konum ve yönelim belirleme sistemlerinde ölçümler yapma, algılama ve veri elde etme amaçlarıyla kullanılan sensörler uzay aracının yörüngesini koruyabilmesi, hedeflere doğru yönelmesi ve görevini güvenli biçimde sürdürebilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu kitap bölümünde uzay aracının seyrüseferinde kullanılan farklı konum ve yönelim belirleme sensörleri hakkında bilgiler yer almaktadır. Bu sensörlerin tanıtımı, kullanım amaçları ve çalışma prensipleri gibi hususlar genel hatlarıyla anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Astriyonik, Seyrüsefer, Yönelim, Konum, Sensörler.

GİRİŞ

Uzay aracı seyrüseferi, aracın mevcut konumunu belirleme ve tahmini uçuş yolunu hesaplama sürecini içermekte olup, aynı zamanda aracın istenen rota içinde kalması için uçuş yolunun gerektiğinde güncellenmesini içermektedir (Woodman,2008).

Bu karmaşık süreç, aracın konumu ve hızı gibi bilgilerin toplanmasıyla başlar ve bu verilerin işlenmesiyle aracın zamana bağlı konum ve hız tahminlerinin yapılmasıyla devam eder. Daha sonra, kaçınılmaz bozuntular nedeniyle istenen uçuş yoluna göre oluşan sapmaların düzeltilmesi için ek hesaplamalar yapılması gerekmektedir. Bu hesaplama süreci, aracın hareketlerinin ve ölçülen verilerin doğru bir şekilde modellenmesini gerektirir.

Uzay araçlarının Dünya yörüngesinde ya da derin uzayda görevlerini başarıyla yerine getirebilmeleri, oldukça hassas seyrüsefer kabiliyetlerine sahip olmalarını gerektirir. Seyrüsefer, bir uzay aracının bulunduğu konumu, hareket yönünü ve hızını belirleyerek, izlediği rotanın planlanmasını ve gerektiğinde düzeltilmesini sağlayan temel süreçtir. Uzayın zorlu çevresel koşulları, sinyal bozulmaları, iletişimde yaşanan gecikmeler ve radyasyon gibi etkenler, bu sistemlerin sadece doğru değil, aynı zamanda dayanıklı ve güvenilir olmasını da zorunlu kılar. Bu bağlamda, seyrüsefer amacıyla kullanılan sensör teknolojileri, uzay görevlerinin başarı oranını doğrudan etkileyen kritik önemdeki sistemlerdendir.

Modern uzay aracı seyrüsefer sistemleri; çeşitli fiziksel prensiplere dayalı sensörlerden, bu sensörlerin sağladığı verileri işleyen hesaplama birimlerinden ve gerektiğinde yön veya yörünge düzeltmeleri yapabilen itki

sistemlerinden oluşur. Seyrüsefer esnasında hangi yöntemlerin kullanılacağı ise, aracın görev profiline, bulunduğu yörünge tipine ve ihtiyaç duyulan doğruluk düzeyine göre değişiklik gösterebilir.

Uzay aracı seyrüseferinde kullanılan sensörler konumun veya yönelimin belirlenmesinde kullanılmalarına göre iki ana başlık altında toplanabilir. Konum belirleme ile uzay aracının uzaydaki yeri ve hızı tayin edilirken, yönelim belirleme ile aracın duruş şekli, hangi yöne baktığı ve eksenleri etrafında nasıl döndüğünü belirlenir. Her iki işlem de uydu haberleşmesinden bilimsel gözlemlere kadar pek çok görev açısından hayati öneme sahiptir.

Özellikle yönelim belirleme süreçlerinde, uzay aracına sabitlendiği kabul edilen gövde eksenleri ile referans alınan dış bir eksen takımı (örneğin Dünya'ya sabit ya da ataletsel eksen takımı) arasında bir dönüşüm yapılması gerekir. Bu dönüşüm için genellikle dönüşüm matrisleri kullanılır. Dönüşümler, kimi zaman birim vektörler ya da trigonometrik fonksiyonlar ile tanımlanırken, çoğu zaman pratikliği ve hesaplama avantajı nedeniyle dördeyler ile temsil edilir.

Bu bölümde, uzay araçlarında kullanılan başlıca konum ve yönelim belirleme sensörleri ile bu sensörlerden elde edilen verilerle hesaplamaya yönelik kullanılan yöntemler ele alınacaktır.

UFUK SENSÖRLERİ

Ufuk sensörleri, Dünya'nın ufuk çizgisini (limb) algılayarak bunu uzay aracının yönelimini belirlemede kullanan pasif algılama sistemleridir. Bu sensörler ufuk (horizon), dünya (earth) ya da dünya ufuk (earth horizon) olarak isimlendirilebilmektedir. Dünya'nın atmosferinin termal emisyonunu algılayarak çalışan bu sensörler, özellikle Dünya'nın kızılötesi spektrumda (14-16 μm) yayılan radyasyonunu ölçerler (Kaplan vd., 2006). Temel çalışma prensibi, Dünya'nın atmosferi ile uzay boşluğu arasındaki sıcaklık farkının oluşturduğu belirgin ışımayı tespit etmeye dayanır. Yapılan ölçümler sayesinde, aracın Dünya'ya göre yönelim açıları (pitch ve roll) hesaplanabilir (Sidi, 2000). Yönelim belirlemede üç boyutlu hareketin hesaplanması gerektiğinden azimut ve yüksekliği belirlemek için güneş sensörleriyle birlikte çalışarak tam yönelimin belirlenmesine katkı sağlarlar. Modern ufuk sensörleri genellikle statik ve tarama yapan (scanning) sistemler olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Statik sistemler, ufuk çizgisine

sabit bir şekilde odaklanırken, tarama yapan sistemler bir optik mekanizma kullanarak ufuk hattını periyodik olarak tarar (Wang vd., 2022). Tarama yapan sistemler genellikle daha yüksek doğruluk sağlar ancak mekanik karmaşıklıkları nedeniyle güvenilirlik sorunları yaşayabilirler.

Ufuk sensörleri, özellikle Dünya yörüngesi görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve seyrüsefer sistemlerinin temel bileşenlerinden biridir. Bu sensörler, alçak Dünya yörüngesi ve yer sabit yörüngedeki uydularda, aracın Dünya'ya yönelimini korumak için kullanılır (Fortescue vd., 2011). Örneğin, haberleşme ve gözlem uydularında, anten veya kameraların Dünya'ya doğru yönlendirilmesi için bu sensörlerden alınan veriler kullanılır.

Ufuk sensörlerinin en önemli avantajlarından biri, pasif sistemler olmalarıdır. Bu özellik, güç tüketimlerinin düşük olmasını sağlar ve uzun ömürlü uzay görevleri için idealdir (Griffin vd., 2004). Ayrıca, yapısal olarak basit ve güvenilirdir, mekanik parçaları minimal düzeyde olan statik ufuk sensörleri uzun yıllar sorunsuz çalışabilir. Küçük uydular için gövdeye monte edilirken büyük uydularda hareketli parçalar içerebilir (Nguyen vd.,2018).

Bununla birlikte, bu sensörlerin bazı önemli kısıtlamaları da vardır. En önemli kısıtlama, doğruluklarının sınırlı olmasıdır. Modern ufuk sensörleri 0.1 ile 0.5 derece arasında bir doğruluk sağlayabilirken, yıldız takip sistemleri gibi daha gelişmiş yönelim belirleme sistemleri 0.001 derecelik hassasiyet sunabilir. Ayrıca, ufuk sensörleri yalnızca gök cisimlerinin atmosfere sahip olduğu durumlarda etkili şekilde çalışır, bu nedenle derin uzay görevlerinde kullanımları sınırlıdır.

Bir diğer önemli kısıtlama, atmosferik koşullardan etkilenmeleridir. Mevsimsel değişiklikler, tutulma dönemleri, atmosferik anomaliler veya Güneş aktivitesi gibi faktörler, ufuk çizgisinin algılanmasını etkileyebilir ve ölçüm hatalarına yol de kullanılırlar (Montenbruck vd., 2012). Ancak bu gibi durumlarda, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren görevlerde ek seyrüsefer sistemleriyle desteklenmeleri gerekir.

ATALETSEL ALGILAMA SİSTEMLERİ

Ataletsel algılama sistemleri, bir nesnenin konumunu ve hareketini dış referanslara ihtiyaç duymadan belirleyebilen seyrüsefer teknolojileridir. Newton'un hareket yasaları ve atalet ilkesine dayalı olarak çalışan bu sistemler, havacılık, savunma, sağlık ve özellikle uzay araştırmaları gibi çeşitli alanlarda hayati öneme sahiptir (Sidi, 2000). Uzay görevlerinde, dış referansların yetersiz kaldığı ya da hiç bulunmadığı koşullarda güvenilir

yönelim ve konum bilgisi sağlama kapasiteleri sayesinde vazgeçilmez bir rol oynarlar.

Bu sistemlerin temel yapı taşlarını dönü ölçerler ve ivmeölçerler oluşturur. Dönü ölçerler aracın açısal hızını tespit ederken, ivmeölçerler doğrusal ivmeyi algılar. Ölçülen bu veriler, işlenerek aracın konum ve yönelim hesabında kullanılırlar. Ataletsel algılama sistemleri başlangıçta belirlenen konum ve yönelim bilgisine dayanarak sürekli güncellenen hareket tahminleri üretir. Günümüzde bu sistemler, genellikle Ataletsel Ölçüm Birimleri (IMU) biçiminde tasarlanmakta ve üç eksenli dönü ölçerler ile üç eksenli ivmeölçerlerden oluşmaktadırlar (Titterton ve Weston, 2004).

Uzay görevlerinde kullanılan dönü ölçer teknolojileri farklı türlerde sınıflandırılır. Mekanik dönü ölçerler oldukça eski teknoloji olduklarından artık tercih edilmeseler de, Fiber Optik Dönü ölçerler (FOG) ve Halka Lazer Dönü ölçerler (RLG) yaygın olarak kullanılmaktadırlar. FOG'lar, içinde hareketli parça bulunmaması sayesinde yüksek güvenilirlik sunarlar ve uzun ömürlüdürler (Groves, 2013). RLG'ler ise yüksek doğrulukları sayesinde uzun süreli bilimsel görevlerde tercih edilirler. Mikro-elektromekanik sistem (MEMS) tabanlı dönü ölçerler ise düşük maliyetleri, küçük boyutlu yapıları ve hafiflikleriyle özellikle küçük uydu görevlerinde avantaj sağlarlar; ancak hassasiyet açısından optik dönü ölçerlerin gerisindedirler (Titterton & Weston, 2004).

Ataletsel seyrüsefer sistemleri hem Dünya yörüngesinde hem de derin uzay görevlerinde büyük önem taşır. Örneğin, Hubble Uzay Teleskobu gibi bilimsel gözlem uyduları da son derece hassas ataletsel sensörler kullanarak teleskobun gök cisimlerine doğru yönelmesini sağlar ve 0.0001 dereceye kadar doğruluk elde eder. Bu sistemler ayrıca uyduların yörünge kararlılığını korumada, manevraları yönlendirmede ve aracı doğru hedeflere yönlendirmede de kullanılır (Wertz vd., 2012).

Ataletsel algılama sistemlerinin en büyük üstünlüğü, dış referanslara gerek duymadan tamamen bağımsız çalışabilmeleridir. Bu özellik, özellikle küresel konumlama sistemleri (GNSS) sinyallerinin alınamadığı derin uzay görevlerinde büyük önem taşımaktadır (Montenbruck vd., 2012). Ayrıca bu sistemler, yüksek veri aktarım hızları sayesinde dinamik ortamlarda da güvenilir sonuçlar sunar. Ancak, en büyük eksikliği ise zamanla oluşan hata birikimidir. Küçük sensör hataları entegrasyon sürecinde zamanla artar ve gerçek verilerden sapmalara yol açabilir (Groves, 2013). Dolayısıyla zamanla ölçüm hataları ve sürüklenme nedeniyle doğruluğunu yitirebilir. Bu yüzden, modern ataletsel algılama sistemleri yüksek işlem gücüne sahip işlemciler ve gelişmiş hata düzeltme algoritmaları içerir. Özellikle Kalman filtreleri, sensör gürültülerinin modellenmesi ve sapma hatalarının giderilmesi amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Farrell, 2008).Ayrıca uzun süreli görevlerde ataletsel algılama sistemleri genellikle GNSS, yıldız izleyici ya da güneş sensörleri gibi harici referans sistemleriyle entegre edilerek kalibre edilir.

UYDU ALTİMETRESİ

Uydu altimetresi, bir uzay aracı ile referans bir yüzey (genellikle Dünya yüzeyi) arasındaki mesafeyi ölçen, bir uzaktan algılama sistemidir. Bu sistem, radar veya lazer tabanlı sensörler kullanılarak tasarlanabilir (Fu vd., 2001). Altimetrenin temel çalışma prensibi, uzay aracından hedef yüzeye doğru bir sinyal gönderilmesi ve bu sinyalin yüzeyden yansıyarak geri dönmesi için geçen sürenin ölçülmesine dayanır. Işık hızı bilindiği için, bu süre kullanılarak mesafe hesaplanabilir.

Modern gezegen keşif görevlerinde, yüksek hassasiyetli lazer altimetreleri, aracın iniş bölgesindeki arazi özelliklerini haritalamak ve en güvenli iniş noktasını belirlemek için kullanılır (Smith vd., 2010). Ayrıca, Dünya yörüngesindeki görevlerde, altimetre verileri uydu yörüngesinin hassas şekilde belirlenmesine katkıda bulunur. Özellikle okyanus ve buz kütlelerinin gözlemlendiği görevlerde, altimetre verileri hem bilimsel veriler sağlar hem de seyrüsefer hesaplamalarına destek olur (Fu vd., 2001).

Radar altimetreleri, gece-gündüz çalışabilme ve bulutlardan etkilenmeme gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikler, sürekli ve güvenilir veri akışı sağlar. Lazer altimetreleri ise, daha yüksek çözünürlük ve daha dar bir ışın genişliği sunar, bu sayede daha detaylı yüzey haritalaması yapılabilir (Robinson, 2010).

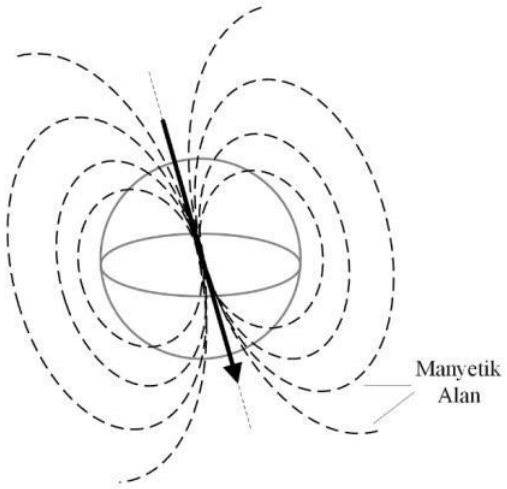
Bununla birlikte, altimetrelerin bazı kısıtlamaları da vardır. Lazer altimetreleri, bulutlu veya sisli koşullarda etkisiz kalabilir, bu nedenle özellikle Dünya gözlem görevlerinde sınırlı kullanım alanına sahiptir. Radar altimetreleri ise, daha düşük çözünürlüğe sahiptir ve yüzeyin elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak ölçüm hataları oluşabilir.

Ayrıca, altimetre sistemleri genellikle güç tüketimi yüksek sistemlerdir. Bu durum, özellikle uzun ömürlü görevlerde veya küçük uydu projelerinde güç yönetimi açısından zorluklar oluşturabilir (Kaplan vd., 2006).

MANYETOMETRELER

Manyetik alanlar, elektrik akımları ve manyetik yüklerin oluşturduğu kuvvet alanlarıdır. Bu alanların büyüklüğünü ve yönünü ölçmek için kullanılan cihazlara manyetometre denilmektedir. Manyetometreler, uzay görevlerinde yönelim belirleme, Dünya'nın manyetik alanını ölçme (Olsen vd., 2015), gezegenlerin manyetik özelliklerini inceleme (Connerney vd., 2017) ve çeşitli bilimsel gözlemler gibi kilit görevlerde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Dünya'dan yayılan manyetik alanın bir temsili Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Dünya'nın manyetik alanı

Manyetometreler, bulunduğu noktaya ait manyetik alan bilgisini veya vektörünü sağlar. Bunlar, Dünya kaynaklı manyetik alan vektörünü gövde eksen takımında üç boyutlu olarak ölçen sensörlerdir. Hafif olmaları, hareketli parçalarının bulunmaması, düşük güç tüketmeleri ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle uzay araçlarında yaygın olarak kullanılan sensörlerdir (Söken vd.,2017). Manyetometrelerin etkinliği; cihazların hassaslığı, dayanıklılığı ve uzay aracı sistemlerine entegrasyonlarının başarısıyla doğrudan ilişkilidir (Wertz, 1978). Doğru manyetik alan ölçümleri, yalnızca bilimsel araştırmalar için değil, aynı zamanda uzay araçlarının yönelim belirlemesi için de kritik öneme sahiptir. Manyetometreler, Dünya kaynaklı manyetik alanı gövde koordinat sisteminde üç eksende ölçer. Ancak matematiksel olarak yalnızca iki eksende yönelim bilgisi sağladıkları için tek başına üç eksenli yönelim çözümü sunamazlar (Michalareas vd., 2002). Bu sebeple genellikle güneş sensörleri veya yıldız izleyicilerle birlikte kullanılırlar. Ayrıca, Dünya'nın manyetik alanı uzaklığın küpüyle azaldığından ($\sim 1/r^3$), manyetometrelerin etkinliği çoğunlukla alçak yörüngeli uydular ile sınırlıdır (Wertz, 1978; Fortescue vd., 2011).

Manyetometre ölçümlerinin yönelim belirlemede kullanılabilmesi için, uzay aracının bulunduğu konumdaki referans manyetik alan vektörünün bilinmesi gerekir. Bu referans genellikle IGRF (International Geomagnetic Reference Field) modeli üzerinden elde edilir. IGRF sabit bir model değildir; Dünya'nın manyetik alanındaki değişimlerden ötürü her beş yılda bir güncellenir (Finlay, 2010; Kuwahara vd., 2016). Ancak bu modeldeki hatalar, yönelim tespitinde yaklaşık 0.5° seviyesinde sapmalara yol açabilir (Fortescue vd., 2011).

Manyetometreler özellikle manyetik torklayıcılarla birlikte kullanıldığında, küçük uydular için düşük maliyetli ve enerji açısından verimli bir ADCS (Attitude Determination and Control Subsystem) çözümü sağlarlar (Larson ve Wertz, 1999). Manyetometre, bulunduğu konumdaki manyetik alan vektörünü ölçerek kontrol algoritmasına anlık çevresel bilgi sunar. Bu algoritmalar istenen tork ile manyetik alan arasındaki uygulanabilir momenti hesaplar.

GÜNEŞ SENSÖRLERİ

Güneş sensörleri, özellikle uzay aracının yönelim belirleme ve kontrolü için modern havacılık uygulamalarında kritik bir rol üstlenmektedir. Modern uzay görevlerinde, uyduların güneş panelleri aracılığıyla güç üretim kapasitelerini en üst düzeye çıkarabilmeleri ve bilimsel gözlemleri doğru biçimde gerçekleştirebilmeleri için Güneş'e göre konumlarını yüksek doğrulukla belirlemeleri gerekmektedir. Bu nedenle güneş sensörleri hem enerji yönetimi hem de yönelim belirleme açısından vazgeçilmez bir bileşen olarak kabul edilmektedir (Post vd., 2013; Porras-Hermoso vd., 2022). Güneş sensörleri, hemen her uzay aracında bir ya da daha fazla çeşidi kullanılan en yaygın yönelim belirleme sensörleri arasında yer alır. Bu kadar sık tercih edilmelerinin temel nedenlerinden biri, Güneş'in açısal yarıçapının yörüngeden bağımsız olarak sabit kalması ve oldukça küçük bir değere (yaklaşık 0.267°) sahip olmasıdır. Bu özellik, Güneş'in çoğu durumda noktasal bir ışık kaynağı olarak değerlendirilmesine olanak tanır ve bu sayede hem sensörlerin tasarımı hem de yönelim hesaplamaları büyük ölçüde sadeleşir. Aynı zamanda Güneş, oldukça parlak bir kaynak olduğu için, karmaşık olmayan, düşük güç tüketimli ve güvenilir sensörlerle kolaylıkla algılanabilir.

Güneş sensörleri yalnızca güneş panellerinin doğru yönlendirilmesinde değil; termal denge ihtiyaçlarının karşılanmasında, hassas cihazların (örneğin yıldız izleyiciler) korunmasında ve görev boyunca yönelim kontrol sistemlerine referans sağlanmasında da hayati bir rol oynar. Bu nedenlerle, Güneş vektörünün uzay aracının gövde koordinat sisteminde sürekli izlenmesi ve zamanla nasıl değiştiğinin belirlenmesi neredeyse tüm uydu görevlerinde zorunludur.

Uydu görevlerinde Güneş vektörünün her yönden ölçülebilmesi gerektiğinden, genellikle 120° görüş alanına sahip üç sensör birlikte

çalıştırılarak tam 360°'lik bir kapsama alanı elde edilir. Ancak, görüş alanı genişledikçe ölçüm doğruluğu azalmaktadır. Ayrıca, Dünya yüzeyinden yansıyan güneş ışığının (albedo) etkisinin ayrıştırılması için özel algoritmaların kullanılması gerekir. Teorik olarak ticari ışık açı sensörleri bu işlev için kullanılabilir olsa da, uzaydaki radyasyon ve aşırı sıcaklık gibi zorlu çevresel koşullar nedeniyle uygulamada uygun değildirler. Bu nedenle, uzay görevlerinde kullanılan güneş sensörlerinin aynı zamanda küçük boyut, düşük ağırlık ve düşük enerji tüketimi gibi ek tasarım kriterlerini de karşılaması gerekir (Ortega vd.,2010).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, güneş sensörlerinin etkinliğini artırmak için farklı yöntemlerin geliştirildiğini ortaya koymuştur. Örneğin, güneş panelleriyle birlikte Kalman filtrelerinin uygulanması yönelim belirlemede sağlamlığı artırmakta ve güneş açılarını izlemede hassasiyeti yükseltmektedir (Baroni, 2020). Benzer şekilde, küp uydu projelerinde genellikle manyetik sensörlerle birlikte güneş sensörlerinin kullanılması, düşük maliyetli, ağırlığı düşürme ve böylece yönelim belirlemede güvenilir çözümleri sunmaktadır (Nurgizat vd., 2023). Bu tür farklı sensörlerden elde edilen bilgiler sayesinde, yüksek doğrulukta bilimsel veri toplayarak küçük uyduların yörünge ayarlamasına destek olabilmektedir.

Güneş sensörlerinin temel görevi, uzay aracının referans eksen takımına göre yönelim açısını belirlemektir. Güneş sensörlerinin analog ve dijital (sayısal) güneş sensörleri olmak üzere iki türü bulunur. Analog güneş sensörlerinde genellikle fotodiyotlar, fotovoltaik hücreler veya ışığa duyarlı dirençler (LDR) gibi basit yapıdaki algılayıcı elemanlar tercih edilir. Dijital güneş sensörleri, yüksek hassasiyet gerektiren görevlerde kullanılan ileri düzey sistemlerdir. Günümüzdeki dijital güneş sensörleri ise CCD (Charge Coupled Device) ya da APS-CMOS (Active Pixel Sensor in Complementary Metal-Oxide Semiconductor) temelli algılayıcılar kullanır (Boldrini vd., 2009). Bu sistemlerde fotodiyotlar piksel seviyesinde çalışır; Güneş ışığı ile oluşan parlak nokta görüntü düzleminde algılanır ve işlenerek açısal bilgiye dönüştürülür. Bu sayede Güneş vektörü, sensörün kendi koordinat sisteminde yüksek doğrulukla hesaplanabilir.

KÜRESEL KONUMLAMA SİSTEMİ

Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Navigation Satellite Systems - GNSS), günümüzde hem yeryüzündeki uygulamalarda hem de uzay görevlerinde en yaygın kullanılan konumlandırma ve yön bulma sistemlerinden biridir. Farklı ülkeler tarafından tasarlanmış GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, IRNSS olarak isimlendirilen konumlandırma sistemleri mevcuttur. Uzay görevlerinde GNSS alıcıları, özellikle alçak Dünya yörüngesinde görev yapan uyduların konum, hız ve zaman bilgilerini hassas şekilde elde etmelerini sağlayan önemli bileşenlerden biridir.

GNSS'in çalışma mantığı, temel olarak yüksek hassasiyetli zaman ölçümüne dayanır. Her GNSS uydusu, içinde bulunan çok hassas atomik saatler sayesinde kesin zaman bilgisi üretir ve bu zamanla senkronize edilmiş sinyalleri sürekli olarak Dünya'ya gönderir. Bir uzay aracında bulunan GNSS alıcısı ise, en az dört farklı GNSS uydusundan gelen bu sinyalleri alır ve her bir sinyalin alıcıya ulaşma süresini ölçer. Sinyaller ışık hızında yayıldığı için, bu ulaşım süreleri ile uydulara olan mesafeler hesaplanabilir.

Bu hesaplama sırasında üç farklı uydudan alınan mesafe bilgisi, alıcının uzaydaki üç boyutlu konumunu belirler. Dördüncü uydu ise, alıcının saatinde oluşabilecek sapmayı düzeltmek için kullanılır ve böylece hem hassas konum hem de doğru zaman bilgisi elde edilir. Bu konum belirleme süreci, GNSS alıcısında iki temel izleme döngüsü üzerinden yürütülür: kod izleme döngüsü ve taşıyıcı izleme döngüsü. Kod izleme döngüsü, uyduların gönderdiği sahte rastgele kodları alıcıdaki yerel kodlarla karşılaştırarak mesafe ölçümünü yapar. Taşıyıcı izleme döngüsü ise sinyalin taşıyıcı fazını takip eder; bu sayede çok daha yüksek doğrulukta konum belirleme mümkün olur. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması hem konum hem de hız ölçümlerinde yüksek hassasiyet sağlar (Aydın, 2010). Bu işlem sırasında alıcının her bir uyduya olan mesafesi, sinyalin gönderildiği ve alındığı zaman farkı çarpı ışık hızı üzerinden hesaplanır. Bu mesafe ölçümleri hem konum hem de saat hatası bilgilerini içeren bir matematiksel modelle ifade edilebilir.

Uzay görevlerinde GNSS, yalnızca uzay aracı konumunun belirlenmesinde değil; aynı zamanda yörünge tespiti, seyrüsefer ve eş zamanlama gibi kritik işlevlerde de etkin biçimde kullanılır. Bu sayede yer kontrol istasyonlarına olan bağımlılık azalır, görevler daha özerk bir şekilde yönetilebilir hale gelir ve işletim maliyetleri düşer (Gerner vd., 2000).

Ancak GPS sisteminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle üst atmosferdeki katmanlar ve iyonosfer, GPS sinyallerinin yayılım hızını etkileyerek ölçümlerde hatalara neden olabilir. Ayrıca GNSS, Dünya çevresinde sınırlı bir alanda çalıştığı için derin uzay görevlerinde yeterli sinyal alınması mümkün değildir. Bu nedenle uzun süreli veya uzak mesafeli

görevlerde, GNSS genellikle yıldız izleyici sistemleri ya da ataletsel seyrüsefer teknolojileriyle birlikte entegre biçimde kullanılır.

Sonuç olarak, uzay araştırmalarında artan otonom kontrol ihtiyacı ve hassas konumlandırma gereksinimleri düşünüldüğünde, GNSS alıcılarının kullanımı gelecekte çok daha yaygın hale gelecektir.

YILDIZ TARAYICI

Yıldız tarayıcı, bir uydunun ya da uzay aracının uzaydaki yönelimini yüksek hassasiyetle belirlemek amacıyla kullanılan optik bir algılayıcı sistemdir. Yıldız tarayıcı, yüksek çözünürlüklü kameraları sayesiyle yıldızları yakalar ve daha öncesinde belirlenen ve yüklenen bir yıldız kataloğu ile karşılaştırır. Hesaplanan veriler sayesinde uzay aracının uzaydaki konumuna göre olan yönelimi hesaplanabilir. Yıldız tarayıcı, diğer yönelim belirleme araçlarına göre düşük hata payı vardır ve uzun vadelidir. Bu yüzden uzay çalışmalarında en güvenilir yönelim belirleme sensörlerinden biri olarak kabul edilir. Yıldız tarayıcılardan biri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil2. Sodern's Hydra yıldız tarayıcı

Yıldızlar, gökyüzünde konumları neredeyse sabit kabul edilen ve yıllar boyunca gözlemlerle detaylı bir şekilde kataloglanan gök cisimleridir.

Bu sabitlikleri, yıldız tarayıcılarının yön bulma sistemlerinde ana referans noktaları olarak kullanılmalarını mümkün kılar. Yıldız tarayıcılar, görev öncesi yüklü yıldız kataloglarını referans alarak elde ettikleri yıldız görüntülerini bu kataloglarla karşılaştırır. Bu sayede uzay aracının yönelimi yüksek doğrulukla tespit edilir.

Bu kataloglar arasında en yaygın olanlar Hipparcos ve Gaia kataloglarıdır. 1989'da fırlatılan Hipparcos uydusundan elde edilen verilerle oluşturulan Hipparcos kataloğu, yaklaşık 118.000 yıldızın konum ve parlaklık bilgisini içerir. Günümüzde ise Gaia kataloğu, milyonlarca yıldızın son derece hassas konum ve parlaklık verilerini sağlayarak yıldız tarayıcıların daha da hassas çalışmasına olanak tanır.

Yıldız tarayıcılarının çalışması, ilk olarak yıldızların algılanmasıyla başlar. Bu aşamada CCD ya da CMOS sensörlü optik sistemler kullanılır (Ying vd.,2006).

CMOS sensörler düşük güç tüketimi ve hızlı veri işleme özellikleriyle günümüzde daha sık tercih edilirken; CCD sensörler daha fazla enerji harcar ve daha yavaş çalışır ancak daha hassas ve düşük gürültülü görüntüler sunar.

Geleneksel yıldız algılama yöntemleri arasında görüntü moment analizi ve nokta yayılım fonksiyonu (Point Spread Function- PSF) analizi bulunur. Moment analizinde, belirli bir parlaklık eşiğini aşan nesneler yıldız olarak tanımlanır; ancak bu yöntem, yıldız olmayan bazı gök cisimlerinin de yanlışlıkla yıldız olarak algılanmasına neden olabilir. PSF ise arka plan gürültüsüne göre belirlenen eşiklerle daha güvenli sonuçlar verir, fakat tüm yıldızları yakalama konusunda sınırlı kalabilir.

Son yıllarda, derin öğrenmeye dayalı yöntemler de bu alana entegre edilmiştir. Yapay sinir ağları ilk kez 1980'lerin sonlarında kullanılmaya başlanmış, daha sonra bulanık mantık sistemleriyle gelişmiş ve günümüzde derin sinir ağları sayesinde çok daha doğru yıldız tespiti yapılabilmektedir.

Yıldız tarayıcılar, algıladıkları yıldız desenlerini kataloglarla karşılaştırarak uzay aracının yönelimini üç boyutlu olarak belirleyebilirler. Bu yönüyle, diğer sensörlerin aksine başlangıç yönelimi bilgisine ihtiyaç duymazlar.

En büyük avantajlarından biri, kesintisiz yönelim bilgisi sağlamalarıdır. Örneğin, uzay aracı Dünya'nın gölgesine girdiğinde Güneş sensörleri ve ufuk sensörleri işlevsiz hale gelirken, yıldız tarayıcılar yalnızca yıldız ışığına ihtiyaç duydukları için çalışmaya devam ederler. Bu nedenle yıldız tarayıcılar, Güneş sensörleri, Dünya sensörleri ve manyetometrelerle birlikte kullanıldığında sistemin genel doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Ayrıca, diğer sensörler yalnızca iki eksende bilgi sunarken, yıldız tarayıcılar üç eksende tam yönelim verisi sağlar.

TEPKİ TEKERİ

Tepki tekerlekleri uzay yönelim kontrolünde önemli bir rol oynar. Tepki tekerlekleri, uzay görevlerinde temel olarak bir uzay aracının yönlendirilmesini sağlamak için kullanılan eyleyicilerdir. Bu cihazlar, açısal momentumun korunumu prensibi ile çalışır. Tepkime tekerlekleri, bir motor tarafından döndürülen bir tekerlek şeklindedir. Bir cisim dönerken, yön değiştirildiğinde, tepki tekerlekleri de bu açısal değişimle orantılı olarak dönmeye başlar ve böylece cismi istenen yöne yönlendirir (Önen ve Çakan, 2021).

Tepki tekerleklerinin çalışma prensibi, açısal ivmelenmeye dayanır. Bu tekerlekler, yüksek hızlarda döndürülerek açısal momentum depolar. Tekerlekler dönerken, bu açısal momentum uzay aracına ters yönde bir moment uygular (Wu vd., 2015). Örneğin, bir tekerleklerin dönüş yönü değiştiğinde, uzay aracı bu duruma karşıt yönde döner. Bu, uzay aracının istenilen yöne çevrilmesini sağlar ve uzay aracının yörüngesinin veya pozisyonunun hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır (Ye ve Li, 2014).

Modern uzay görevlerinde çok eksenli kontrol sistemleri tercih edilmektedir. Üç eksenli konfigürasyonda, tepki tekerlerinin her biri uzay aracının birbirine dik eksenlerine hizalanır. Bu çok eksenli düzeneklerde, her bir teker için Euler denklemleri ayrı ayrı değerlendirilir ve sistemin tamamı, birbirine bağlı dinamik denklemler seti olarak modellenir. Bu model, her eksen için açısal momentumun korunumu prensibini ve tekerler arası etkileşimleri içeren diferansiyel denklemler şeklinde ifade edilebilir (Ismail ve Varatharajoo, 2008).

Tepki tekerleklerin çalışması üç aşamalıdır, bunlar normal çalışma modu, momentum boşaltması ve dönme sönümlemesidir. Normal işletim modunda tekerler, uzay aracına uygulanan bozulma torklarını dengelemek ve görev hedefleri doğrultusunda istenen yönelim ve açısal hız kontrolünü sağlamak amacıyla sürekli olarak çalışır. Bu durumda, kontrol algoritmaları tepki tekerlerinin dönüş hızını ayarlayarak hassas yönlendirme ve sistem kararlılığı sağlamada etkin rol oynar. Bu modda sistem, aktif olarak uzay aracı üzerindeki dahili ve harici bozulma etkilerine karşı hızlı yanıt verecek şekilde ayarlanır (Narkiewicz vd., 2020).

Momentum boşaltma modu, uzun süreli operasyonlarda tepki tekerinin aşırı açısal momentum birikimini önlemek amacıyla kullanılan yöntemlerden biridir. Uzay ortamında sürekli olarak maruz kalınan güneş radyasyonu ve yerçekimi gradyanı gibi dış etkenler, tekerlerde momentum birikimine yol açabilir; bu durumda teker doygunluk seviyesine ulaşır ve kontrol etkinliği azalır (Mayfield, 2024). Bu problemin çözümü için, sistemler genellikle manyetik torklayıcı veya alternatif aktüatör kombinasyonları ile entegre çalışarak birikmiş momentumun güvenilir şekilde boşaltılmasını sağlar (Mayfield, 2024). Böylece, çarkların işletim

aralığı, ortam koşullarına göre optimize edilir ve uzun süreli görev performansı korunur (Narkiewicz vd., 2020).

Dönme sönümlemesi modu, uzay aracı görevlerinde özellikle ilk yerleştirme ve acil durum evrelerinde kritik bir işletim yöntemidir. Bu mod, uzay aracının fırlatma sonrası veya belirli hata durumlarında ortaya çıkan yüksek açısal hızları düşürmek ve uzay aracını kontrol edilebilir veya kararlı bir hale getirmek amacıyla uygulanır (Yadav ve Goyal, 2020). Dönme sönümlemesi, uzay aracının yönelimini belirlemede kullanılan sensörlerden (örneğin, üç eksenli manyetometre ve dönü ölçer) elde edilen veriler temelinde, uygun kontrol algoritmaları aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu algoritmalar, uzay aracının mevcut açısal hızını belirleyerek, uygulanan torkların yönetilmesi ve manyetik torklayıcılar gibi yavaşlatıcı sistemlerin devreye sokulmasına olanak tanır (Mohsen vd., 2023).

MANYETİK TORKLAYICILAR

Manyetik torklayıcılar, hafiflikleri, düşük güç tüketimleri ve belirli işletim ortamlardaki etkinlikleri nedeniyle küçük uyduların yönelim kontrol sistemlerinde önemli bileşenler olarak ortaya çıkmıştır. Temel çalışma prensipleri, indüklenen manyetik alanların Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşimine dayanır ve yönelim ayarlamaları için gerekli torkların üretilmesini sağlar. Manyetik torklayıcılar manyetometrelerle birlikte çalışabilirler. Manyetometrelerden gelen manyetik alan bilgisiyle uzay aracının istenilen doğrultuya getirilmesinde kullanılır.

Manyetik torklayıcıların temel avantajı, özellikle alçak Dünya yörüngesinde faaliyet gösteren düşük maliyetli ve yüksek entegrasyonlu uydular için kullanışlı olmalarıdır. (Xia vd., 2021). Manyetik torklayıcılar kullanan aktif manyetik yönelim kontrol şemalarının bu bağlamda güvenilir performans sağladığı belirtilmektedir (Xia vd., 2021). Manyetik torklayıcıların hafif olmaları ve daha az güç kullanmaları nedeniyle geleneksel kontrol sistemlerinde ve küçük uydu uygulamaları için avantajlı olmaktadır (Zhou, 2015).

Manyetik torklayıcılar, genellikle tel sarımıyla oluşturulmuş bir bobinden geçen elektrik akımı sayesinde bir manyetik moment oluşturur. Bu moment, Dünya'nın yerel manyetik alanıyla etkileşecek şekilde bir tork oluşturur. Tork Dünyanın manyetik alanına sadece dik bileşen doğrultusunda oluştuğundan torklayıcılar anlık olarak 3 eksende tam kontrol sağlayamaz, ancak yörünge boyunca ortalama bir kontrol uygulanabilir.

Manyetik torklayıcıların etkinliği, uzay aracının bulunduğu yörüngedeki Dünya manyetik alanının şiddetine ve yönüne bağlıdır. Alçak Dünya yörüngesi manyetik tork üretimi açısından en elverişli bölgedir; zira bu irtifada Dünya'nın manyetik alanı güçlüdür ve yönelime ilişkin kontrol etkili biçimde sağlanabilir. Orta ve yer sabit yörüngelerde ise manyetik alanın zayıflaması nedeniyle tork üretimi ciddi biçimde kısıtlanır. Bu nedenle, bu yörüngelerde manyetik torklayıcılar genellikle yalnızca yardımcı aktüatör olarak kullanılmakta veya hiç tercih edilmemektedir. Güneş eşzamanlı ve kutupsal yörüngeler gibi yüksek eğimli yörüngelerde ise tork üretimi yönelime bağlı olarak değişmekte olup, zamana bağlı ortalama kontrol yöntemleriyle yeterli performans elde edilebilmektedir.

DERİN UZAY SEYRÜSEFERİ

Derin uzay seyrüseferi uzay araçlarının Güneş sistemi dışındaki uzak mesafelerde seyahat etmelerini sağlayan bir seyrüsefer türüdür. Uzay araçlarının hedeflenen gök cisimlere nasıl yönlendirildiği, belirlenen rota ve hedeflere ulaşmak için derin uzay seyrüseferinin kullanımını içerir. Bu süreç, uzay aracının konumunu, hızını ve rotasını doğru bir şekilde hesaplayarak, hedeflenen gök cisimlerine güvenli ve doğru bir şekilde ulaşılmasını sağlar. Bu sayede, uzay araştırmaları ve keşifleri, Güneş sistemi dışındaki uzayın derinliklerinde daha ileriye taşınabilir ve insanlığın evrenle ilgili bilgi dağarcığı genişletilebilir.

Derin uzay seyrüseferinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, yıldızların izlenmesidir. Uzay aracı, yıldızların gözlemlenmesi yoluyla kendi konumunu belirler. Bilgisayarlar, yıldızların gökyüzündeki konumlarını tanımlayarak uzay aracının konumunu hesaplar. Uzay aracının hızı ve yönü, Doppler etkisi gibi olgulardan yararlanılarak belirlenebilir. Bu bilgiler, uzay aracının hareketini ve rotasını doğru bir şekilde belirlemek için kullanılır. Uzay aracının hedeflenen gök cisimlerine doğru yönlendirilmesi için karmaşık matematiksel hesaplamalar yapılır. Bu hesaplamalar, uzay aracının konumunu, hızını ve rotasını doğru bir şekilde belirlemek için kullanılır.

Kullanılan teknolojiler arasında, uzay aracının konumunu belirlemek için kullanılan hassas sensörler, güneş sensörleri ve manyetometreler gibi çeşitli sensörler bulunmaktadır. Ayrıca, uzay aracının dünya dışındaki hedeflere doğru yönlendirilmesini sağlamak için bilgisayar tabanlı seyrüseferi yazılımları da kullanılır.

SONUÇ

Bu bölümde astriyonik sistemlerden uzay aracının seyrüseferinde kullanılan konum ve yönelim belirleme sensörleri ele alınmıştır. Bu sensörler uzay aracının yörüngesini koruyabilmesinin, hedeflere doğru yönelmesinin ve görevini güvenli biçimde sürdürebilmesinin ana belirleyicileri olduğundan hayati öneme sahiptirler. Bu sensörlerin genel bir tanıtımı yapılmış, kullanım amaçları hakkında bilgiler verilmiş ve çalışma prensipleri genel hatlarıyla açıklanmıştır. Bu kitap bölümü astriyonik alanında oldukça az olan Türkçe kaynak ihtiyacını karşılamaya katkı sunmuştur.

KAYNAKÇA

Aydın, M. (2010). GPS sistemlerinin mekansal konum belirleme açısından incelenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 25(1), 59–67.

Baroni, G. (2020). Sun sensor and Kalman filter fusion for attitude estimation. IEEE Aerospace Conference.

Boldrini, F., Monnini, E., Procopio, D., Alison, B., Ogiers, W., Innocent, M., Pritchard, A., & Airey, S. (2009). Attitude sensors on a chip: Feasibility study and breadboarding activities. 32nd Annual AAS Guidance and Control Conference.

Connerney, J. E., Adriani, A., Allegrini, F., Bagenal, F., Bolton, S. J., Bonfond, B., ... & Waite, J. (2017). Jupiter's magnetosphere and aurorae observed by the Juno spacecraft during its first polar orbits. *Science*, *356*(6340), 826-832.

Farrell, J. (2008). Aided navigation: GPS with high rate sensors. McGraw-Hill Education.

Finlay, C. C., Maus, S., Beggan, C. D., Bondar, T. N., Chambodut, A., Chernova, T. A., ... & Zvereva, T. I. (2010). International geomagnetic reference field: The eleventh generation. Geophysical Journal International, 183(3), 1216–1230.

Fortescue, P., Swinerd, G., Stark, J. (2011). Spacecraft systems engineering (4th ed.). Wiley.

Fu, L.-L., & Cazenave, A. (2001). Ocean surface topography mission. In Satellite altimetry and earth sciences: A handbook of techniques and applications (pp. 1–10). Academic Press.

Gerner, J. L., Issler, J. L., Laurichesse, D., Mehlen, C., & Wilhelm, N. (2000). TOPSTAR 3000-an enhanced GPS receiver for space applications. ESA bulletin, 104, 86-91.

Griffin, M. D., & French, J. R. (2004). Space vehicle design (2nd ed.). AIAA.

Groves, P. D. (2013). Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems (2nd ed.). Artech House.

İsmail, N., & Varatharajoo, R. (2008). Attitude dynamics and control of satellite using reaction wheels. Journal of Mechanical Science and Technology, 22(9), 1800–1807.

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). Understanding GPS: Principles and applications. Artech House.

Kuwahara, T., Fukuda, K., Sugimura, N., Sakamoto, Y., Yoshida, K., Dorsa, A., ... & Bernelli, F. Z. (2016). Design and implementation of a thermopile-based earth sensor. TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, 14(ists30), Pf_77-Pf_81.

Larson, W. J., Wertz, J. R. (2013). Space mission analysis and design (3rd ed.). Microcosm Press.

Mayfield, M. (2024). Optimizing the time between reaction wheel desaturation maneuvers (Master's report). Georgia Institute of Technology

Michalareas, G., Gabriel, S. B., & Rogers, E. (2002). Spacecraft attitude estimation based on magnetometer measurements and the covariance intersection algorithm. IEEE Aerospace Conference.

Mohsen, K., Ibrahim, M., Kamel, A. M., & Ashry, M. (2023, May). Designing attitude controller for nano/pico satellites at detumbling mode using magnetic sensor and actuator. In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* (Vol. 20, No. 20, pp. 1-8). The Military Technical College.

Montenbruck, O.,Gill, E. (2012). Satellite orbits: Models, methods and applications. Springer.

Narkiewicz, J., Sochacki, M., & Zakrzewski, B. (2020). Generic model of a satellite attitude control system. *International Journal of Aerospace Engineering*, *2020*(1), 5352019.

Nguyen, T., Cahoy, K., & Marinan, A. (2018). Attitude determination for small satellites with infrared Earth horizon sensors. Journal of Spacecraft and Rockets, 55(6), 1466–1475.

Nurgizat, S., et al. (2023). Integrated attitude determination for CubeSats using low-cost sun and magnetometer sensors. IEEE Access, 11, 20001–20015.

Olsen, N., Hulot, G., Lesur, V., Finlay, C. C., Beggan, C., Chulliat, A., ... & Vigneron, P. (2015). The Swarm initial field model for the 2014 geomagnetic field. *Geophysical Research Letters*, *42*(4), 1092-1098.

Ortega, P., López-Rodríguez, G., Ricart, J., Domínguez, M., Castañer, L. M., Quero, J. M., ... & Angulo, M. (2010). A miniaturized two axis sun sensor for attitude control of nano-satellites. *IEEE Sensors Journal*, *10*(10), 1623-1632.

Porras-Hermoso, A., Cubas, J., & Pindado, S. (2022). Use of spacecraft solar panels and Sun sensors for estimation of the Sun-pointing direction in the UPMSat-2 mission. Measurement, 204, 112061.

Post, M. A., Li, J., & Lee, R. (2013). A Low-Cost Photodiode Sun Sensor for CubeSat and Planetary Microrover. International Journal of Aerospace Engineering, 2013(1), 549080.

Robinson, I. S. (2010). Satellite altimetry and earth sciences: A handbook of techniques and applications. Academic Press.

Sidi, M. J. (2000). Spacecraft dynamics and control: A practical engineering approach. Cambridge University Press.

Smith, D. E., Zuber, M. T., Jackson, G. B., Cavanaugh, J. F., Neumann, G. A., Riris, H., ... & Zagwodzki, T. W. (2010). The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space science reviews*, *150*(1), 209-241.

Söken, H. E., Sakai, S. (2017). Magnetometer only attitude estimation for spinning small satellites. *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, İstanbul.

Titterton, D. H., Weston, J. L. (2004). *Strapdown inertial navigation technology* (2nd ed.). IET.

Wang, B., Wang, H., & Jin, Z. (2022). An efficient algorithm for infrared earth sensor with a large field of view. *Sensors*, *22*(23), 9409.

Wertz, J. R. (1978). Spacecraft attitude determination and control. Kluwer Academic Publishers.

Wertz, J. R., Everett, D. F., & Puschell, J. J. (2012). *Space mission engineering: The new SMAD*. Microcosm Press.

Wu, S., Wang, R., Radice, G., & Wu, Z. (2015). Attitude maneuver control with reaction wheel friction compensation. *Aerospace Science and Technology, 43*, 213–218.

Xia, Y., et al. (2021). Active magnetic attitude control for small satellites. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 57*(4), 2681–2694.

Yadav, V., & Goyal, D. (2020). Detumbling control of CubeSats using magnetic torquers. *Aerospace Science and Technology, 106*, 106164.

Ye, D., Li, H. (2014). Hybrid thruster and reaction wheels attitude strategy. *IEEE CMC*, 2177–2182.

Ying, D., Zheng, Y., Fei, X., & Qin, C. (2006). Miniature Autonomous Star Tracker Based on CMOS APS.

Zhou, Y. (2015). Attitude control using magnetic torquers in CubeSats. *Acta Astronautica, 115*, 238–246.

Buji Ateşlemeli Motorlarda Termal Bariyer Kaplamaların HC Emisyonlarına Etkisi: Deneysel ve Teorik Bir Yaklaşım

Bahtiyar ÇETİN[1]
İdris CESUR[2]

1- Bahtiyar Çetin.; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. bahtiyrrcetin@gmail.com, ORCID No: 0009-0006-9462-2434
2- Prof. Dr. İdris CESUR; Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. icesur@subu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7487-5676.

ÖZET

İçten yanmalı motorlarda ısı kayıpları, motor verimliliğini ve performansını olumsuz yönde etkileyen temel problemlerdendir. Bu nedenle motor bileşenlerinin hacimleri, montaj geometrileri, malzeme özellikleri ve boyutları, ısıl kayıpların en aza indirgenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Isı geçişini azaltmak ve motorun termal verimini artırmak amacıyla motor parçaları üzerinde çeşitli yüzey kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu çalışmada, kısmi termal bariyer kaplamanın (TBK), kıvılcım ateşlemeli bir motorun soğuk çalıştırma koşullarında piston sıcaklık dağılımı ve hidrokarbon (HC) emisyonları üzerindeki etkisi hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal analizler, ANSYS yazılımı kullanılarak zamana bağlı ısıl analiz yöntemiyle üç aşamada gerçekleştirilmiştir: ilk aşamada 4 mm genişliğinde piston üst yüzeyi seramik kaplanmış, ikinci aşamada piston üst yüzeyi 8mm seramik kaplanmış ve son olarak kaplamasız pistonda (STD) yapılmıştır. Deneysel çalışma ise su soğutmalı, çift silindirli bir buji ateşlemeli motorda yapılmıştır. Kaplama işlemi, piston üst yüzeyi ara bağlayıcı tabaka olarak NiCrAl (150 μm) ve esas kaplama tabakası olarak $MgZrO_3$ seramik (350 μm) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, TBK kaplamalı pistonun STD pistona kıyasla daha düşük ısı geçişine ve daha homojen sıcaklık dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, piston deformasyonunu önemli ölçüde azaltmakta ve bileşenin çalışma ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca, soğuk çalıştırma esnasında kaplamalı pistonun hidrokarbon emisyonlarını azalttığı ve motorun genel termal veriminde iyileşme sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Termal Bariyer Kaplama, HC emisyonları, Buji Ateşlemeli Motor, Piston Sıcaklık Dağılımı, Deneysel ve Sayısal Analiz

GİRİŞ

Hızla artan teknolojik gelişmeler ve iyileşmelerle birlikte yaşamsal standartların yükselmesi, bu yeniliklere ve gelişmelere de bağlı olarak ülkemizdeki taşıt sayısı artmaktadır. Hava kirliliğinin başlıca sebepleri içinde içten yanmalı motorlardan salınan kimyasal gazlar başı çekmektedir. Egzozlardan atmosfere atılan yakıt emisyonlarının çevresel hava kirliliğine etkisi yaklaşık olarak %55'i oranında olduğu saptanmaktadır. Bu sebepten dolayı içten yanmalı motorlardan açığa çıkan hava kirliliğinin çevresel etkilerini önlemek daha temiz ve verimli çalışan motorların üretimi için yıllarca süren çalışmalar ve deneyler yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların amacı araç motorlarından açığa çıkan egzoz emisyonlarını en düşük orana çekmek ve verim arttırıcı yöntemler kullanarak araçlarda hem uzun ömürlü çalışma süreleri hem de sağlıklı bir yaşam ilerletme amacı hedeflenmiştir (Ceylan 2009, Yaşar, 1997).

Motorlu taşıtlarda açığa çıkan emisyonlar yanma sonucu oluşmaktadır. Dizel ve benzinli motorlarda kullanılan Hidrokarbon kökenli yakıtlardan, ideal koşullarda havayla birlikte tam yanma sonucu karbondioksit CO_2, su buharı H_2O ve NOx oluşmaktadır. Reaksiyonun gerçekleşmesinde uygun koşulların oluşmaması durumunda tam yanma gerçekleşmez ve kirletici kimyasal bileşenler oluşmaktadır. Bu yanmamış bileşenler de egzoz aracılığıyla dışarı atılmaktadır. Bileşenlerden en etkili olanları karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), NOx ve partikül maddelerdir (Ayhan vd.,2103, Gürbüz ve Gökkaya, 2014).

Egzozdan atılan emisyonların bileşimleri dizel ve benzinli motorlarda farklı olmaktadır. Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha çevreci bir yakıt türü olmaktadır. Ancak uygun çalışmalar yapıldığında benzinli motorlarda çevrecilik standartlarına uygun hale gelebilir. Benzinli motorlardan açığa çıkan zararlı salınımları önlemek amacıyla bir çok araştırmacıların çalışma konusudur. Yapılan araştırmalar sonucunda alınan bu önlemler üç başlık halinde toplanmıştır. Bunlar; yanma öncesi önlemler, yanma sırasındaki önlemler ve yanma sonrası önlemler olmak üzere sınıflandırılmıştır. Yanma sonrası alınan önlemlerden biri de katalitik konvertör kullanımıdır. Yanmamış hidrokarbon emisyonlarının büyük bir kısmı katalitik konvertör aktif olmadığı için motorun soğuk çalışma sırasında oluşmaktadır. Dönüştürücü verimliliği, soğuk çalıştırma esnasında oldukça düşük olan egzoz gazının sıcaklığına bağlıdır. Soğuk çalıştırma esnasında yanma kararsızlığından dolayı birçok faktör motor hidrokarbon emisyonlarını doğrudan etkiler. Bunlardan birisi yanma kararsızlığıdır ve alevin şarjı yakmasını kısmen veya tamamen reddetmesine yol açmaktadır. Yakıt karışımının kalitesi, yanma ürünlerinin seyreltme derecesi, şarj sıcaklığı, motor hızı ve ateşleme zamanlaması gibi faktörler soğuk çalıştırmayı doğrudan etkilemektedir (Cesur, 2013, Cerit 2010).

Buji ateşlemeli motorların HC emisyonları oluşumundaki sebeplerden en önemlisi piston dış cidar bölgesi yakınındaki alev söndürme bölgeleridir. Bu bölgelerde soğutma sıvısının etkisiyle birlikte sıcaklıkta önemli düşüşler meydana gelmektedir. Buji bölgesinde yanmaya başlayan hava-yakıt karışımı soğuk bölgelerde alevin sönümlenmesinden dolayı yanmamakta bundan sebeple de egzoz zamanında silindirden atılmaktadır (Ayhan vd., 2103).

Buji ateşlemeli motorlarda çalışma şartları sonunda yanma odasındaki elemanların yüzeylerinde yüksek sıcaklık, termal şok, yüksek basınç, düzensizlik içeren termal gerilmeler, kimyasal aşınma gibi istenmeyen durumlar meydana gelmektedir. Bu parametreler parçaların malzeme yüzeylerinde zaman zaman ağır hasarlara neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü yüzey kalitesi düşmektedir. Bu bağlamda motorun performansı ve verim azalmakta kalitesiz yanma durumları da oluşmaktadır. Üstelik yanma odasını oluşturan elemanların aşınmalarından dolayı hem mekanik ömürleri azalmakta hem de emisyon değerlerinin yükselmesine bağlı olarak doğaya ve atmosfere de zarar vermektedir (Büyükkaya, 1994, Ciniviz, 2005, Ak, 2017).

Günümüzde enerji verimliliği ve enerji geri kazanımı, sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. İçten yanmalı motorlarda enerji kayıplarının azaltılması ve atık ısının geri kazanılabilmesi amacıyla, yanma odasını oluşturan bileşenlerin yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerden üretilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, istenmeyen ısı kayıplarını azaltmak ve motorun termal verimini artırmak amacıyla yüzey kaplama teknikleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle pistonlar, supaplar ve yanma odası duvarları gibi ısıl iletimin yoğun olarak gerçekleştiği motor bileşenlerinde, bu kaplama yöntemlerinin uygulanması etkin bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Yaşar, 1996, Hazar ve Öner (2004)).

İçten yanmalı motorlarda ise bu olumsuzluklar giderilebilmesi amacıyla Seramik kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemde aşınma ve korozyona karşı direnç kabiliyeti göstermesi, düşük ısı iletkenlikleri ve hafif kütlesinin sebebiyle kullanımı çok yaygınlaşmıştır (Ayhan vd.2013, Yaşar, 1996).

Literatürde seramik kaplama çalışmaları birçok araştırmacı tarafından incelenmiş, deneysel ve teorik yöntemde pek çok uygulaması yapılmıştır. Dizel motorlarında kaplama genellikle yanma odası elemanlarında kullanılırken, benzinli motorlarda ise vuruntu durumu oluştuğundan dolayı yanma odası tamamının kaplanması yerine genellikle kısmi kaplama uygulamaları yapılmaktadır.

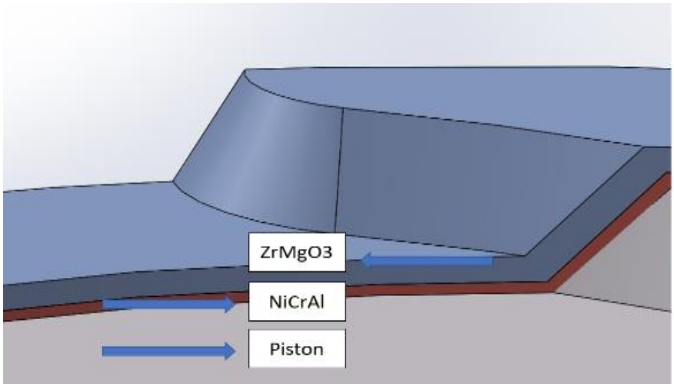
Babu ve arkadaşları, çam yağı bazlı biyodizel kullanılan bir dizel motorda ısıl bariyer kaplamanın performans, yanma ve egzoz emisyonlarındaki değişimlerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, kaplamalı ve biyodizel karışımı yakıtın, standart yakıta kıyasla CO ve HC emisyonlarında sırasıyla %8 ve %14 oranında azalma sağladığı, ancak NO emisyonlarında %19 artış meydana geldiği belirlenmiştir (Babu, 2021). Saravanan ve arkadaşları ise buji ateşlemeli bir motorda biyodizel ve mikro ark oksidasyon yöntemleriyle yapılan kaplamaların etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, kaplama uygulaması ile HC ve CO emisyonlarının sırasıyla %3,1 ve %3,6 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Saravan vd., 2022). Cesur ise kısmen seramik kaplamalı bir motorda benzin ve farklı oranlarda su enjeksiyonunun etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, kaplama ile HC ve CO emisyonlarında iyileşme sağlandığı, ancak NOx emisyonlarında artış gözlemlendiği rapor edilmiştir (Cesur, 2020).

Bu çalışmanın temel amacı, buji ateşlemeli bir motorda kısmi seramik (termal bariyer) kaplamanın, özellikle soğuk ilk hareket koşullarında piston sıcaklık dağılımı, motor performansı ve hidrokarbon (HC) emisyonları üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de sayısal (ANSYS tabanlı termal analiz) yöntemlerle incelemektir. Çalışma, yanma odasındaki ısı kayıplarını azaltarak motorun ısıl verimini artırmayı ve soğuk ilk hareket emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir.

MATERYAL VE METOT

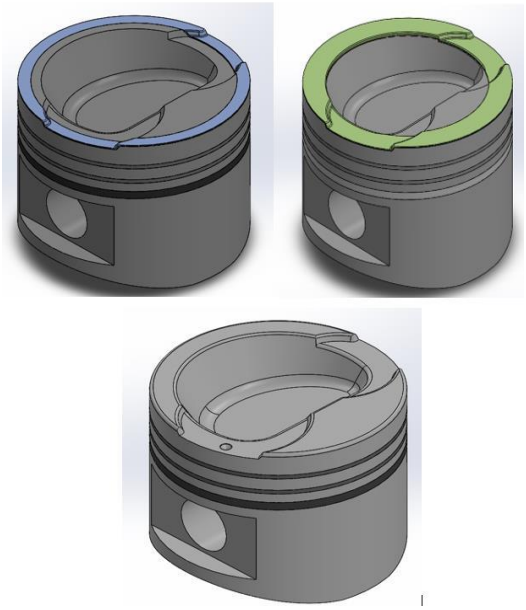
Teorik Yöntem

Çalışma, teorik ve deneysel yöntem olmak üzere iki farklı metotla incelenmiştir. Teorik yöntemdeki çalışma; Cad modellemesi yapılan pistonun üç farklı senaryo üzerinden incelemesi gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız piston ve iki farklı genişlikte üretilen seramik kaplamanın pistona etkilerini ve karşılaştırılması incelenmiştir. Solidworks ortamında çizimi yapılan pistona sırasıyla ara bağlayıcı olan NiCrAl kaplama, ilk çalışmada 4mm genişlikte kaplama, sonraki çalışmada ise 8mm genişliğinde olan $MgZrO_3$ seramik kaplama montajı yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1: Kaplama detayları

Çizimi ve montajı yapılan parçalar Ansys Workbench programında çağırılarak pistonun zamana bağlı termal analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri analizin tam verimde yapılması için programa tanıtılması gereklidir. Bu işlem için literatürden 100 saat çalışmış bir pistonun iç, dış, alt, kenar gibi bölümlerinin maruz kaldığı ısıların yaklaşık değerlerinin olduğu bir tablo hazırlanmıştır. Bu incelemeler sonucunda pistonun en çok ısıya maruz kaldığı bölgenin piston üst yüzeyi, yanma odası ve eteklerinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Kaplamalı ve kaplamasız pistonlar

Belirlenen bu bölgeler için program aracılığıyla sıcaklık ve taşınım değerleri bölgesel olarak eklenmiştir. Sıcaklıkların değerleri seçilen bölgelere konveksiyon yöntemiyle zamana bağlı (transiet) termal analiz yöntemi uygulanmıştır. Analiz doğruluğu için piston, segman ve kaplama malzemelerinin üniform olduğu kabul edilmiştir. Pistonlardaki sıcaklık gradyanlarını değerlendirmek adına zamana bağlı termal analiz yöntemi kullanılacak olup süre 180 saniye olarak kararlaştırılmıştır. FE analizinde 20 düğümlü bir termokare katı eleman kullanılmıştır.

Çalışmanın yapılacağı üç tip piston ve kaplama malzemeleri ayrı ayrı kaydedilmiştir. Analiz programı olan Ansys Workbenche pistonun, ara bağlayıcı kaplamanın(NiCrAl), iki farklı genişlikteki seramik kaplamanın ($MgZrO_3$) ve segmanların termal iletkenlik, termal genleşme, yoğunluk ve özgül ısıları programa engineering data bölümünden tanıtılmıştır (Tablo 1). Literatürden alınan pistonun yanma odası modelindeki sınır şartları sıcaklık ve taşınım değerleri yüzeyler seçilerek tanıtılıp ve kaydedilmiştir (Tablo 2).

Analiz programında zamana bağlı yapılan konveksiyon yöntemiyle termal analiz gerçekleşmiştir. Belirlenen bu yüzeyler piston yanma odası, piston alt-iç yüzeyi, piston etekleri ve seramik kaplamadır. Aynı sıcaklık ve taşınım değerleri verilerek seramik farklı bir yüzey gibi seçilmiştir. Bu durum ışığında pistonun sıcaklık durumu gözlenmiş olup merkezden dışa doğru gidildikçe azalma meydana gelmiştir. Bu azalma esnasında termal bariyer kaplamaya çarparak yüzeyde bulunan ısı artmakta ve orada bulunan sıcaklığı bağlı bölgeye hapsetmektedir.

Tablo 1: Deney malzemeleri özellikleri.

Malzeme	Termal İletkenlik [W/m°C]	Termal genleşme 10^{-6}[1/°C]	Yoğunluk [kg/m^3]	Özgül Isı [J/kg°C]
Ana metal(AISi)	155	21	2700	960
Bağ kaplaması (NiCrAl)	16.1	12	7870	764
Seramik (MgZrO3)	0.8	8	5600	650
Segmanlar	16	12	7200	460

(Ayhan vd., 2013, Cerit, 2010, Cerit ve Çoban, 2014)

Pistona uygulanacak üç farklı senaryo için Engineering data bölümünden malzeme tanımlamaları, 4 ayrı bölgeye ve ayrıca seramik kaplamaya konveksiyon yöntemiyle sıcaklık ve taşınım tanımlama değerleri uygulanmıştır. Ayrıca üç farklı senaryo için 3mm'lik mesh analizi atanmış ve mesh kalitesinde iyileştirmeler yapılmıştır. Analizler 180 saniye boyunca değişkenlik izlemesi açısından transiet analiz yöntemi uygulanmıştır. İlk sıcaklık 22°C olarak tanıtılmış ve analiz buna göre yapılmıştır. Üç farklı senaryo için; piston iç bölgesi, piston etek bölgesi, kaplamalar, piston üst yüzeyi ve gömlek iç yüzeyi olmak üzere 5 farklı bölgeye taşınım ve sıcaklık değerleri girilerek uygulanmıştır. Seramik Kaplamalar ($MgZrO_3$) 4 mm ve 8 mm genişliğinde, 0.35 mm kalınlığında imal edilmiştir. piston ile seramik kaplamanın bağını güçlendirmek için 0.15 mm kalınlığında NiCrAl ara bağ kaplaması kullanılmıştır.

Tablo 2: Uygulanan yüzey sıcakları

Tanımlanan Sınır Şartları	Sıcaklık °C	Taşınım
Piston Üst Yüzeyi	850	450
Gömlek İç Yüzeyi	750	300
Seramik	900	250
Piston İç Yüzey	750	250
Piston Eteği	110	1000

(Ayhan vd., 2013, Cerit, 2010, Cerit ve Çoban, 2014, Parlak, 2007)

Çalışmadaki anlık ısı transfer katsayılarını tahmin etmek için de Hohenberg'in ısı transferi hesaplamaları için gelişmiş yaklaşımlar çalışmasından aşağıdaki korelasyonu kullanılmıştır.

hg(t) = aV(t)-0.06 p(t)0.8T(t)-0.4(sp+b)0.8 korelasyonu çıkarılmıştır.

hg : t anında ısı transfer katsayısı (Wm-2K-1)

V(t) = t anında silindir hacmi (m^3)

P(t) = basınç (bar)

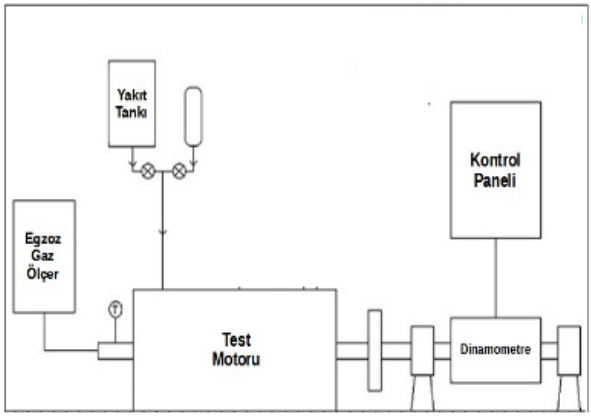
Sp = ortalama piston hızı (ms-1)

A ve b sabittir ve değerleri 130.02 ve 1.41 olarak kullanılır.

Piston üst kısmı için termal analizde çevrim ortalamalı ısı transfer katsayısı ve sıcaklığı kullanılmıştır. Pistonun yağ soğutmalı kısmı için sınır koşulları literatürden 95 °C ve 1500 Wm-2 K-1 olarak elde edilmiştir. Geri kalan sıcaklık ve ısı transfer katsayısı sınır koşulları belirlenmiştir (Ayhan vd., 2013).

Deneysel Yöntem

Deneyler çift silindirli, su soğutmalı bir buji ateşlemeli motorda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasıyla ilk önce STD kaplamsız motorda HC emisyonları ölçülerek yapılmış olup daha sonra sırasıyla kaplamalı pistonlar motora montaj edilerek HC emisyon ölçümleri yapılmıştır. Her deney aşamasında motorun soğuk olduğu ilk hareket şartlarında yapılmıştır. Deneyler yüksüz rölanti şartlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Deney düzeneği

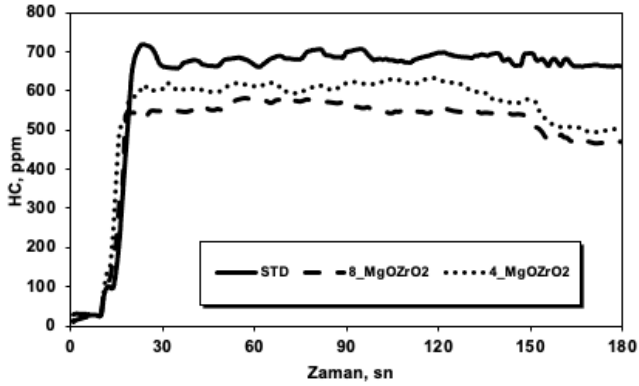
Çalışma motorun ilk hareket esnasında gerçekleştirilmiştir. Motorun ilk 180 sn çalışma şartlarında deneyler yapılmıştır. Gerçekleşen testlerde soğuk çalıştırmanın ilk 180 saniyesi süresince HC emisyonlarını gözetlemek ve ölçmek için Bosch marka emisyon cihazı kullanılmıştır.

Deney motoru, 71,65mm piston çapında, 62mm strok boyunca, 505 mm^3 silindir hacmine sahip, 10,7:1sıkıştırma oranına bulunan, 15 kW güce sahip maksimum 5000 d/d çıkabilen bir benzinli motor kullanılmıştır. Deneylerde ilk olarak std piston ile yapılmıştır. Sonraki aşamalarda ise.

DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Standart piston ve piston üst yüzeyine 4 ve 8 mm genişliklerinde seramik kaplamalar uygulanan pistonların soğuk ilk hareket HC emisyonları değişimi görülmektedir. Buji ateşlemeli motorlara soğuk ilk hareket emisyonları öncelikle motor çalıştırıldıktan sonraki ilk 180 sn de oluşmaktadır. Bu zaman aralığında motorun egzoz bölümünden yanmamış HC emisyonları dışarıya atılmaktadır. Bundan dolayı motorun soğuk ilk hareket emisyonlarını azaltmak adına pistonun üst yüzeyine ısı kapasitesi yüksek olan kısmi seramik malzeme kaplaması yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada; Standart pistonlu motorda termal bariyer çemberli piston kullanılması halinde soğuk ilk hareket HC emisyonlarında azalmalar görülmüştür.

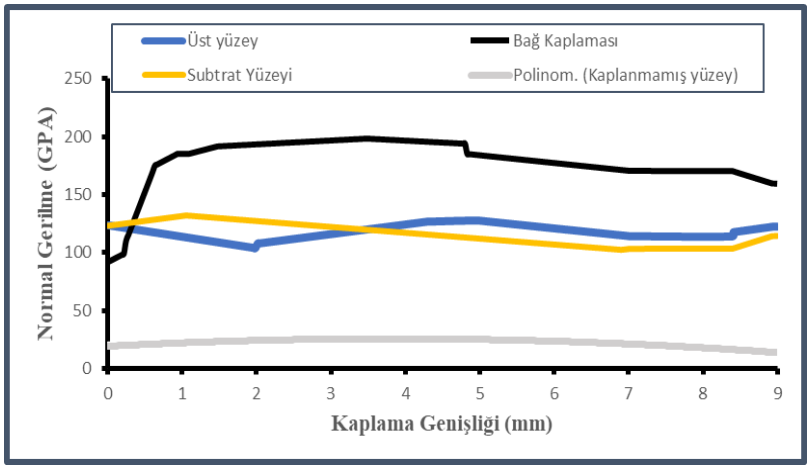
İlk 0-180 sn aralığında programda kaydedilen değer ortalaması alınarak elde edilen sonuçlarda soğuk ilk hareket HC emisyonları karşılaştırılmış Standart pistonun durumuna göre 4 mm $MgO\text{-}ZrO_2$ kaplanmış piston için ortalama % 15 ve 8 mm $MgO\text{-}ZrO_2$ kaplanmış piston içinse ortalama% 25 oranında emisyon azalmaları tespit edilmiştir. Ayrıca, buji ateşlemeli motorlarda kısmi eksik yanma ürünü olan HC emisyonları çok fazladır. HC emisyonlarının oluşumu mekanizmaları araştırıldığında alev sönme bölgeleri HC emisyonları miktarını arttırmaktadır.



Şekil 4: Deneysel olarak zamana bağlı HC emisyon değerleri.

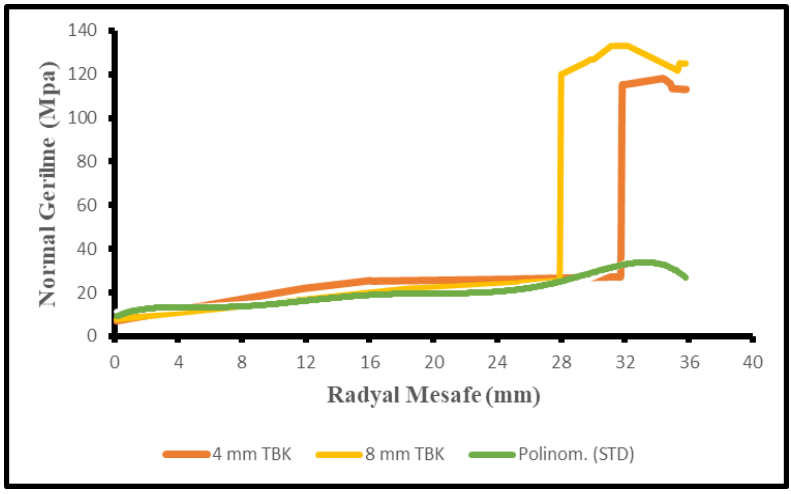
Alev sönümleme bölgeleri yanmanın başlamasından itibaren soğumakta, yanması gerçekleşmeyen yakıt-hava karışımları ile segmanın üst boşluklarına toplanan karışım HC emisyonlarının çoğalmasına da neden olmaktadır. Pistonun tepesini dış yüzeye ısı kaynağı yüksek seramik malzeme ile kaplanması ile gaz ve cidar sıcaklılarını da arttırmaktadır. Bundan dolayı alev sönümleme bölgelerinde oluşan yakıt hava karışımlarının sönmeden oksitlenebilmesi için ayrıca da segman üst boşluklarından dolayı HC emisyonlarının azaltılmasını da sağlamaktadır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte meydana gelen yanma denklemleri daha yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da yanma kalitesi ve verimi artmaktadır. Yanmanın iyileşmesi sonucu oluştuğunda motorlardan kaynaklanan zararlı HC emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.

Standart tip kaplamasız piston ve piston üst yüzeyi 4mm ile 8 mm genişliğindeki kısmi seramik kaplı pistonlar termal analiz yapılmıştır. Kaplaması yapılmayan ve yapılan pistonların üst yüzeylerinde numerik çalışma sonunda ANSYS programından alınan verilerle kabarmanın ana nedeni olan normal gerilmelerin meydana geldiği görülmüştür. Bu gerilmelerden kaplama yapılmamış yüzeyde 13,2-26 GPa arasında tekdüze bir gerilme meydana gelmiştir. Mavi ile gösterilen grafikte, kaplamanın olduğu yüzeyde gerilme değeri 100 - 127 GPa arasındadır. İncelemelere devam edildiğinde altlık ara yüzünün yani substrat yüzeyinin normal gerilme değerinin de 89-118 GPa aralığında seyrettiği Öte yandan da bağ kaplamasının üzerindeki normal gerilmede 88-195 GPa aralığında değişkenlik göstermektedir. Olası tüm durumlar için kaplamaların mesafeye bağlı normal gerilme analizler yapılmış ve bu analizlerce grafikler oluşturulmuştur. Pistondaki tüm senaryoların maksimum değerleri kaplanmış bölgenin tam ortasında gözlemlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: Kaplama genişliğine bağlı gerilme grafiği.

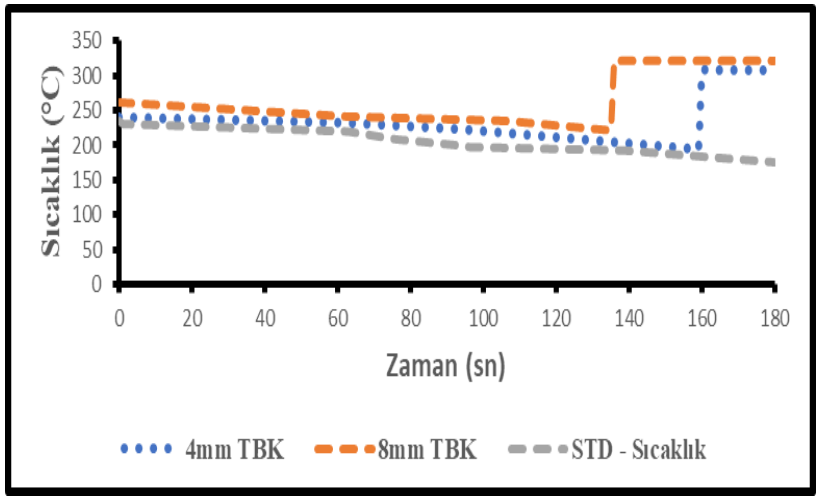
Piston üst yüzeylerinde kaplamalı ve kaplamasız pistonlar için radyal mesafeye bağlı olarak normal gerilmelerin dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir. Standart (STD) kaplamasız pistonda mesafeye bağlı olarak normal gerilme grafiğinde ekstrem bir durum saptanmamıştır. Ancak 4 ve 8 mm genişlikteki TBK'lar 28 ve 32 mm mesafelerine geldiklerinde keskin bir artış olmuştur. Bu noktalarda sıcaklığın verdiği etkiyle birlikte piston yüzeyine etkiyen yük artışı olduğu için gerilmeler bu mesafelerde yükselmiştir. 8 mm kaplamalı piston 28 mm mesafesindeyken maksimum olarak 118 MPa değerini görmüş ardından kaplama mesafesi boyunca seyrini sürdürmüş kaplama genişliğinin ortasına geldiğinde de pik noktasına gelerek 133 MPa değerini görmüş ardından kuvvet düşüşü olduğu azalmaya başlamıştır. 4 mm kaplamalı pistonda da 32 mm radyal mesafesinde yaklaşık olarak 115 MPa'lık bir gerilme ölçüsü elde edilmiştir. Bu pistonda da kaplama boyunca gerilme seyrini korumuş ancak kaplama merkezinde 118 MPa değerini görerek pik yapmış kalan mesafelerde de kaplamanın bittiği noktaya gelene kadar değerinde düşüş meydana gelmiştir (Şekil 6).



Şekil 6: Mesafeye bağlı gerilme grafiği.

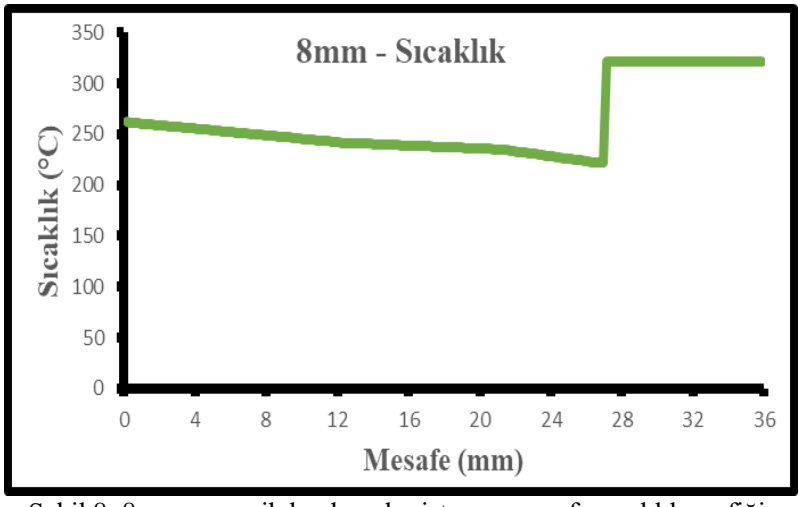
Çalışmada standart kaplamasız piston, piston üst yüzeyi 4mm ve 8 mm kaplama yapılmış pistonların zamana bağlı sıcaklık grafiği yukarıda verilmiştir. Elde edilen değerler sonucunda pistonların ilk soğuk çalıştırma esnasında ateşleme ile açığa çıkan başlangıç sıcaklık değerleri arasında yaklaşık olarak 15 ila 25 °C arasında değişkenlik olmaktadır. Bu veriler neticesinde pistonlarda azalan bir sıcaklık eğilimi gözükmektedir. STD pistonun sıcaklık eğimi çalışma süresi boyunca azalmaktadır.

Piston yüzeyi 4 mm termal bariyer kaplama yapılması durumunda Şekil 7'de sıcaklık değişimi görülmektedir. TBK pistonda merkezden ilerleyen sıcaklık 160. Saniyelerde seramik kaplamaya çarpığı anlaşılmış bundan dolayı sıcaklığında artış olmuştur. 160. saniyede sıcaklığın yürüme boyu yaklaşık 36 mm civarında olduğu gözlenmiştir. TBK yüzeyde sıcaklık fiziksel bir bariyer görevi görmüş ve bu bölgede sıcaklığı hapsetmiştir. İncelenen zaman periyodunun son 20 saniyesinde sıcaklık 309 °C yakınında olmuştur. 8 mm TBK pistonunda da aynı azalan sıcaklık grafiği bulunmaktadır. Bu azalan sıcaklık 4 mm pistona göre biraz daha erken bitmiş bunun da sebebi kaplamaların genişliği olmaktadır. Yaklaşık 4 mm'lik kaplama genişliği farkı sebebiyle ani sıcaklık patlaması 28-32 saniye daha erken başlamıştır. Yaklaşık olarak 138. saniyede sıcaklık çapta 36 mm noktasına gelmiş bundan dolayı da grafiği incelediğimizde sıcaklığın bu konumda pik yaptığı görülmektedir. Pik noktasının ardından da yaklaşık olarak kalan 52 saniyede de sıcaklık normal eğimiyle Termal bariyer kaplama içerisinde seyretmiştir.

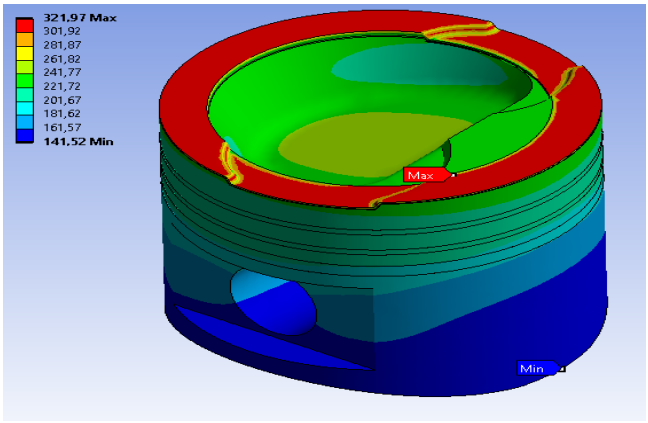


Şekil 7: Zamana bağlı sıcaklık karşılaştırması.

Şekil 8'de mesafeye bağlı olarak piston üst yüzeyi 8mm seramik kaplı pistonun sıcaklık dağılımı görülmektedir. Piston merkezinden harekete geçen sıcaklık hareketi 261 °C olarak meydana çıkmaktadır. Merkezden başlayarak azalmakta olan sıcaklık yarıçap olarak 27,825 mm'ye geldiğinde seramik kaplama ile temasa geçmiş ve ardından sıcaklık 321 °C çıkmıştır. İlk anda aldığı sıcaklığı fiziksel olarak muhafaza eden kaplama bu bağlamda yanmamış yakıtların yanmasında ve HC emisyonlarının azalmasında büyük etki göstermiştir. Şekil 9'da 8mm seramik kaplamalı pistonun sıcaklık dağılımını gösteren analiz sonuçları görülmektedir.

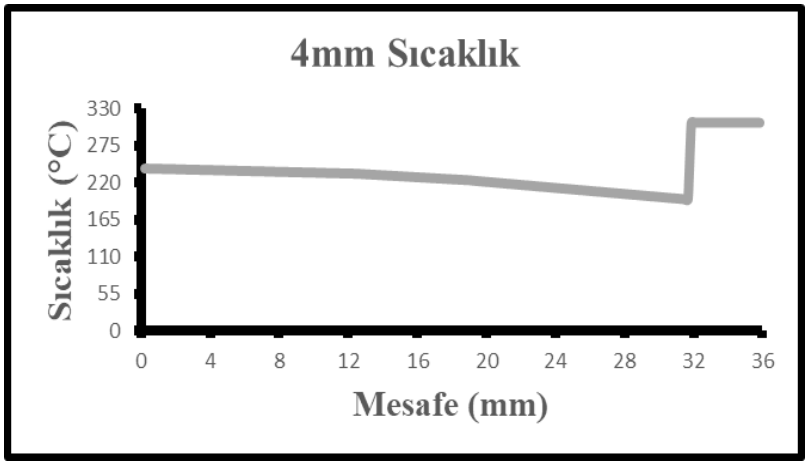


Şekil 8: 8 mm seramik kaplamalı pistonun mesafe sıcaklık grafiği.

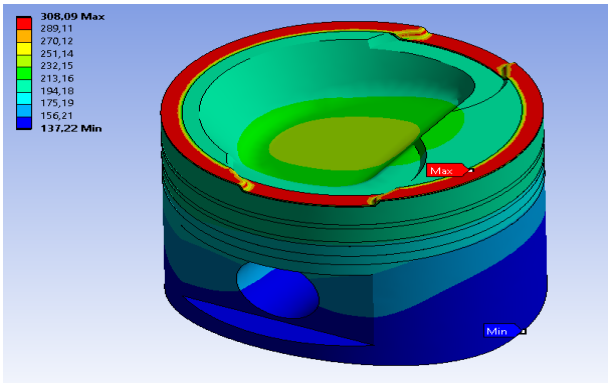


Şekil 9: 8 mm seramik kaplamalı pistonun analizi.

Şekil 10'da mesafeye bağlı olarak piston üst yüzeyi 4mm seramik kaplı pistonun sıcaklık dağılımı görülmektedir. Pistonun merkezinden harekete geçen sıcaklık hareketi 261 °C olarak meydana çıkmaktadır. Merkezden başlayarak azalmakta olan sıcaklık yarıçap olarak 27,825 mm'ye geldiğinde seramik kaplama ile temasa geçmiş ve ardından sıcaklık 321 °C çıkmıştır. İlk anda aldığı sıcaklığı fiziksel olarak muhafaza eden kaplama bu bağlamda yanmamış yakıtların yanmasında ve HC emisyonlarının azalmasında büyük etki göstermiştir. Şekil 11'de 4mm seramik kaplamalı pistonun sıcaklık dağılımını gösteren analiz sonuçları görülmektedir.

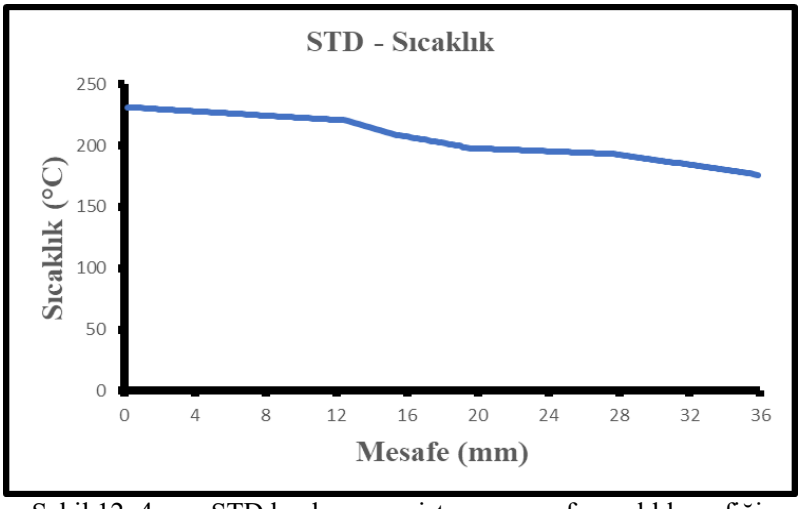


Şekil 10: 4 mm seramik kaplamalı pistonun mesafe sıcaklık grafiği.

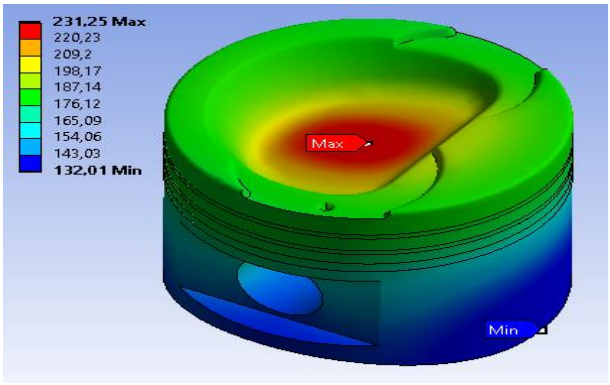


Şekil 11: 4 mm seramik kaplamalı pistonun analizi.

Şekil 12'de mesafeye bağlı olarak STD kaplamasız pistonun sıcaklık dağılımı görülmektedir. Standart yüzeyli piston ve kısmen seramik kaplı pistonların sıcaklık gradyanlarını değerlendirmek için sayısal olarak termal analizler yapılmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış pistonların görselleri aşağıda gösterilmiştir. Standart pistonun merkezdeki sıcaklığı 231 °C olarak gözlemlenmiştir. Gözlemlenen sıcaklık değerleri merkezden başlayarak piston eteklerine doğru azalma eğiliminde olmaktadır. Yüzeyin üst kenarında, yüzey sıcaklığı 190 ila 231 °C arasındadır. Şekilden de görüldüğü üzere merkezden uzaklaştıkça sıcaklıklarda azalma meydana gelmiş ve bu bağlamda da soğuk çalıştırma esnasında yanmamış yakıtlar egzoz zamanında dışarı atılarak HC emisyonu oluşturmaktadır. Şekil 13'de STD kaplamasız pistonun sıcaklık dağılımını gösteren analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 12: 4 mm STD kaplamasız pistonun mesafe sıcaklık grafiği.



Şekil 13: STD kaplamasız pistonun piston analizi.

SONUÇLAR

Motorda kullanılan kaplamasız STD piston üst yüzeyinde 0.15 mm kalınlığında NiCrAl ara bağlayıcı malzemesi ile 0.35 mm kalınlığında $MgZrO_3$ malzeme ile kaplanmış pistonların analizler yapılmıştır. Çalışma iki aşamada oluşmaktadır. İlk aşamada deneysel çalışma yapılmış ve deney sonuçları elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise kaplamasız ve iki farklı kaplamalı piston için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Termal analiz sonuçları, pistonlardaki yuvaya yakın konumlanan kaplamalı piston bölümünün ve duvar su verme bölgesinin 4mm kaplamalı piston için 75 °C'ye, 8mm kaplamalı piston için de yaklaşık 80 °C 'ye kadar artışa neden olduğunu göstermektedir.

180 saniyelik çalışma periyodunda STD pistonda 231 °C de başlayan sıcaklık zamana bağlı olarak doğrusal bir şekilde azalmıştır ancak 4 mm ve 8 mm kısmen kaplama yapılan pistonlarda yaklaşık olarak 240 °C ve 261 °C civarında başlayan sıcaklık kaplamaya etki edene kadar azalmakta sıcaklığın kaplamaya temas ettiği andan itibaren 70-80 °C aralığında sıcaklık artmaktadır. Sıcaklıktaki böyle bir artışın bu alanlardaki hava-yakıt karışımının sıcaklığında bir artışa ve sonuç olarak, boşluğa girişteki yanmamış yükün oksidasyonunda bir artışa yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Yüzeyi seramik ile kaplanan pistonların ısıyı uzun süre muhafaza ettiği alt bölümlere gönderdiği ve yanma odası sıcaklığının daha yüksek derecelere çıktığı tespit edilmiştir. Sonuçlar ışığında kaplama işlemi uygulanmış pistonlarda deformasyonların az olduğu ve bu etkiden sebeple daha mukavemetli bir mekanizma parçası olarak çalışabildiği tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlar, kısmen seramik ile kaplanmış bir motorun soğuk çalıştırılmasından kaynaklanan HC emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır. 4mm seramik kaplama pistonun STD motora göre ortalama %15 oranlarda azalmalar tespit edilmiştir. Pistonun üst yüzeyi 8mm seramik kaplamalı pistonun STD pistonlu motora göre ortalama %25 azalma belirlenmiştir.

Bununla birlikte kısmi termal bariyer tabakasına sahip bir pistonlu motor durumunda artan sıcaklık nedeniyle HC emisyonları kaplanmamış bir pistonlu motora kıyasla daha düşük olacağı sonucuna varılabilir. Yapılan deneyler sonucunda sıcaklık grafiğini incelediğimizde sıcaklığın ilk patlama anında yüksek derecelere çıktığı sonradan doğrusal olarak azaldığı STD de azalmaya devam ettiği ancak kaplamalı pistonlarda seramiğe çarptığı anda yükseldiği gözlemlenmiştir. Sıcaklık ayrımları piston çapı mesafe parametresine göre incelendiğinde 4 mm kaplı pistonun yaklaşık 39 mm civarında patlama yaptığı, 8 mm kaplanmış pistonda 34-35 mm konumlarında seramik etkisiyle patlama yaptığı analizlerce belirlenmiştir ve grafiğe aktarılmıştır. Sonuç olarak seramik kaplamalar pistonlarda yanmamış yakıtların egzoz zamanında dışarı atılmasını engellemekte alev sönme bölgelerini azaltarak o bölgelerde kalan yakıtları seramiğin ısıyı tutma ve iletme özelliği yakmaktadır.

REFERANSLAR

Ak, I., (2017), Seramik kaplı bir dizel motor pistonunun termal gerilme analizi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ayhan V., Cerit M., Parlak A., Yasar H.,(2013), Thermal analysis of a partially ceramic coated piston: Effect on cold start HC, Applied Thermal Engineering.

Babu, A., Saravanan, C.G., Vikneswaran, M., Edwin Geo, V., Sasikala, J., Femilda, F.S.,(2021). Analysis of performance, emission, combustion and endoscopic visualization of micro-arc oxidation piston coated SI engine fuelled with low carbon biofuel blends, Fuel, vol. 285.

Büyükkaya, E., (1994), Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplama Uygulamaları ve Performans Analizi., İstanbul Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ceylan, S., (2009), Seramik kaplı pistonlarda termal gerilmelerin sonlu elemanlar metoduyla belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cerit, M., (2010), Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine. Surface and Coatings Technology, Volume 205, Issue 11

Cerit M, Çoban M.,(2014), Temperature and thermal stress analyses of a ceramic-coated aluminum alloy piston used in a diesel engine, International Journal of Thermal Sciences, Volume 77, Pages 11-18.

Cesur, I, (2020), Effects of Water Injection on Performance and Exhaust Emissions of SI Engine with Y_2O_3 -Coated Piston, J. Energy Eng., vol. 146, no:5.

Cesur, I., (2013), Kısmi Yalıtılmış Bir Buji Ateşlemeli Motorda Buhar Enjeksiyonu Etkilerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ciniviz, M., (2005),Turbo şarjlı bir dizel motorunun yanma odası yüzeylerinin Y_2O_3~ZrO_2 ile kaplanmasının performans ve emisyona etkileri, Selçuk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü.

Gürbüz H., Gökkaya H., (2014), Termal Bariyer Kaplamanın Motor Yakıt Sarfiyatı Egzoz Sıcaklığı Ve Emisyonlara Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 20 Sayı: 1,15-19.

Hazar H., Öner C.,(2004), İçten Yanmalı Motorlarda Seramik Kaplamanın Motor Performansına Etkisi, Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, Cilt: 3 Sayı: 1, 36.

Parlak A., Ayhan V., (2007), Effect of using a piston with a thermal barrier layer in a spark ignition engine, Journal of the Energy Institute, Volume 80, Issue 4.

Saravan C. G., Vikneswaran, M., Prasanna Raj Yadav. S., Muthukumaran. M., (2022), Experimental study of feasibility of orange peel oil as a partial replacement for gasoline fuel in SI engine with and without MAO coated piston, Fuel, vol. 315.

Yasar, H., (1997), Termal Bariyer Kaplamanın Türbo Doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü.

Alanya-Taşkent Yolu (Km: 61+300-61+530) Heyelan Oluşumunun Ön Analizi: Nedenleri ve Etkileri

Mehmet ÖZÇELİK[1]

[1] Süleyman Demirel Üniv., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Böl.,32260-Isparta
ozcelikmehmet@sdu.edu.tr
Orcid.org/0000-0003-4511-1946

ÖZET

Heyelan oluşma tehlikesi, geometri, toprak bileşimi, yapı ve toprak parametreleri ile tanımlanan yamaç koşullarına ve ayrıca hidrojeolojik, iklim ve bitki örtüsü koşullarına zaman değişkeni olarak bağlıdır. Doğal bir afet olarak değerlendirilen heyelanlar güvenli karayolu ulaşımı için tehdit olabilmektedir. Günümüz karayolu ulaşımında, yol güvenliği büyük önem taşıyan bir konu olmaya devam etmektedir. Mühendislik çalışmaları olarak karayollarında meydana gelebilecek heyelanlara karşı stabiliteyi artırmak ve yollarda güvenli hareketi sağlamak büyük önem arz etmektedir.
Bu makalede, Alanya-Taşkent Yolu (Km: 61+300-61+530) Heyelan oluşumunun ön analizi yapılarak nedenleri ve etkileri incelenmiştir. İnceleme alanı ve çevresindeki oluşan heyelan ve toprak kayması riskini azaltmak için çözümler önermektedir. Bu durumda, araştırmada toplanan istatistikler pratik olarak analiz edilmiş ve farklı oluşum koşullarına uygun mühendislik çözümleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Heyelan, Karayolu, Stabilite, Toprak kayması, Şev.

GİRİŞ

Heyelanlar karayollarının normal işleyişini tehdit eden unsurlardan biri olabilmektedir (Pantelidis, 2010, Argyroudis vd., 2019, Saleh ve Hashemian, 2022). Trafik aksaklıklarına neden olan bu heyelanlar yalnızca yerel jeolojik koşullarla değil, aynı zamanda bitki örtüsünün tahribatı, iklim ısınması, yoğun yağış, insan faaliyetleri vb. ile de ilişkilidir (Peres ve Cancelliere, 2018, Meneses vd., 2019). Bu nedenle, heyelan olasılığının ve trafiğe yönelik potansiyel riskinin doğru bir şekilde temsil edilmesi, ulaşım güvenliğini sağlamak için şu anda vazgeçilmez bir adımdır. Günümüzde, yolların heyelan riski konusunda birçok çalışma yürütülmektedir (Peng vd., 2014, Anderson vd., 2022, Boakye vd., 2022, Jiatong vd., 2022). Bu çalışma ile yapım faaliyetleri tamamlanmış olan (Alanya-Gazipaşa) ayrımı (Taşkent-Başyayla) ayrımı Alanya-Taşkent Yolu Km:60+300-60+530 kesiminde sağ taraftaki yüksek yarmada (27 m) duraylılık sorunları yaşanmış ve trafik güvenliği risk altına girmiştir (KGM, 2020). Çalışma alanının lokasyon haritası ve genel görünümü Şekil 2-3' de verilmiştir. Bu nedenle daha önceki yıllarda yapılan sondaj çalışmaları ile mevcut koşullar göz önüne alınarak arazi ve laboratuvar çalışmaları doğrultusunda heyelan oluşumunun ön analizi yapılmış; nedenleri, etkileri ve iyileştirme yöntemleri belirlenmiştir. Ayrıca, bu çalışma, bölgesel yolların heyelan risk potansiyelini analiz ederek karayollarındaki potansiyel afet alanları için heyelan önleme ve kontrolü için bilimsel rehberlik sağlayabilecektedir.



Şekil 1: Çalışma alanının Lokasyon Haritası

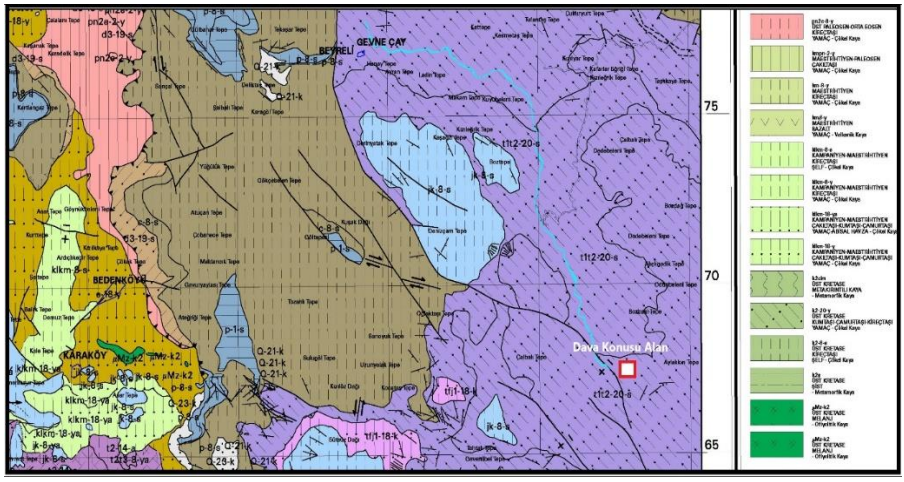


Şekil 2: Çalışma alanın genel görünümü

BÖLGESEL JEOLOJİK ÖZELLİKLER

Çalışma alanı ve yakın çevresinin genel jeoloji çalışmalarında MTA'nın 1/25.000 ölçekli O-28b3 paftasından yararlanılmıştır (Şekil 4). İnceleme alanında ve yakın çevresinde temel kaya birimleri Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı formasyonlar oluşturmaktadır. Paleozoyik yaşlı birimleri killi ve dolomitik kireçtaşları oluştururken, Mesozoyik yaşlı birimleri kumtaşı, kiltaşı, çamurtaşı, çakıltaşı, ve yer yer şeyl seviyeli tortullar proje güzergahı boyunca geçilmektedir. Genel görünüş itibariyle kırmızı ve yer yer yeşil renkte çakıltaşı - kumtaşı ve yer yer killi kireçtaşı ve kiltaşlarından

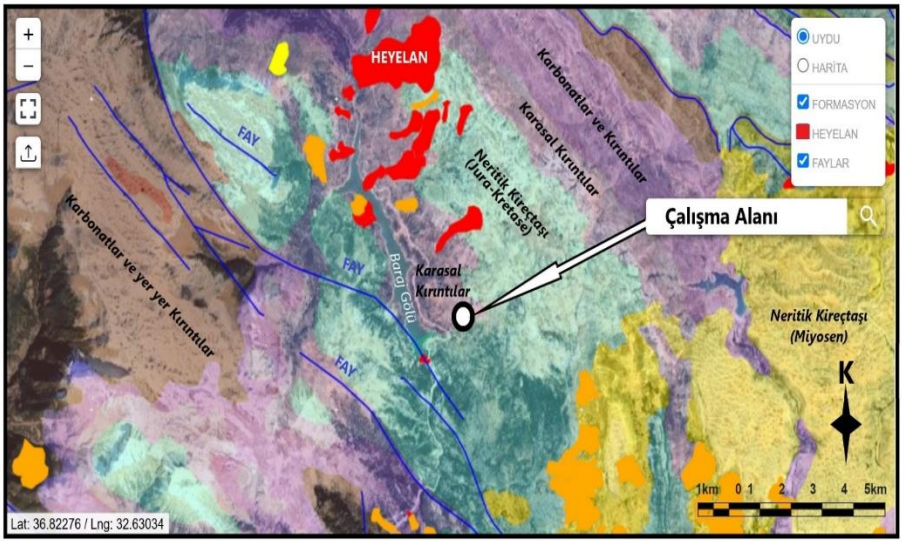
oluşan Eosen flişleri yer alır. Eosen flişleri, silttaşı, marn, şeyl ve killi kireçtaşı bantları içermektedir. Çakıltaşları genellikle kırmızı ve yeşil renkli, gevşek kireç çimentoludur. Çakılları ise serpantinit, gabro, kuvars, radyolarit ve kireçtaşlarına aittir. Formasyon içindeki kumtaşları da çakıltaşları gibi kırmızımsı ve yeşilimsi renklerde olup, taneler yine çakıltaşlarını oluşturan litolojidedir ve gevsek kireç çimentoludur. En üste iseMiyosen yaşlı çakıltaşı, marn ve kireçtaşı düzeyleri yer alır. Birim yüzeylediği alanlarda beyaz - krem renkli görünüşüyle ve yatay tabakalı konumlarıyla formasyonlar içinde kolayca ayırt edilebilmektedir. Birimde yatay tabakalı ve bej killi kireçtaşları ile marnlar hakim olup, silttaşı ve şeyllerden oluşan bantlar da içermektedirler. Şeyller krem renkli, laminalı ve kırılgandır. Marnlar yeşilimsi gri renkli, yumuşak ve kırılgan olup yer yer siltlidir. Çalışma alanımız içerisinde hakim litolojiyi oluşturan killi kireçtaşları, açık gri - krem renkli, orta sert, yatav konumlu, orta ince tabakalıdır. İnceleme alanındaki en genç oluşuklar ise Kuvaterner yaşlı alüvyonlar olup, bu genç çökeller çakıl, kil, kum (Qal) kompozisyonludur.



Şekil 4: Çalışma sahanın bulunduğu bölgenin Genel Jeoloji haritası (yerbilimleri.MTA)

ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanında yapılan sondajlardan alınan veriler ve gözlemsel jeoloji çalışmaları neticesinde yer yer killi birimler içeren kahverengi, bej renkli kiltaşı-kireçtaşı ardalanması ve yamaç molozu şeklinde görülen birimlerden oluşmaktadır. Bunun sonucunda çalışma alanı literatürde Kasımlar Formasyonuna ait olduğu görülmüştür (Şekil 5). Sahada yapılan jeolojik çalışmalar neticesinde yer yer killi birimler içeren kahverengi-bej çok zayıf-zayıf dayanımlı, az-orta ayrışmış, çok kırıklı-parçalanmış, eklemlerinde kil dolguları içeren, yer yer çok ayrışmış-killeşmiş seviyeler içeren kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 6).



Şekil 5: Çalışma alanının Genel Jeoloji Haritası (yerbilimleri.MTA)



Şekil 6: Çalışma alanındaki litolojik birimlerden görünüm

ÇALIŞMA ALANININ JEOMORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ

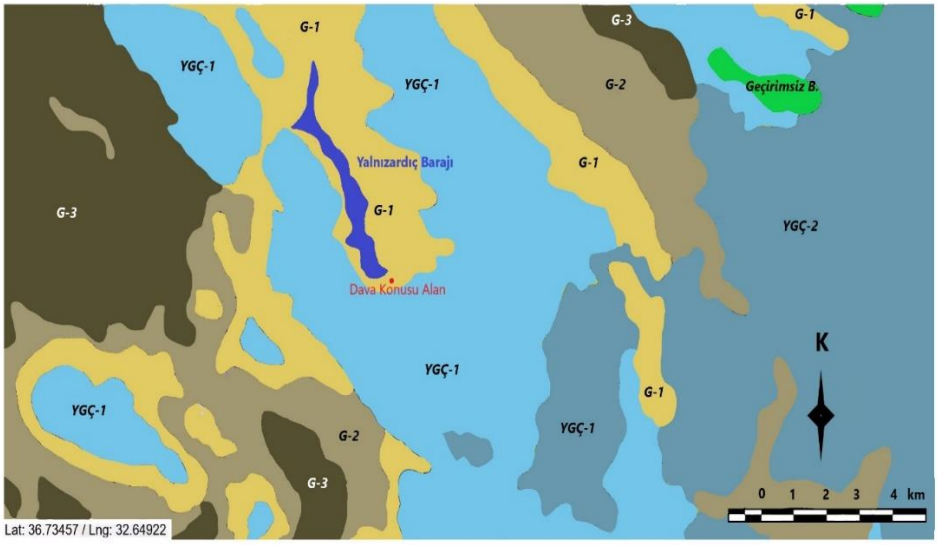
Orta Torosların güney kesiminde yer alan saha, engebeli bir topoğrafyaya sahiptir. Havzanın kuzey, kuzeydoğu, güney, güneydoğu kesimi dağlık ve tepelik alan şeklindedir. Bölgede yer alan önemli yükseltiler arasında Oyuklu Dağı (2419) ile Utele Dağı (2884 m) dir. Çalışma alanı ortalama 1484 m yükseltiye sahiptir (Şekil 7).



Şekil 7: Bölgenin Yükseklik Haritası

ÇALIŞMA ALANININ HİDROJEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

İnceleme alanı da kapsayan jeolojik birimler hidrojeolojik özelliklerine göre değerlendirilmiş ve litolojik birimler fiziksel özellikleri değerlendirilerek sınıflandırılmıştır. Buna göre çalışma alanındaki birimler fiziksel özellikleri ve akifer olabilme özellikleri dikkate alındığında Geçirimsiz Birim, Yarı Geçirimli Birim ve Geçirimli birimler olarak sınıflandırılmışlardır. Jura-Kretase yaşlı neritik kireçtaşları karstik ortam akiferini temsil etmektedir ve ***'Yarı Geçirimli birim-1 (YGÇ-1)'*** olarak adlandırılmıştır. Kireçtaşları, kırıklı-çatlaklı olduklarında çatlak ve erime boşluklarında yeraltısuyu bulundurabilen ve suyun hareketine izin veren yapılardır. Rekristalize ve dolomitik kireçtaşlarının oluşturduğu Miyosen yaşlı kireçtaşı yükseltilerin fazla olduğu lokasyonlarda yüzeye çıkmaktadır ve ***'Yarı Geçirimli birim-2 YGÇ-2)'*** olarak adlandırılmıştır. İnceleme alanının jeolojik yapısı dikkate alındığında, karasal kırıntıların oluşturduğu jeolojik birimler ***'Geçirimli Birim-1 (G-1)'*** olarak ayırtlanmıştır. Karbonatlar ve yer yer kırıntılı formasyonlar ***'Geçirimli Birim-2 (G-2)'*** olarak adlandırılmıştır. Permo-Karbonifer yaşlı karbontlar ve yer yer kırıntılar ***'Geçirimli Birim-3 (G-3)*** olarak gösterilmiştir. Ofiyolitik melanj, şeyl ve radyolaritten oluşan formasyonlar ise '***Geçirimsiz Birim'*** olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8: Bölgenin Hidrojeoloji Haritası

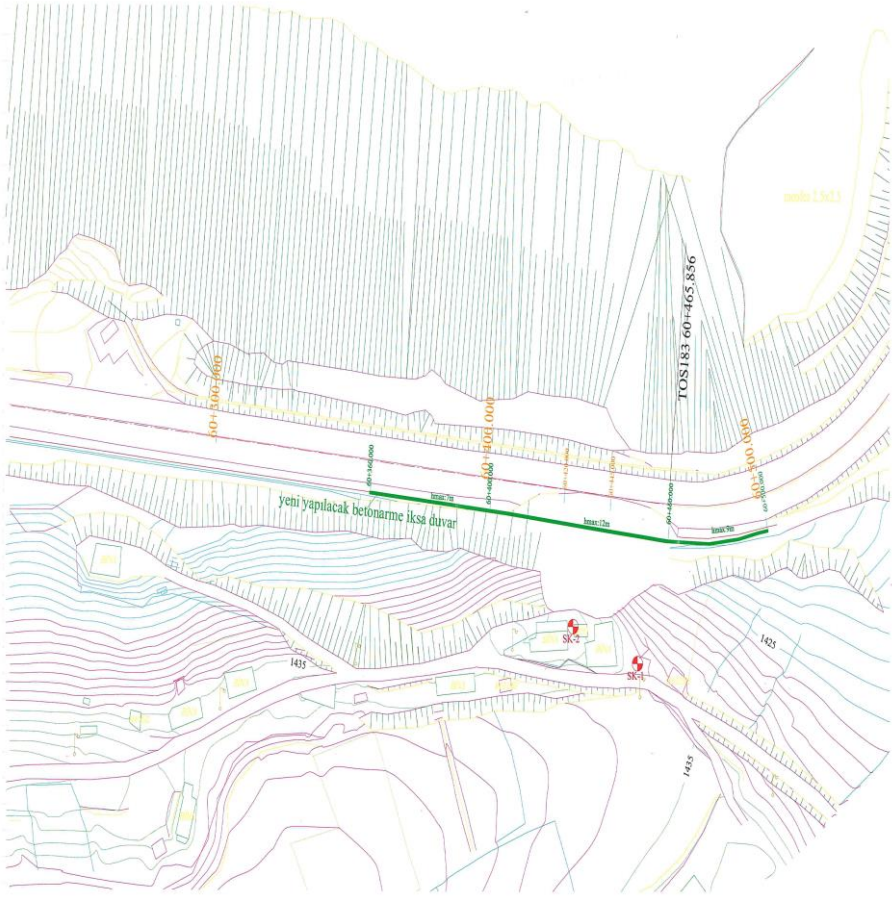
İnceleme alanı ve yakın çevresindeki en önemli akarsu kaynağı Gevne çayı olup uzun bir kesim boyunca güzergahı takip etmektedir. Bu dereyi besleyen çok sayıda kollar bulunmakta olup özellikle yağışlı dönemlerde bu çayı beslemektedir. Ayrıca sahada litolojik formasyon sınırlarından ve kireçtaşı çatlaklarından akan birçok su kaynağı gözlemlenmektedir. Güzergahta yer alan alüvyonlar genellikle yeraltısuyu içeren zeminlerdir. Çalışma alanına 150 m mesafede Yalnızardıç Barajı mevcuttur (Şekil 9).



Şekil 9: Çalışma alanından Yalnızardıç Baraj gölünün görünümü

ÇALIŞMA ALANININ MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÖZELLİKLERİ

Heyelan yer çekimi etkisi altında toprak, kaya veya organik zeminlerin yamaç aşağı hareketini tanımlamak için kullanılan genel bir terim olup, aynı zamanda bu hareketlerin sonucu oluşan arazi yapısını tanımlamaktadır. Heyelan alanlarında yapılan Jeolojik ve jeofizik çalışmalar ile malzemenin yerinde mi oluşmuş yoksa taşınmış olup olmadığı belirlenebilmekte veya jeolojik yüklerde zamanla değişikliğin meydana gelip gelmediği ve şev hareketini tetikleyen bir kuvvetin var olup olmadığı saptanabilmektedir. Ayrıca fiziksel özellikleri bakımından büyük farklılıklar gösteren zemin tabakalarının sınırları belirlenebilmekte yeraltı suyu hakkında bilgi edinilebilmektedir. Sondaj, zemin araştırmalarında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde zeminden alınan numuneler yardımıyla zemin tabakalarının sınırları derinlikleri zemin özellikleri belirlenir. Sondajlara mümkün olması durumunda kayma bölgesi ortasından başlanmalı ve kayma eğilimi gösteren kütlenin derinliği bulunmaya çalışılmalıdır. Sonra yapılan sondajlarla topuk bölgesi belirlenmeye çalışılır. Sondajlar kayma ekseni boyunca yapılmalıdır. Diğer sondajlar ise kayma yüzeyi boyunca zemin profilini elde edebilecek şekilde ve kayma bölgesinin kritik noktalarında, yeterli sayıda yapılır. Bu amaçla için proje alanında çözüme yönelik imalatın belirlenebilmesi, elde edilen jeoteknik verilerin değerlendirilmesi ve konu ile ilgili gerekli görülen önerilerin sunulması amacı ile Km: 60+445 deki yarma şevi duraysızlığı için Akademi Etüt Proje Müh. Müş. Ltd. Şti. firmasınca SK-1 (40.00 m) ve SK-2 (20.00 m) lokasyonlarında jeoteknik amaçlı sondaj çalışması yapılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10: Sondaj lokasyonlarının aplikasyon haritasındaki konumu (KGM, 2022)

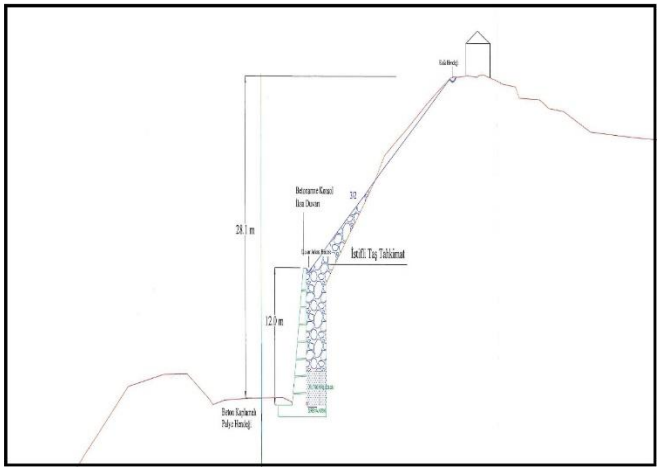
Sondajlarda genellikle 1.20 m - 40.00 m arasında; kahverengi-bej renkli, çok zayıf-zayıf dayanımlı, az-orta ayrışmış, az-orta bozunmuş, çok kırıklı-parçalanmış, eklemlerinde kil dolguları içeren, yer yer çok ayrışmış-killeşmiş seviyeler içeren kireçtaşı birimi kesilmiştir. Ayrıca parselde açılan Jeoteknik sondajlarının ikisinde de yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Heyelan alanlarını iyileştirme önlemlerinde hareketi izlemek ve hareket hızını belirlemek amacıyla sahada inceleme ve aletsel gözlem yapılabilir (Şekil 11). Elde edilen Jeolojik - Jeoteknik veriler yardımıyla yarmanın güvenli bir şekilde teşkil edilmesi ve uzun vadede stabilitesinin koruna bilmesi için gerekli duraylılık analizleri ile kontrol hesapları yapılarak heyelanlı kesim için gerekli iyileştirme yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca, bozulan doğal drenaj kanalları yeniden düzenlenmeli veya bazı mühendislik yapıları yapılarak kayan kütle içerisine su gelişleri önlenebilir. Mümkün olan yerlerde uygun şev

düzenlemeleri veya mühendislik uygulamaları ile olası tehlikeler önemli derecede azaltılabilir.



Şekil 11: Sahada yapılan gözlemler

Bölgede daha önceki yıllarda gelişen duraysızlıklar ve kamulaştırma sorunları nedeniyle yüksekliği 12 m olan taş duvar yapılmış, duvarın arkası kaya dolgu ile doldurularak yüksekliği 15 m ulaşan şevin yüzeyi harçlı pere ile kaplanmıştır (Şekil 12). Ancak gerek özgül ağırlığın ve yüzey sularının etkisi, gerekse şev eğimi yüksek olması nedeniyle daha önce de mobilize olan kütle yeniden hareketlenmiş ve taş duvar ile pere deforme olmuştur.



Şekil 12: 12 m yüksekliğinde taş duvar (KGM, 2022)

Kaymanın topuğuna istinat duvarı yapılması hareketi yavaşlatmak veya hareket eden malzemeyi tutma açısından etkili olabilir. Ancak iyi yapılmış olmasına rağmen kayma hareketi istinat yapısının üzerinden aşabilir (Şekil 13).



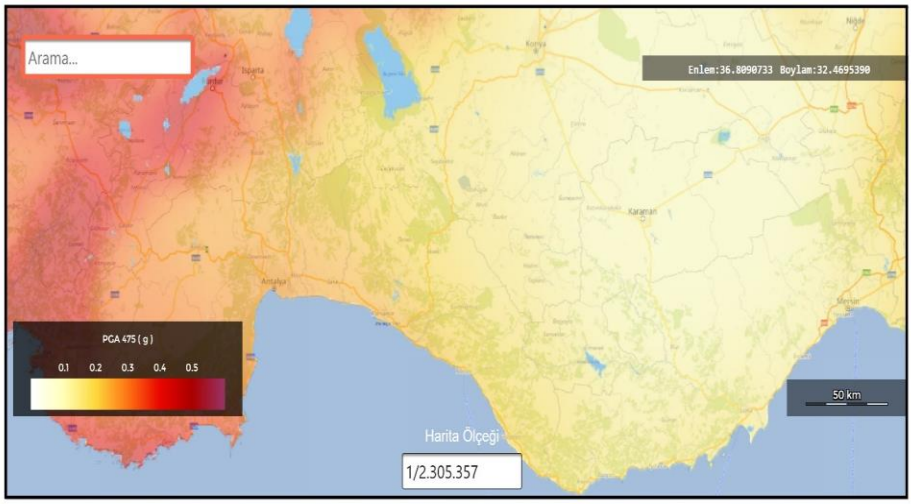
Şekil 13: Kayma topuğuna yapılmış istinad duvarının görünümü

Bölgenin jeolojik yapısı ve hidrojeolojik özellikleri sebebiyle çatlayan ve kayma riski olan kesim içinde Km: 60+000-60+240 arasında solda L = 240 m ve Km: 60 + 530 - 60 + 927 arasında solda L = 397 m uzunluklarında istinat duvarları bulunur. Km: 60 + 360 - 60 + 546 arasında sağda L = 186 m, Km: 60 + 635 – 60+754 arasında sağda L = 119 m ve Km: 60+790 - Km: 60+850 arası sağda L = 60 m uzunluklarında iksa duvarları ile yer almaktadır. Yapılan incelemede öncelikli olarak kış mevsimi boyunca meydana gelen yoğun yağışlar, çevrede yapılan sulama ve şev tepesinde bulunan yapıya ait kullanım

ve atık suların şevin içerisine nüfuz ettiği ve hareketi tetiklediği, ayrıca mevcut taş pere yüküne göre 1 Y / ID eğimin fazla olduğu gözlenmiştir (KGM, 2022). Ağırlık, drenaj problemleri ve şev eğiminden dolayı pere kesimde kabarmalar, kesilmeler ve hareketler gözlenmiştir. Bu hareketler taş duvar tepesine de zarar vererek taş duvarda yıkılmalar ve çatlamalara sebep olmuştur.

BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ

Proje alanı için AFAD 2019 Türkiye Deprem Tehlike Haritası aşağıda sunulmaktadır (Şekil 14).



Şekil 14: Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre bölgenin depremselliği (AFAD, 2019)

SONUÇLAR

Bölgede, Toroslar'ın allokton dilimlerinden Aladağ Birliğine ait ve Orta Karbonifer'den Erken Kretase'ye kadar yaş veren istifler yüzeyler. Bu istifler Orta Torosların en üst alloktonu olup, Gevne napı olarak da tanınır. İnceleme alanının jeolojik yapısı ise; yer yer killi birimler içeren kahverengi-bej çok zayıf-zayıf dayanımlı, az-orta ayrışmış, çok kırıklı-parçalanmış, eklemlerinde kil dolguları içeren, yer yer çok ayrışmış-killeşmiş seviyeler içeren kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Bölgede yer alan litolojik formasyonların hidrojeoljik özellikleri olarak Jura-Kretase yaşlı neritik kireçtaşları karstik ortam akiferini temsil etmekte ve ***'Yarı Geçirimli birim-1 (YGÇ-1)'*** olarak adlandırılmıştır. Kireçtaşları, kırıklı-çatlaklı olduklarında çatlak ve erime boşluklarında yeraltı suyu bulundurabilen ve suyun hareketine izin veren yapılardır. Rekristalize ve dolomitik kireçtaşlarının oluşturduğu Miyosen yaşlı kireçtaşı yükseltilerin fazla olduğu lokasyonlarda yüzeye çıkmaktadır ve ***'Yarı Geçirimli birim-2 YGÇ-2)'*** olarak adlandırılmıştır. İnceleme alanının jeolojik yapısı dikkate alındığında, karasal kırıntıların oluşturduğu jeolojik birimler ***'Geçirimli Birim-1 (G-1)'*** olarak ayırtlanmıştır. Karbonatlar ve yer yer kırıntılı formasyonlar ***'Geçirimli Birim-2 (G-2)'*** olarak adlandırılmıştır. Permo-Karbonifer yaşlı karbontlar ve yer yer kırıntılar ***'Geçirimli Birim-3 (G-3)*** olarak gösterilmiştir. Ofiyolitik melanj, şeyl ve radyolaritten oluşan formasyonlar ise '***Geçirimsiz Birim'*** olarak sınıflandırılmıştır. İnceleme alanındaki kayan malzemenin oluşum mekanizmasını saptamak için SK-1 (40.00 m) ve SK-2 (20.00 m) lokasyonlarında jeoteknik amaçlı sondaj çalışması yaptırılmıştır. Sondajlarda genellikle 1.20 m - 40.00 m arasında; Kahverengi-bej renkli, çok zayıf-zayıf dayanımlı, az-orta ayrışmış, az-orta bozunmuş, çok kırıklı-parçalanmış, eklemlerinde kil dolguları içeren, yer yer çok ayrışmış-killeşmiş seviyeler içeren kireçtaşı birimi kesilmiştir. Açılan jeoteknik sondajlarının ikisinde de yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Duraylılık sorunları yaşanan yarmada, kalınlığı yer yer 10 m ye varan yapay dolgu ve eski heyelan malzemesi ile Kasımlar Formasyonunun ayrışma ürünü olan çakıllı killi kum birimin olduğu tespit edilmiştir. Formasyona ait killi kireçtaşları yer yer killeşmiş ve zemin özelliği göstermektedir. Bu nedenle yapılacak olan analizlerin zemin mekaniği prensiplerine göre limit denge kuramına göre yapılması uygun görülmektedir. Stabilite sorunlu bölgede arazi çalışmaları öncesinde gelişen gerilme çatlakları ve açılmaların yer yer yatayda 50-100 cm arasında, düşeyde ise 200 cm ye ulaştığı tespit edilmiştir (KGM, 2022). Arazi gözlemleri ile tespit edilen kayma düzlemi yüzeyden yaklaşık 8-10 m derinlikte olduğu düşünülmektedir. Aktif hareketin yüksek plastisiteli kil birim ile rezidüel zemin özelliğindeki birimlerin, dolgu yükü ile birlikte, yüzey sularının ve mevsimsel yağışlara bağlı olarak yükselen yeraltı su seviyesinin etkisi ile doygun hale gelerek, kohezyonlarını yitirmeleri ve neredeyse likit kıvama geçerek, topografik eğiminde etkisi ile duraylılığını yitirmesi ile geliştiği

düşünülmektedir. Daha önceki yıllarda mobilize olan zeminin üzerine teşkil edilen dolgu yükü ile birlikte likit kıvamdaki kil biriminin yeniden mobilize olması sonucu mevcut taş duvarda ve yarma şevinde deformasyonlar gelişmiştir. Bunun sonucu olarak trafik güvenliği ile birlikte şevin hemen gerisindeki meskenlerdeki can güvenliği de risk altına girmiştir. Bahsi geçen stabilite sorunlarının önlenmesine yönelik olarak, geometrik - topografik koşullar ve jeolojik birimlerin nitelikleri dikkate alınarak, olası kayma düzleminin ve mobilize olan kütlenin alınması ve şevin uygun şev açısı ile düzenlenerek yarma şevinin duraylı hale getirilmesi alternatifi uygun görülmektedir. Bu doğrultuda en kritik kesit olan ve duraysızlıkların meydana geldiği Km: 60+450 kesiti için yapılan sondaj çalışmaları, laboratuvar deney sonuçları ile arazi etütleri bir arada değerlendirilerek zemin profili oluşturulmuş ve stabilite analizleri yapılmıştır. Sorunlu bölgedeki mobilize olan kütlenin alınması ve deforme olmuş duvar ile harçlı perenin onarılarak yarma şevinin duraylı hale getirile bilmesi için yarma şevin 2(y)/1(d) şev oranı ile yeniden düzenlenmesi önerilmektedir. Yarma şevinin 2(y)/1(d) şev oranından daha dik açılması durumunda şev yüksekliğinde bir değişim olmamak ile uzun vadede duraylılık riskleri ortaya çıkabilecektir KGM, 2022).

Sonuç olarak, heyelan hareketlerini tetikleyen en etkili unsurlar olarak dört ana faktör grubu tanımlanmıştır. Bunlar jeomorfolojik (yani, yükseklik değişimi, yamaç yönü, yamaç eğriliği, profil eğriliği), jeolojik (yani, jeolojik birimler, faylara olan uzaklık, arazi kullanımı, toprak tipi, hidrolojik değişim, yamaç eğimi), çevresel (yani, iklim, havza, drenaj düzeni, bitki örtüsü) ve insan faaliyetiyle ilgili (yani, yollara olan uzaklık, şehirlere olan uzaklık) yardımcı değişkenlerdir.

REFERANSLAR

Anderson, M.J., Kiddle, D.A.F., Logan, T.M., 2022. The underestimated role of the transportation network: Improving disaster & community resilience. Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 106.

Argyroudis, S.A., Mitoulis, S.A., Winter, M.G., Kaynia, A.M., 2019. Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. Reliab. Eng. Syst. Saf. 191, 1–22.

Boakye, J., Guidotti, R., Gardoni, P., Murphy, C., 2022. The role of transportation infrastructure on the impact of natural hazards on communities. Reliab. Eng. Syst. Saf. 219.

Jiatong, Z., LiuKai, Ming, W., Wei, X., Mengting, L., Jianchun, Z., 2022. An empirical approach for developing functions for the vulnerability of roads to tropical cyclones. Transportation Research Part D: Transport and Environment 102.

Meneses, B.M., Pereira, S., Reis, E., 2019. Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 19, 471–487.

Pantelidis, L., 2010. A critical review of highway slope instability risk assessment systems. Bull. Eng. Geol. Environ. 70, 395–400.

Peres, D.J., Cancelliere, A., 2018. Modeling impacts of climate change on return period of landslide triggering. J. Hydrol. 567, 420–434.

Peng, L., Xu, S., Hou, J., Peng, J., 2014. Quantitative risk analysis for landslides: the case of the Three Gorges area, China. Landslides 12, 943–960.

Saleh, M., Hashemian, L., 2022. Addressing Climate Change Resilience in Pavements: Major Vulnerability Issues and Adaptation Measures. Sustainability 14.

Starita, S., Scaparra, M.P., 2020. Assessing road network vulnerability: A user equilibrium interdiction model. J. Oper. Res. Soc. 1–16.

KGM., 2020. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, (Alanya-Gazipaşa) Ayr. (Taşkent-Başyayla) Ayr. Alanya-Taşkent Yolu'nun 60+445. km'sinde (42-41 K.K. No.lu Taşkent-Alanya Yolu Km: 23+400) meydana gelen heyelan (yarma Şevi duraysızlığı) ve 61+770 61+900. km'sinde (42-41 K.K. No.lu Taşkent-Alanya Yolu Km: 22+100) meydana gelen dolgu şevi duraysızlığı araştırma raporu.

KGM., 2022. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü. (Konya-Karaman) Ayrımı - Belören - Hadım Devlet Yolu Eyiste Viyadüğü P7-Pe Ayakları Heyelan Önleme Geoteknik Projesi Raporu ve Drenaj Projeleri Raporu.

Doyduk Barajı (Kozaklı/Nevşehir) Doğal Malzeme Ocaklarının Değerlendirilmesi

Mehmet ÖZÇELİK[1]

[1] Süleyman Demirel Üniv., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Böl.,32260-Isparta
ozcelikmehmet@sdu.edu.tr
Orcid.org/0000-0003-4511-1946

ÖZET

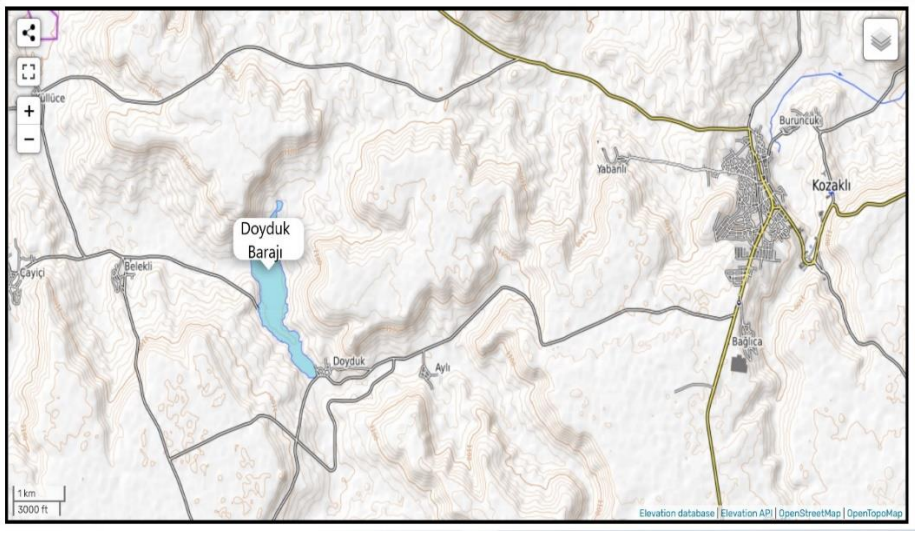
Baraj yapımında kullanılacak doğal yapı malzemelerinin inşaat alanına yakın olarak bulunması baraj tasarımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Dolgu barajlar, organik topraklar ve turbalar hariç her türlü jeolojik malzemeden inşa edilebilmektedir. İnşa edilecek barajın ekonomik olması için baraja yakın yerdeki malzemelerin kullanılması planlanır ve baraj tipi seçilir. Filtreler, drenajlar ve taş dolgu gibi üniteler için gerekli olan malzeme saha dışı kaynaklardan temin edilebilir. Dolgu barajlarda kullanılan toprak malzemeleri genellikle gövde inşaatına en yakın olan yerlerdeki uygun sahalardan elde edilmektedir. Dolgu barajların tipinin seçiminde; sahada yapılan önceki çalışmalar, yerinde test analizleri ve laboratuvar deneylerinin sonuçları önemlidir. Baraj alanı ve çevresinden elde edilen zemin ve kayacın dolgu malzemesi olarak kullanılmasının yalnızca maliyet açısından etkili değil aynı zamanda güvenli olduğunu ve yüksek kaliteli inşaat malzemesi sağladığını göstermesi bakımından önemlidir. Özellikle, baraj inşaatının olumsuz etkilerini azaltmanın önemli bir yönü, baraj konumunun yakınında malzeme kullanımıdır. Ancak, bu genellikle zor olabilir. Çünkü homojen jeoteknik özelliklere sahip iyi kaliteli malzemeler barajın yakınında yeterli hacimde bulunmayabilir. Bu makalede, Doyduk (Nevşehir-Kozaklı) barajının planlama ve planlama revizyonu aşaması sonunda yapılan malzeme etütleri ile doğal malzemelerin kalitesi ve miktarı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre baraj toprak dolgu tipinde inşa edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Doğal Yapı Malzemeleri, Toprak Dolgu Baraj, Baraj, Gölet, Sulama.

GİRİŞ

Toprak ve kaya malzemelerden inşa edilen barajlar genellikle dolgu barajları veya dolgu tipi barajlar olarak adlandırılır. Dolgu barajlarının inşa tarihi beton barajlardan çok daha eskidir. Bu nedenle, en yaygın inşa edilen baraj türü dolgu barajdır. Dolgu barajların tipi, baraj sahasının morfolojisi ve jeolojisi ile mevcut inşaat malzemelerinin kalitesi ve miktarı ile ilişkili çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Ayrıca bu tür barajların daha dayanıklı, daha kompakt ve daha az deforme olabilen temeller gibi farklı jeolojik ortamlara iyi uyum sağlaması tercih edilmesinin nedenlerindendir. Baraj inşaat alanındaki mevcut malzemelerin tanımlanması ve incelenmesi önemlidir. Sahadaki mevcut malzemelerin kullanılarak inşa edilebilme durumunda büyük hacimli girdi malzemelerine olan ihtiyaç azalır (Fell vd., 2003; Chahar, 2004; Delgado-Ramos vd., 2016). Dolayısıyla, hem ekonomik açıdan hem de çevresel etkiyi azaltmak açısından, mevcut malzemelerin baraja yakın yerlerden temin edilmesi büyük bir avantajdır

(Aladelokun, 2012; Advokaat vd., 2014). Özellikle dolgu baraj çekirdekleri için, yapımında kullanılan zeminlerin geçirgenliği düşük ($<10^{-5}$ cm/s ve tercihen 10^{-6} cm/s'nin altında) olması için karakteristiklerin belirlenmesi olağandır. Ancak, çalışmanın yakınında farklı granülometriye sahip ve kötü derecelenmiş malzemeler bulunabilir. Bu nedenle malzemeye göre geçirgenlik çok değişken olabilmektedir. Bunlar, ortalama bir değerle yeterince karakterize edilemeyen heterojen malzemelerdir ve çekirdeği oluşturan malzeme kümesi içinde bu parametrede var olabilecek dağılım, çekirdeğin doğru işleyişini ve güvenliğini etkileyebilir (ICOLD., 1989; 1995). Doyduk Barajı (Nevşehir-Kozaklı) tarımsal alanların sulanması amacıyla inşa edilmiştir (Şekil 1). Proje sahasında Üst Eosen-Miyosen yaşlı çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşından oluşan Deliceırmak Formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal klastik, volkanik ve karbonat kayalarından oluşan Kızılırmak Formasyonu ile yamaç molozu ve alüvyondan oluşan genç çökeller yer almaktadır. Bu çalışmada, gövde dolgu hacmi 1,691 hm^3 olan baraj için gerekli geçirimsiz, geçirimli ve kaya malzeme sahalarından planlama ve planlama revizyonu aşaması sonunda yapılan malzeme etütleri ile doğal malzemelerin kalitesi ve miktarının değerlendirilmesi yapılmıştır.



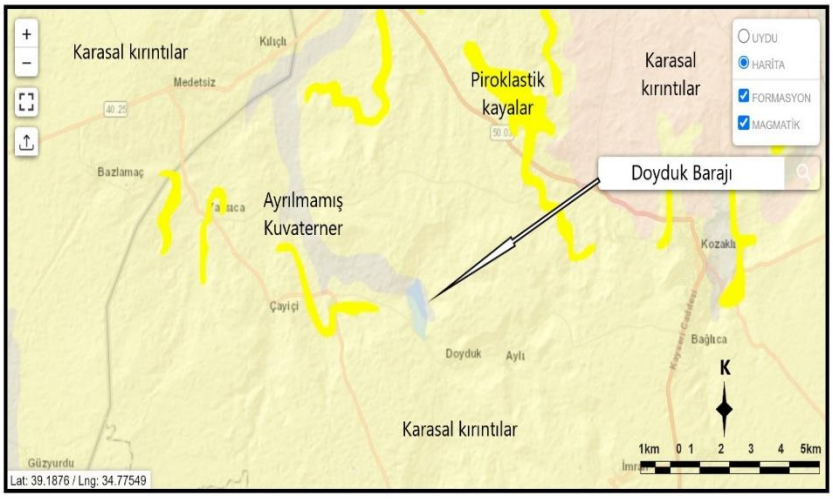
Şekil 1: Doyduk Barajı lokasyon haritası

MATERYAL VE METOD

Materyal

Bölgesel Jeolojik Özellikler

Bölgede, Paleozoyik yaşlı Kırşehir metamorfitleri ve bunları kesen Alt Senoniyen yaşlı intrüsiv kayaçlar ile bu birimleri uyumsuzlukla örten, Alt Eosen-Kuvaterner yaşlı sedimenter ve volkanik kayaçlar yüzeyler (Tokay, 2015). Proje sahasındaki bu birimlerden; göl-akarsu özellikli çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşından oluşan, kendisinden önceki birimle yanal ve düşey olarak geçiş gösteren Üst Eosen-Miyosen yaşlı Deliceırmak Formasyonu ile Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal klastik, volkanik ve karbonat kayalarından oluşan Kızılırmak Formasyonu önceki birimler üzerinde uyumsuz olarak yer alır (Lefebvre vd., 2013). Planlama ve planlama revizyonu aşamasında yapılan çalışmalarda baraj ve diğer yapı yerlerinde yüzeyleyen birimler, Miyosen yaşlı kırıntılılar (kiltaşı, silttaşı ve kumtaşı ardalanması) ve Pliyosen yaşlı kireçtaşları olarak adlandırılmıştır. Bu birimler Kızılırmak Formasyonu ve Kozaklı kireçtaşı üyesine karşılık gelmektedir. Proje sahasında yer alan bu birimler uyumsuz olarak Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon çökelleri tarafından örtülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2: Doyduk Barajı ve civarının jeoloji haritası (yerbilimleri.mta.gov.tr)

Deliceırmak Formasyonu: Formasyon, regresif özellikte, evaporitli, kırmızı, kahve, gri renkli, paralel-çapraz katmanlı, az köşeli-yuvarlak taneli, gevşek tutturulmuş karasal çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşur. Birimin alt düzeylerinde orta-iyi tutturulmuş, ince-orta-kalın paralel katmanlı kumtaşları ile ardalanmalı jips-anhidrit ara bantlı çamurtaşları bulunur. Orta ve üst düzeylerinde ise çamurtaşlarıyla ardışımlı ve daha üste doğru artan oranda, alt yüzeyleri erozyonal çapraz katmanlı çakıltaşı ve kumtaşları yer

alır. Deliceırmak Formasyonunun Kızılırmak Formasyonu ile olan üst dokanağı uyumsuzdur. Formasyon, göl ve akarsu fasiyelerinde gelişmiştir. Projeye ait yapı yerlerinde yüzeylemesi yoktur. Çalışma alanının kuzey ve doğu kesiminde Eyerci, Sarıkent, Karahasanlı, Karasenir, Fakılı dolayları ile Şefaatlı doğusunda yüzeylenir. Sarıkent ve Karasenir dolayında yüzeyleyen sahalarda geçirimli malzeme araştırması yapılmıştır.

Kızılırmak Formasyonu: Çalışma alanının büyük bir kesiminde yüzeyleyen Kızılırmak Formasyonu, kırmızı, kahve ve gri renkli, katmansız, gevşek, çakıllı, kumlu, yer yer karbonat nodüllü, tüf, kireçtaşı ve kumtaşı ve çakıltaşı bant ve mercekleri içeren çamurtaşlarından meydana gelmiştir. Kızılırmak Formasyonu genel olarak yatay konumludur. Yer yer paleo-topoğrafyaya bağlı olarak 5 dereceye kadar eğim kazanmıştır. Alt dokanağı daha yaşlı birimlerle uyumsuz olan formasyonunun kalınlığı 150 metre kadardır.

Mucur Tüf Üyesi: Çalışma alanda dar bir sahada Kızılırmak Formasyonu içinde yatay konumlu bant ve mercekler şeklinde yüzeylenen beyaz, pembe renkli volkanik cam parçalı masif volkanikler Mucur tüf üyesi olarak adlanmıştır. Kalınlığı 1-5 m arasında değişen birim, Kayseri-Nevşehir volkanizmasının çok uzaklara taşınan küllerinin depolanmasıyla oluşmuşarak yer yer bentonitleşmiştir.

Kozaklı Kireçtaşı Üyesi: Kızılırmak Formasyonu içinde yatay konumlu bant ve mercekler şeklinde yer alan beyaz, bej renkli, masif kırıntılı, boşluklu, killi kireçtaşı düzeyleri, Kozaklı kireçtaşı üyesi olarak adlanmıştır. Kalınlığı 1-5 m arasında değişen birim formasyonun gölsel ortamlarını yansıtan bölüm olarak gelişmiştir.

Yamaç Molozu: Ana kaya üzerinde oluşmuş kil, kum, çakıl ve blok birikintileridir. Eğimin az olduğu yamaç ve düzlüklerde birikmeyle oluşmuş örtü birimidir.

Alüvyon: Kalaycık deresi boyunca yüzeyler. Kil, kum ve çakılla temsil edilmekte ve kalınlığı 3 m 'dir.

Baraj Yeri Jeolojisi

Planlama aşamasında yapılan çalışmalarda, yapı yerlerinde kırıntılı çökeller ve kireçtaşları olmak üzere iki ana birim ayırtlanmıştır. Bu birimler stratigrafik olarak, Kızılırmak Formasyonu ve Kozaklı kireçtaşı üyesine karşılık gelmektedir.

Karasal Kırıntılar (kiltaşı, silttaşı, kumtaşı ardalanması): Karasal kırıntılı çökeller kırmızı, gri, krem renklidir. Kiltaşı, silttaşı ve kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Birim yer yer 1-2 cm kalınlığında jips bantları içermektedir. Kiltaşı, silttaşı ve kumtaşı az tutturulmuş, zayıf çimentoludur. Katmanlanma yataya yakın olup, ancak renk tonlarıyla ayırt edilebilmektedir. En üst seviyesinde 1-2 m kalınlığında, gri renkli ve yanal devamlılığı olan, tüfit yer alır, ayrışma yaygındır. Yapı yerlerinin büyük bölümünde ana kayayı bu birim oluşturmaktadır (Göğer, 1983).

Kireçtaşı: Kireçtaşları krem renkli, sert, çatlaklı, erime boşluklu ve orta-kalın tabakalıdır. Çoğunlukla vadi yamaçlarında korniş oluşturur. Kalınlığı 5-10 m kadardır. Birim, Miyosen yaşlı kırıntılıları uyumsuz olarak örtmektedir.

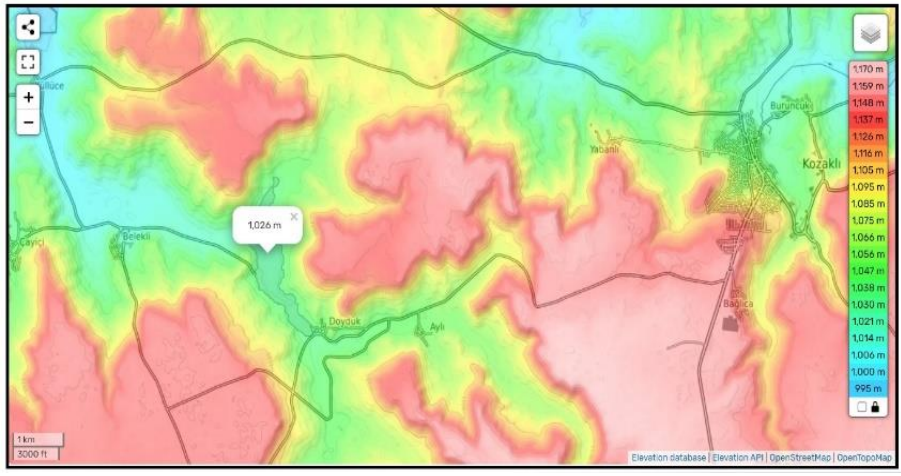
Projenin Teknik Özellikleri

Tipi	: Toprak dolgu
Dolgu Hacmi	: 1 690 905 m³
Memba şevi	: 3,5(Y) : 1.0(D)
Mansap şevi	: 3,0(Y) : 1.0(D)
Kret kotu	: 1052,00 m
Mak. Su Seviyesi	: 1050,93m
Normal Su Seviyesi	: 1049,45 m
Minimum su seviyesi	: 1031,00 m
Talveg kotu	: 1019,00 m
Temel kotu	: 1013,00 m
Talvegden yükseklik	: 33,0 m
Temelden yükseklik	: 39,0 m
Kret uzunluğu	: 760,95 m
Kret genişliği	: 10,00 m
Min. hacim	: 4,80 hm^3
Aktif hacim	: 39,50 hm^3
Toplam hacim	: 44,30 hm^3
Sulama sahası	: 1 543 ha brüt; 1 347 ha net
Ana boru hattı uzunluğu	: 12 202,00 m
Yedek ve tersiyerlerin uzunluğu	: 41 017,00 m
Boru hatları toplam uzunluğu	: 53 219,00 m

Baraj yeri, gövde dolgu tipi ve dolguda kullanılacak malzeme aynı olduğundan doğal yapı malzemeleri detaylı olarak araştırılmıştır. Doyduk barajı genel görünümü Şekil 3 ‘de verilmiştir. Baraj göl alanı 1026 m kotundadır (Şekil 4).



Şekil 3: Doyduk barajı genel görünümü



Şekil 4: Doyduk Barajı ve civarının Yükseklik Haritası

Metot

Temel Araştırmaları

Planlama ve planlama revizyonu aşamasında baraj yerinde 23 adet temel araştırma sondaj kuyusu açılmıştır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Açılan kuyularda geçirimliliğe yönelik serbest permeabilite, Basınçlı Su

Testleri ile taşımaya yönelik Standart Penetrasyon Deneyleri yapılmıştır (Tablo 1-2).

Tablo 1: Planlama aşamasında açılan temel araştırma sondaj kuyuları

Sondaj No	Sondaj Yeri	Derinlik (M)	Sondaj Kotu	YAS Seviyesi	Koordinatlar		Yerinde Deneyler
					Y	X	
SK-1	Sol sahilde	40	1039.73	17.50	4 341 997	390 935	SP
SK-2A	Talveg	20	1021.37	2.00	4 342 253	390 867	SP
SK-3	Sağ sahilde	30	1037.05	14.00	4 342 411	390 808	SP
SK-4	Sağ sahilde	40	1045.27	21.70	4 342 453	390 814	SP
SK-5A	Talveg	20	1022.72	1.50	4 342 293	390 855	SP
SK-6A	Talveg	20	1022.57	1.50	4 342 112	390 905	SP

SP. Serbest Permeabilite Not: Koordinatlar 1/1000 lik (3^0) haritaya göre çıkarılmıştır.

Tablo 2: Planlama revizyonu aşamasında açılan temel araştırma sondaj kuyuları

Sondaj No	Sondaj Yeri	Derinlik (M)	Sondaj Kotu	YAS Seviyesi	Koordinatlar		Yerinde Deneyler
					Y	X	
SK-7	Aks yeri, Sağ sahilde	40	1050.97	8.00	4 342 628	390 915	SP, BST
SK-8	Aks yeri sağ sahilde	20	1021.37	2.00	4 342 549	390 920	SP
SK-9	Aks yeri sağ sahilde	25	1027.02	7.00	4 342 435	390 929	SP, BST
SK-10	Aks yeri sol sahilde	30	1050.23	9.00	4 341 925	390 960	SP, BST
SK-11	Aks yeri sol sahilde	25	1035.20	6.00	4 342 029	390 954	SP, BST
SK-12	Aks yeri sol sahilde	20	1025.00	4.50	4 342 095	390 949	SP, BST
DSK-1	Sol sahil dolusavak	15	1053.10	7.50	4 341 874	390 960	
DSK-2	Sol sahil dolusavak	15	1045.45	10.50	4 341 844	390 844	
DSK-3	Sol sahil dolusavak	15	1028.62	9.00	4 342 029	390 717	
KSK-1	Sol sahil kondüvi	20	1028.62	3.50	4 342 080	390 989	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
KSK-2	Sol sahil kondüvi	20	1021.54	6.00	4 342 049	390 788	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-1	Talveg alüvyon	20	1020.49	0.00	4 342 139	390 891	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-2	Talveg alüvyon	20	1021.27	1.00	4 342 150	391 008	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-3	Talveg alüvyon	20	1022.00	1.00	4 342 248	391 003	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-4	Talveg alüvyon	20	1023.61	1.00	4 342 335	391 000	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-5	Talveg alüvyon	20	1021.62	1.00	4 342 217	390 884	Yanına SPT kuyusu açılmıştır
ASK-6	Talveg alüvyon	20	1022.27	1.00	4 342 315	390 882	Yanına SPT kuyusu açılmıştır

SP. Serbest Permeabilite, BST: Basınçlı Su Testi, SPT: Standart Penetrasyon Testi

Not: Koordinatlar 1/1000 lik (3^0) haritaya göre çıkarılmıştır

Doğal Yapı Malzemeleri

En ekonomik baraj inşası, genellikle baraj temeli, savak, çıkış tesisleri, santraller ve diğer ilgili yapılar için kazılması gereken malzemelerin sahadan makul bir taşıma mesafesinde olmasıyla mümkün olmaktadır. Baraj sahasının yakınında veya proje alanında bulunabilecek malzemeler olarak; setler için toprak, setler ve taş dolgu için kaya ve beton agregası (kum, çakıl ve kırma taş) bulunur. İnşaat alanı yakınında uygun malzeme bulunursa, toprak dolgu baraj daha ekonomik olabilir. Aynı zamanda uygun kaya kütlesinin bulunması, kaya dolgu barajı projelendirmesini destekleyebilir.

Beton için uygun kum ve çakılın sahada bulunarak beton (veya silindirle sıkıştırılmış beton) baraj için kullanılması avantajdır. Doyduk Barajı, toprak dolgu gövde tipinde projelendirilmiş, gövde dolgu hacmi 1,691 hm^3 olarak hesaplanmıştır (Ayan, 1980; Aktaran, 1989a;b). Baraj ve diğer yapı yerlerinde kullanılacak geçirimsiz, geçirimli ve kaya malzeme sahaları ile ilgili olarak yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

Malzeme ihtiyacı: Doyduk Barajı dolgu hacimleri ve gerek duyulan malzeme miktarları aşağıda verilmiştir.

Gövde dolgu hacmi	: 1 690 905 m^3
Batardo dolgu hacmi	: 40 783 m^3
Boru hatları malzeme ihtiyacı	: 85 000 m^3
Geçirimsiz malzeme ihtiyacı	**: 1 498 938 m^3**
Gövde	: 1 491 953 m^3
Batardo	: 6 985
Geçirimli malzeme ihtiyacı	**: 150 282 m^3**
Gövde	: 128 170 m^3
Batardo	: 1 316 m^3
Diğer yapı yerleri	: 20 796 m^3
Yarı geçirimli malzeme ihtiyacı	**: 85 000 m^3**
Boru hatları	: 85 000 m^3
Kaya malzeme ihtiyacı	**: 103 263 m^3**
Gövde	: 70 781 m^3
Batardo	: 32 482 m^3

Doyduk Barajı dolgu hacimleri ve gerek duyulan malzeme miktarları ile ilgili planlama aşamasında yapılan çalışmalar genişletilerek planlama revizyonu yapılmıştır. Planlama revizyonu aşamasında daha detaylı malzeme etütleri yapılmıştır.

PLANLAMA AŞAMASINDA YAPILAN MALZEME ETÜTLERİ

Geçirimsiz Malzeme Alanı

Baraj aks yerinden doğu (memba) yönündeki malzeme alanında çalışmalar yapılmıştır. Malzemenin nitelik ve miktarını tespit etmek amacıyla açık kazı yöntemiyle 49 adet araştırma çukuru açtırılmış ve çukurların 31 tanesinden örnekler alınmıştır. Alınan örneklerin DSİ 12 Bölge laboratuvarında ve Genel Müdürlük laboratuvarlarında gerekli deneyleri yapılmıştır (Ayan, 1980; Aktaran, 1989a;b). Araştırma çukurlarının derinlikleri ortalama 2.50 m 'dir. Kuyularda YAS 'na rastlanılmamıştır. Ortalama sıyırma kalınlığı 0.40 m kadardır. Malzemenin ortalama granülometrisi % 69.4 kil ve silt, % 27 kum, % 3.6 çakıldan oluşmaktadır. Arazi gözlem ve laboratuvar sonuçlarına göre malzemenin yüksek plastik yağlı kil (CH) karakterinde olduğu belirlenmiştir. Sıkıştırılmış halde iken geçirimsiz, sıkıştırılmış ve doygun halde iken kayma direnci zayıf, sıkıştırılmış ve doygun halde iken oturma fazla, inşaat malzemesi olarak işlenme durumu zayıftır. Alınan numunelerden 3 tanesinde toplam çözünmüş tuz yüzdeleri tespit edilmiş ve Tablo 3 'de verilmiştir.

Tablo 3: Toplam çözünmüş tuz yüzdeleri

Numune No	Suda Çözünen Bileşenlerin Kuru Ağırlığa Göre %
A-165/a	0.5920
A-168/a	0.9285
A-195/a	0.4940

Deney sonuçlarından da görüleceği üzere dolguda borulanmaya sebebiyet verebilecek tuz olmadığı kanaatine varılmıştır. Ayrıca numunelerden 5 tanesinde $CaCO_3$ ve $(SO_4)^{-2}$ yüzdeleri belirlenmiş, zemindeki sülfatın betona etkinlik derecesi tespit edilerek sonuçları Tablo 4 'de verilmiştir.

Tablo 4: Zemindeki sülfatın betona etkinlik derecesi

Numune No	Kalsiyum Karbonat ($CaCO_3$) %	Sülfat $(SO_4)^{-2}$ %	Sülfatın Etkinlik Derecesi
A-133/a	15.8	0.02	Etkisiz
A-169	26.9	0.3	Etkisiz
A-178/a	29.7	0.03	Etkisiz
A-193/a	13.9	0.03	Etkisiz
A-194/a	23.3	0.05	Etkisiz

900 000 m^2 civarında bir alana sahip olan malzeme sahasından 0.40 m 'lik sıyırmadan sonra yapılacak 3.25 m 'lik kazı ile yaklaşık 3 000 000 m^3 geçirimsiz malzeme alınabilecektir.

Geçirimli Malzeme Alanı

Planlama aşamasında geçirimli malzeme alanı olarak, Nevşehir-Avanos ilçesi 7 km doğusunda, Sarıhıdır köyü civarındaki Kızılırmak alüvyonları Geçirimli Malzeme alanı olarak değerlendirilmiştir. Geçirimli Malzeme Alanı baraj yerine yaklaşık 75 km mesafede, 750 000 m^2 'lik bir alana sahiptir (Aktaran, 1989a;b) . Sahada DSİ 12 Bölge Müdürlüğü tarafından 5 adet araştırma çukuru açılmıştır (Ayan, 1980; Aktaran, 1989a;b). Araştırma çukurundan alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre; malzemenin granülometrisi % 45 çakıl % 50 kum, %5 kil ve silt olup, büyük bir çoğunluğu kötü dereceli kum-çakıl karışımlarından (SP-GP) oluşmaktadır. Bu sonuçlara göre, bulunan değerler kullanılabilir limitler aralığındadır. Sahadan 1 m 'si su altında olmak üzere (YASS 3 m dir) 4 m'lik kazı ile 400 000 m^3 malzeme alınabilecektir.

Kaya Malzeme Alanı

Kaya malzeme alanı olabilecek kireçtaşları araştırılmıştır. Yapılan çalışmada gövde dolgu tipi toprak dolgu olarak belirlendiğinden, riprap için gerekli malzemenin, daha iyi blok malzeme verebilecek Kaya Malzeme Alanı-1 ve Kaya Malzeme Alanı-2 sahalarındaki kristalize kireçtaşlarından temini daha uygun bulunmuştur.

Kaya Malzeme Alanı-1: Baraj alanının güneydoğusunda, 25 km harita mesafesinde, Kapaklı köyünün 2 km güneyindedir. Malzeme alanına Doyduk-Kozaklı-Taşlıhöyük-Akpınar-Kapaklı yerleşimlerini bağlayan asfalt yol ile her mevsim ulaşım mümkündür. Yaklaşık 250 000 m^2'lik bir alana sahiptir (Ayan, 1980; Aktaran, 1989a;b). Litolojisi Permiyen yaşlı kristalize kireçtaşlarıdır.

Planlama aşamasında alınan 2 adet kaya numunesi üzerinde yapılan deneylerde;

Özgül ağılık: 2,66-2,68 gr/cm^3 (min 2,65 gr/cm^3)
Su emme: % 0,3-0,6 (max 1,8)
Los Angeles aşınma kaybı (500 devirde): % 22-30 (max 40)
Na_2SO_4 don kaybı: %3-7,4 (max 10) olarak bulunmuştur.

Deney sonuçlarına göre, elde edilen değerler uygun limitlerde olup, bu sahadan 250 000 m^3 barajda kullanılacak riprap malzemesi alınabilecektir.

Kaya Malzeme Alanı-2: Kaya Malzeme Alanı-1 sahasının 500 m güneyinde olup, baraj yerine 25.5 km harita mesafededir. Yaklaşık 200 000 m^2'lik bir alana sahiptir. Litolojisi Permiyen yaşlı kristalize kireçtaşlarıdır. Planlama aşamasında alınan 1 adet kaya numunesi üzerinde yapılan deneylerde;

Özgül ağılık: 2,79 gr/cm^3 (min 2,65 gr/cm^3)
Su emme: % 0,05 (max 1,8)
Los Angeles aşınma kaybı (500 devirde): % 23,4 (max 40)
Na_2SO_4 don kaybı: % 0,5 (max 10) olarak bulunmuştur.

DSİ 12 Bölge laboratuvarında ve Genel Müdürlük laboratuvarlarında elde edilen deney sonuçlarına göre, değerler uygun limitlerde olup, bu sahadan 150 000 m^3 barajda kullanılacak riprap malzemesi alınabilecektir.

PLANLAMA REVİZYONU AŞAMASINDA YAPILAN MALZEME ETÜTLERİ

Planlama Revizyonu aşamasında sadece sulama sahası boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılacak gerecin araştırmasına yönelik ek etütler yapılmıştır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Bu kapsamda boru güzergahlarında ihtiyaç duyulan 85 000 m^3 malzemenin alternatifli olarak belirlenen sahalardan temini uygun bulunmuştur. Boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak; Tablo 5 'de verilen değerlere uygun çakıl, kırmataş veya kum kullanılabilecektir.

Tablo 5.:Çakıl, kırmataş veya kum değerleri

Boru Çapı (D) (mm)	Max Çakıl veya Kırmataş Tane Büyüklüğü (mm)
<600	13
600-1600	19
>1600	25

Yastık tabakası uygun çakıl ve kırmataş ile teşkil edilecek ise %70 bağıl proktor yoğunluğuna ulaşıncaya kadar, kum ile teşkil edilecek ise %90 bağıl proktor yoğunluğuna ulaşıncaya kadar sıkıştırılmalıdır. A-1 ve A-2 olarak adlandırılan yarı geçirimli malzeme alanlarında kepçe ile 6 'şar adet araştırma çukuru açılmış ve torba örnekler alınmıştır. A-3 olarak adlandırılan kaya malzeme alanından 1 torba kaya numunesi alınmış ve kırmataş olarak uygunluk deneyleri yapılmıştır. Saha çalışmasında açılan çukur yerleri ve sayıları Tablo 6 'da verilmiştir.

Tablo 6: Açılan Araştırma Çukurları

Doğal Yapı Malzeme Sahaları	Açılan Araştırma Çukurları	Alınan Örnek Sayısı
A-1 Yarı Geçirimli malzeme sahası	A-1-1, A-1-2, A-1-3, A-1-4, A-1-5, A-1-6	6 Adet
A-2 Yarı Geçirimli malzeme sahası	A-2-1, A-2-2, A-2-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6	6 Adet
A-3 Kaya malzeme sahası	A-3-1	1 Adet

Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1

Baraj yerinin kuzeydoğusundaki Karasenir köyünün yaklaşık 0,5 km kuzeyinde yer almaktadır. Baraj ile Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1 arasındaki mesafe yaklaşık 14 km'dir. Sulama sahasına ise 10-20 km arasında değişen mesafededir. Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1 'de 6 adet araştırma çukuru açılmış ve 6 adet numune alınmıştır (Şengün, 1989). Deney sonuçlarına göre, malzeme sahası; iyi derecelenmiş ve kötü derecelenmiş iri bloklu, çakıllı, siltli kumlardan (SM-SP ve SM-SW sınıfı malzemelerden) oluşmaktadır. Yaklaşık 24 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.2 m 'lik sıyırma kazısından sonra 2.5 m'lik kazı ile 60 000 m^3 yarı geçirimli malzeme temin edilebilecektir (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Laboratuvar deney sonuçlarına göre malzemenin; İri agrega için; özgül ağırlık 2,64-2,78 gr/cm^3 arasında ve su emme %1,78 – 2,45 arasında, ince agrega da; özgül ağırlık 2,63-2,74 gr/cm^3, su emme % 1,0-1,40 arasında bulunmuştur. İdeal özgül ağırlık en az 2,65 gr/cm^3 ve su emme çakıl ve kum için maksimum %1 olması istenilmektedir. Maksimum kuru birim ağırlığı; 1,842-1,907 gr/cm^3, optimum su içeriği; %7,69-%11,3 arasındadır.

Malzeme Alanının Tane Boyu Dağılımı ise; % 8-31 arasında Çakıl, % 66-87 arasında Kum, % 5-8 arasında Kil-Silt 'dir.

İri agreganın gevşek birim ağırlığı; 1,475-1,523 gr/cm^3, Sıkışık birim ağırlığı; 1,715-1,753 gr/cm^3,

İnce agreganın gevşek birim ağırlığı; 1,283- 1,379 gr/cm^3, Sıkışık birim ağırlığı; 1,440-1,585 gr/cm^3,

Tuvenan malzemenin gevşek birim ağırlığı; 1,362-1,588 gr/cm^3 'dir. Sıkışık birim ağırlığı; 1,572-1,800 gr/cm^3 'dir. Na_2SO_4 don kaybı Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 7: Malzemenin Na_2SO_4 don kaybı

No	Tek Tane Sınıfları					
	2-4,76	4,76-9,5	9,5-12,7	12,7-19	19-25	25-37,5
A-1-1	7,70	8,70	7,50	8,00	8,60	9,60
A-1-2						
A-1-3	8,30	7,30	7,40	8,80	7,80	7,00
A-1-4	6,30	7,40	7,00	8,00	7,80	6,60
A-1-5	8,70	9,60	8,30	9,10	7,70	7,60
A-1-6	6,30	7,70	8,50	7,80	7,10	8,00

İnce agregada maksimum don kaybı oranı % 8,70 ve İri agregada maksimum değer % 9,60 dir. Malzeme maksimum kullanım limitleri (ince agregada %15, iri agregada %18) açısından uygundur. Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1 için Los Angeles aşınma kaybı Tablo 8 'de verilmiştir.

Tablo 8: Malzemenin Los Angeles aşınma kaybı

No	İnce Agrega		İri Agrega	
	100 Tur	500 Tur	100 Tur	500 Tur
A-1-1	8,40	25,20		
A-1-2	9,40	25,80	7,30	27,00
A-1-3	8,80	24,60	7,90	27,60
A-1-4	8,20	24,20	8,50	27,80
A-1-5	9,30	25,90	8,10	29,30
A-1-6	8,90	24,50	7,30	23,20

Malzeme maksimum kullanım limitleri (en fazla 100 devirde %10, 500 devirde % 40) açısından uygundur. Malzeme alanından alınan örneklerin laboratuvar deney sonuçları yarı geçirimli malzeme için limitlere uygun olup, sadece boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılabilir niteliktedir.

Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-2

Saha, baraj yerinin kuzeyindeki Sarıkent köyünün yaklaşık 1 km güneyinde yer almaktadır. Baraj yeri ile Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-2 arasındaki mesafe yaklaşık 18 km'dir. Sulama sahasına ise 8-18 km arasında değişen mesafededir. Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-2 'de, 6 adet malzeme çukuru kepçe ile açılmış ve 6 adet torba numune alınmıştır. Deney sonuçlarına göre, malzeme sahası iyi derecelenmiş yada kötü derecelenmiş siltli kumlardan (SM-SP ve SM-SW sınıfı malzemelerden) oluşmaktadır. Yaklaşık 50 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.2 m 'lik sıyırma kazısından sonra 3 m 'lik kazı ile 150 000 m^3 yarı geçirimli malzeme temin edilebilecektir (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Laboratuvar deney sonuçlarına göre malzemenin;

İri agrega için; özgül ağırlık 2,67-2,78 gr/cm^3 arasında ve su emme % 1,15 – 2,14 arasında, ince agrega da; özgül ağırlık 2,62-2,74 gr/cm^3, su emme % 1,0-1,40 arasındadır. İdeal özgül ağırlık en az 2,65 gr/cm^3 ve su emme çakıl ve kum için maksimum %1 olması istenilmektedir. Maksimum kuru birim ağırlığı; 1,852-1,919 gr/cm^3, optimum su içeriği; % 8,05-% 11,2 arasındadır.
Malzeme Alanının Tane Boyu Dağılımı ise; % 10-38 arasında Çakıl, % 57-86 arasında Kum, % 5-8 arasında Kil-Silt 'dir.
İri agreganın gevşek birim ağırlığı ise; 1,499-1,542 gr/cm^3, Sıkışık birim ağırlığı 1,711-1,786 gr/cm^3,
İnce agreganın gevşek birim ağırlığı 1,246- 1,318 gr/cm^3, Sıkışık birim ağırlığı 1,439-1,481 gr/cm^3
Tuvenan malzemenin gevşek birim ağırlığı 1,493-1,553 gr/cm^3, Sıkışık birim ağırlığı 1,563-1,687 gr/cm^3. Malzemenin Na_2SO_4 Don deneyi sonuçları Tablo 9 'da verilmiştir.

Tablo 9: Malzemenin Na_2SO_4 don deneyi sonuçları

No	Tek Tane Sınıfları					
	2-4,76	4,76-9,5	9,5-12,7	12,7-19	19-25	25-37,5
A-2-1	5,40	7,10	6,00	6,70	7,30	8,00
A-2-2						
A-2-3	6,00	5,40	6,20	5,40	5,80	6,70
A-2-4	6,50	5,20	4,90	5,00	4,80	6,20
A-2-5	5,10	7,60	6,00	6,40	7,70	8,80
A-2-6	9,30	7,00	6,90	7,40	8,50	7,60

Malzeme maksimum kullanım limitleri (ince agregada %15, iri agregada %18) açısından uygundur. Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları Tablo 10 'da verilmiştir.

Tablo 10: Los Angeles Aşınma Deneyi Sonuçları

No	İnce Agrega		İri Agrega	
	100 Tur	500 Tur	100 Tur	500 Tur
A-2-1	9,00	24,10		
A-2-2	8,20	23,40	6,00	25,70
A-2-3	7,90	23,00	5,70	24,70
A-2-4	8,50	23,30	6,10	25,10
A-2-5	9,80	24,80	7,00	27,30
A-2-6	9,30	25,00	8,10	26,40

Kullanma limiti (en fazla 100 devirde % 10, 500 devirde % 40) değerlerine uygundur. Malzeme alanından alınan örneklerin laboratuvar

deney sonuçları yarı geçirimli malzeme için limitlere uygun olup, sadece boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılabilir niteliktedir. Daha önce de malzeme alınmış olan bu saha, yakınına kadar gelen asfalt yol, daha kalın bir malzeme içeriği ve geniş yayılımı dikkate alındığında, öncelikle kullanılması uygun olacaktır.

Kaya (Kırmataş) Malzeme Alanı

Neojen yaşlı kireçtaşı litolojisine sahip sahada kaya ocağı olarak işletilmekte ve Doduk Barajı inşaatına kırmataş elde edilmektedir. Kaya (Kırmataş) Malzeme Alanı, baraj yerinin 1.5 km güneydoğusunda, Doyduk köyünün 1 km kuzeyindedir. Sulama sahasına 4-14 km arasında değişen mesafededir. Kaya ocağı olarak işletildiğinden baraj yerine kadar stabilize yol mevcuttur. Yaklaşık 100 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.3 m 'lik sıyırma kazısından sonra 5 m 'lik kazı ile 500 000 m^3 kaya (kırmataş) malzemesi temin edilebilecektir (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010). Laboratuvar deney sonuçlarına göre malzemenin; Kaya (Kırmataş) Malzeme ocağından alınan kaya malzemesinin özgül ağırlığı 2,84 gr/cm^3, su emme % 2,14 'tür. İdeal özgül ağırlık en az 2,65 gr/cm^3 ve su emme çakıl ve kum için maksimum %1 olması istenilmektedir. Los Angeles aşınma kaybı için 100 Devirde % 5,30 iken, 500 Devirde % 23,60 'dır. Kullanma limiti (en fazla 100 devirde %10, 500 devirde %40) değerlerine uygundur. Na_2SO_4 don kaybı ise Tablo 11 'de verilmiştir. Malzeme maksimum kullanım limitleri (ince agregada % 15, iri agregada % 18) açısından uygundur.

Tablo 11: Kayacın Na_2SO_4 don kaybı

No	Tek Tane Sınıfları					
	2-4,76	4,76-9,5	9,5-12,7	12,7-19	19-25	25-37,5
A-3-1		6,20	7,70	8,60	8,80	9,20

Boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kırmataş da (en büyük tane boyu boru çapına göre uygun olduğu taktirde) kullanılabilmektedir. Malzeme alanından alınan örneğin laboratuvar deney sonuçları kullanma limitleri aralığındadır. Bu sahadan alınacak kayadan kırmataş yapılarak sadece boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılması uygun bulunmuştur.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir dolgu barajın inşası için temin edilecek malzeme hacimleri önemlidir. İnşaa edilecek barajın yakınındaki malzemelerin kullanımı teknik açıdan yetersiz olabilir. Çünkü barajın yakınındaki yerlerde homojen özelliklere sahip kaliteli malzemelerin varlığı nadirdir. Bu nedenle; çekirdeği inşa etmek için iyi mühendislik özelliklerine sahip malzemeyi kullanmak ve taşımak ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir değildir. Bu nedenle, baraj sahasında çekirdeğin bir parçası olarak daha az uygun malzeme kullanma olasılığı incelenmelidir. Planlama ve planlama revizyonu aşaması sonunda yapılan malzeme etütleri sonucunda malzemeler; geçirimsiz, geçirimli ve kaya malzeme sahaları olarak değerlendirilerek aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Planlama aşmasında,

- Geçirimsiz malzeme alanı, baraj yerine 500 m mesafeden başlayarak göl alanında kalmaktadır. 900 000 m^2 civarında bir alana sahip olan malzeme sahasından 0.40 m 'lik sıyırmadan sonra yapılacak 3.25 m 'lik kazı ile yaklaşık 3 000 000 m^3 geçirimsiz malzemenin alınabileceği belirlenmiştir.
- Geçirimli Malzeme için, Nevşehir-Avanos ilçesi 11 km batısında yer alan Kızılhöyük köyü güneybatısındaki Kızılırmak alüvyonlarından alınması kararlaştırılmıştır. Baraj yerine yaklaşık 75 km mesafede olup, asfalt yol mevcuttur. Laboratuvar sonuçları kullanılabilir limitler aralığında olup, 4 m 'lik kazı ile 400 000 m^3 malzeme alınabileceği belirlenmiştir.
- Riprap için gerekli malzemenin, daha iyi blok malzeme verebilecek Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1 ve 2 sahalarındaki kristalize kireçtaşlarından temini daha uygun bulunmuştur. Baraj yerine 25 km mesafede, Kapaklı köyü 2 km güneyindedir. DSİ 12 Bölge laboratuvarları ve Genel Müdürlük laboratuvarlarında yapılan deney sonuçlarına göre; malzeme uygun limitlerde olup, bu sahalardan sırasıyla 250 000 m^3 ve 150 000 m^3 barajda kullanılacak riprap malzemesi alınabilecektir.

Planlama Revizyonu aşamasında,

- Sadece sulama sahası boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılacak gerecin araştırmasına yönelik ek etütler yapılmıştır. Boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak; D (boru çapı)< 600 için 13 mm, 600>D< 1600 için 19 mm ve D>1600 için 25 mm en büyük tane çapı değelerine uygun çakıl, kırmataş veya kum kullanılabilecektir. Bu kapsamda 2 adet yarı geçirimli malzeme alanı ile 1 adet kaya malzeme alanı (kırmataş için) etüt edilmiştir.
- Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-1, Karasenir köyünün 0,5 km kuzeyinde olup, baraj yeri ile Karasenir köyü arasında 14 km 'lik asfalt yol bulunmaktadır. Sulama sahasına ise 10-20 km arasında değişen mesafededir. Malzeme sahası; SM-SP ve SM-SW sınıfı malzemelerden oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre; malzeme limitlere uygun olup, 24 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.2 m 'lik sıyırma kazısından sonra 2.5 m

'lik kazı ile 60 000 m^3 yarı geçirimli malzeme (boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak) temin edilebilir.

- Yarı Geçirimli Malzeme Alanı-2, Sarıkent köyünün yaklaşık 1 km güneyinde olup, Baraj ile Sarıkent köyü arasında 18 km asfalt yol bulunmaktadır. Sulama sahasına ise 8-18 km arasında değişen mesafededir. Malzeme sahası; SM-SP ve SM-SW sınıfı malzemelerden oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre; malzeme limitlere uygun olup, Yaklaşık 50 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.2 m' lik sıyırma kazısından sonra 3 m 'lik kazı ile 150 000 m^3 yarı geçirimli malzeme (boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak) temin edilebilir. Daha önce de malzeme alınmış olan bu sahanın, yakınına kadar gelen asfalt yol, daha kalın bir malzeme içeriği ve geniş yayılımı dikkate alındığında, öncelikle kullanılması uygun olacaktır.
- Kaya Malzeme Alanı, baraj yerinin 1.5 km güneydoğusunda, Doyduk köyü 1 km kuzeyindedir. Sulama sahasına 4-14 km arasında değişen mesafededir. Kaya ocağı olarak işletildiğinden baraj yerine kadar stabilize yol mevcuttur. Baraj yeri ile Kaya Ocağı arasındaki mesafe yaklaşık 3 km 'dir. Deney sonuçlarına göre; malzeme kullanma limitleri aralığında olup, yaklaşık 100 000 m^2 alana sahip bu sahadan 0.3 m 'lik sıyırma kazısından sonra 5 m 'lik kazı ile 500 000 m^3 kaya (kırmataş) malzeme temin edilebilir. Bu sahadan alınacak kayadan kırmataş yapılarak sadece boru güzergahlarında yastıklama malzemesi olarak kullanılması uygundur.

Teşekkür: Yazar, T.C. Tarım, Orman ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, DSİ 12. Bölge Müdürlüğü' ne katkılarından dolayı teşekkür eder.

REFERANSLAR

Advokaat, E.L., Van Hinsbergen, D.J.J., Kaymakcı, N., Vissers, R.L.M. & Hendriks, B.W.H. (2014). Late Cretaceous extension and Palaeogene rotation-related contraction in Central Anatolia recorded in the Ayhan-Büyükkışla basin, International Geology Review, 56 (15), pp. 1813-1836.

Aktaran, İ. Eylül (1989a). Nevşehir-Kozaklı Doyduk Barajı Kesin Proje Aşaması İlave Kaya Gereci Raporu, DSİ 12 Bölge Müdürlüğü-Kayseri

Aktaran, İ. (1989b). Nevşehir-Kozaklı Doyduk Barajı Kesin Proje Aşaması Doğal Yapı Malzemeleri Raporu, DSİ 12 Bölge Müdürlüğü-Kayseri

Aladelokun, A.O. (2012). The Sustainability of Dam Construction through Environmental Management. IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol. 2012, 1, 1–5.

Ayan, S. (1980). Nevşehir-Kozaklı Doyduk Barajı Planlama Aşaması Doğal Yapı Malzemeleri Raporu, DSİ 12 Bölge Müdürlüğü-Kayseri

Chahar, B. (2004). Determination of Length of a Horizontal Drain in Homogeneous Earth Dams. Journal of Irrigation Drain Engineering, 130, 530–536.

Delgado-Ramos, F., Escudero-Merino, D., Olalla, C. (2016). The importance of permeability in granular filter design and control. Scour Erosion, 979–985.

Fell, R., Wan, C.F., 2003. Cyganiewicz, J., Foster, M. (2003). Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129, 307–314.

Göğer, E. (1983). Doyduk Barajı Mühendislik Jeolojisi Planlama Raporu, DSİ 12 Bölge Müdürlüğü-Kayseri. http: yerbilimleri.mta.gov.tr (erişim tarihi, 2024)

ICOLD. (1989). Moraine as Embankment and Foundation Material. State of the Art; International Commission on Large Dams: Paris, France.

ICOLD. (1995). Dam Failures Statistical Analysis; International Commission on Large Dams, Paris, France.

Lefebvre, C., Meijers, M.J.M., Kaymakci, N., Peynircioğlu, A., Langereis, C.G. & van Hinsbergen, D.J.J. (2013). Reconstructing the geometry of central Anatolia during the Late Cretaceous: Large-scale Cenozoic rotations and deformation between the Pontides and Taurides, Journal of Structural Geology, 366, pp. 83-98.

Şengün, Y. (1989). Nevşehir-Kozaklı Doyduk Projesi Doyduk Barajı Kanal Güzergahı Mühendislik Jeolojisi Planlama Raporu. DSİ 12 Bölge Müdürlüğü-Kayseri.

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2010). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 12. Bölge Müdürlüğü, Kayseri, Nevşehir Kozaklı Doyduk Projesi Planlama Revizyonu Mühendislik Jeolojisi Raporu, 86 s.

Tokay B. (2015). Kinematics of Delice-Kozaklı Fault Zone (North Central Anatolia, Turkey), MSc.Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 117 pp.

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Çevresel Sürdürülebilirliği

Necla TEKTAŞ[1]
Mehmet TEKTAŞ[2]

1- Prof.Dr.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi Ekonometri Bölümü. ntektas@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8190-4532
2- Prof.Dr.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. mtektas@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9564-8069

ÖZET

Küresel ölçekte hızla artan kentsel nüfus ve hareketlilik talepleri, modern şehirlerin ulaşım sistemleri üzerinde çevresel baskılar oluşturmaktadır. Geleneksel ulaşım altyapılarının bu zorluklara yanıt vermede yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu bağlamda, bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım sistemlerine entegrasyonu ile geliştirilen Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik bir çözüm alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, AUS uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, sera gazı emisyonları, hava kalitesi, enerji tüketimi, arazi kullanımı ve gürültü kirliliği gibi temel çevresel göstergeler üzerinde AUS bileşenlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, adaptif trafik yönetimi, akıllı toplu taşıma sistemleri, elektrikli ve otonom araçların entegrasyonu ile büyük veri ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon teknolojilerinin, trafik akışını iyileştirerek yakıt tüketimi ile emisyon değerlerini (CO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, CO) anlamlı düzeyde azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, AUS uygulamalarının arazi kullanım verimliliğini artırdığı ve kentsel gürültü seviyelerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ancak, AUS projelerinin yaygınlaştırılmasında yüksek ilk yatırım maliyetleri, altyapı yetersizlikleri, kurumsal koordinasyon eksiklikleri ve kullanıcı davranışları gibi çeşitli yapısal engellerin olduğu da belirlenmiştir. Sonuç olarak, AUS teknolojilerinin kentlerin çevresel ayak izini azaltma potansiyeli yüksek olmakla birlikte, bu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleştirilmesi; bütünleşik ulaşım politikaları, sürdürülebilir finansman modelleri, veri güvenliğini sağlayan düzenlemeler ve kullanıcı odaklı tasarım yaklaşımlarının benimsenmesini gerektirmektedir.

Anahtar Kelimeler – Akıllı Ulaşım Sistemleri, Sürdürülebilirlik, Toplu Taşıma, Ulaşım Politikaları, Çevresel Sürüdürülebilirlik.

GİRİŞ

Küresel ölçekte kentleşme düzeyindeki artış ve buna bağlı olarak yükselen ulaşım talepleri, modern şehirlerin ulaşım sistemleri üzerinde giderek artan çevresel baskılar oluşturmaktadır. Bu dinamik yapı, mevcut geleneksel ulaşım altyapılarının çevresel sürdürülebilirlik kriterleri doğrultusunda yetersiz kaldığını ve bu sistemlerin dönüşüm ihtiyacının kritik bir boyuta ulaştığını göstermektedir. Özellikle fosil yakıt temelli motorlu taşıt trafiğinin neden olduğu sera gazı emisyonları, hava kirliliği, enerji verimsizliği ve kentsel alanlarda yaşam kalitesinin düşmesi gibi çok boyutlu sorunlar, yeni nesil teknolojik çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Zhang et al., 2021). Bu açıdan ele alındığında Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım altyapısına entegre

edilmesiyle, sürdürülebilir, verimli ve çevresel etkileri minimize eden ulaşım modellerinin hayata geçirilmesini mümkün kılan yenilikçi sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında sera gazı emisyonlarının azaltılması giderek daha büyük bir önem kazanmaktadır. Ulaşım sektörü küresel emisyonlar içinde dikkat çeken bir paya sahiptir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA, 2023) verilerine göre ulaşım, 2022 yılı itibarıyla enerjiyle ilişkili küresel karbon dioksit (CO_2) emisyonlarının yaklaşık %24'ünü oluşturmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin geliştirilmesini sadece çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal kalkınma açısından da stratejik bir öncelik haline getirmektedir (Chen, Zhang ve Liu, 2019). Akıllı ulaşım teknolojileri, trafik yönetiminden toplu taşıma optimizasyonuna, enerji verimliliğinden emisyon azaltımına kadar geniş bir yelpazede çevresel faydalar sunma kapasitesine sahiptir.

Bu çalışma, AUS'un çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini sistematik ve kapsamlı bir biçimde incelemeyi amaçlamaktadır ve AUS teknolojilerinin başta sera gazı emisyonlarının azaltılması, hava kalitesinin iyileştirilmesi, enerji tüketiminin optimize edilmesi, arazi kullanımı üzerindeki etkiler ve gürültü kirliliğinin azaltılması gibi temel çevresel göstergeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, modern AUS uygulamalarının bu çevresel performans kriterleri doğrultusunda ne ölçüde etkili olduğu ortaya konulmakta; ayrıca bu teknolojilerin sürdürülebilir kentsel kalkınma hedeflerine katkı potansiyeli çok boyutlu bir yaklaşımla analiz edilmektedir. Akıllı trafik yönetim sistemleri, gerçek zamanlı toplu taşıma bilgi sistemleri, akıllı park yönetimi, adaptif sinyal kontrolü ve entegre ulaşım platformları gibi çeşitli AUS bileşenlerinin çevresel etkilerinin analiz edilmesi oluşturmaktadır. Bu teknolojilerin kentsel çevre üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerinin dengelenmesi, politika önerilerinin geliştirilmesi ve gelecekteki araştırma yönlerinin belirlenmesi araştırmanın temel hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışmanın önemi, günümüzde kentsel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği ile mücadele konularının sahip olduğu kritik değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri kapsamında yer alan "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar" hedefinin gerçekleştirilmesi, büyük ölçüde akıllı ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesine bağlıdır (United Nations, 2015). AUS teknolojilerinin çevresel etkilerinin sistematik bir şekilde analiz edilmesi, politika yapıcılar, şehir planlayıcıları ve teknoloji geliştiricileri için stratejik karar verme süreçlerinin bilimsel temellere dayandırılması açısından hayati önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, kentsel yönetimlerin sınırlı kaynaklarını optimal düzeyde kullanabilmeleri için önceliklendirilmesi gereken AUS teknolojilerinin belirlenmesine yönelik tespitler yapmasıdır. Bu açıdan ele alındığında araştırma, teknoloji yatırımlarının çevresel getirilerinin ölçülmesi

ve değerlendirilmesi açısından önemli bir metodolojik çerçeve ortaya koymaktadır. Söz konusu yaklaşım, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki kentlerin sınırlı bütçe koşullarında maksimum çevresel fayda sağlayacak teknoloji seçimlerini gerçekleştirebilmeleri açısından stratejik bir değer taşımaktadır. Bu durum, kaynakların etkin tahsisi ve sürdürülebilir kentsel dönüşümün hızlandırılması noktasında çalışmaya kritik bir değer kazandırmaktadır.

AUS ve teknolojilerinin çevresel etkilerine ilişkin mevcut literatür incelendiğinde, çalışmaların büyük ölçüde yalnızca belirli bir çevresel göstergeye veya belirlenmiş bir teknolojiye odaklandığı görülmektedir. Bu durum, AUS uygulamalarının karmaşık ve çok boyutlu çevresel etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesini sınırlamaktadır (Nelson ve Clark, 2021). Bu çalışma ise, çoklu çevresel gösterge yaklaşımına dayalı kapsamlı ve sistematik bir değerlendirme çerçevesi geliştirerek söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Böylelikle AUS teknolojilerinin çevresel etkileri daha gerçekçi ve çok boyutlu bir perspektifle analiz edilmektedir. Bu çalışmada AUS çevresel sürdürülebilirlik ekseninde yeniden değerlendirilmiş ve teknoloji-çevre etkileşimi derinlemesine incelenmiştir (Rodriguez ve Smith, 2019). Bu yaklaşım, AUS araştırmalarında çevresel boyutun daha güçlü bir şekilde temsil edilmesine katkı sunarken, aynı zamanda farklı disiplinleri bir araya getiren araştırmalar için de teorik bir zemin oluşturmaktadır (Thompson ve Martinez, 2022). Buna ek olarak, çalışma metodolojik açıdan da çevresel etki değerlendirme literatürüne katkıda bulunmaktadır (Li ve Wang, 2020). Geliştirilen çevresel gösterge seti ve değerlendirme çerçevesi, gelecekteki AUS projelerinde çevresel performansın ölçülmesi için karşılaştırmalı analizlere imkân tanıyan standart bir metodoloji sunmaktadır (Wilson vd, 2022). Bu metodolojik katkı, akıllı şehirler bağlamında çevresel değerlendirme yaklaşımlarının sistematikleştirilmesi açısından da önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Zhang ve Liu, 2021).

AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ (AUS)

AUS, farklı disiplinlerle olan ilişkisi ve dünya genelinde sahip olduğu hayati rol nedeniyle bugünün ve geleceğin en önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Özellikle ulaşımda ve trafikteki risklerin azaltılması, kaza oranlarının düşürülmesi, trafik sıkışıklığının giderilmesi, karbon emisyonunun ve hava kirliliğinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir

(Tektaş ve Tektaş, 2019). Aynı zamanda güvenliğin, sürdürülebilirlik ve güvenilirliğin artırılması, trafikteki anlık hızların optimize edilmesi, trafik akışının iyileştirilmesi ve yolcu tatmininin yükseltilmesi konularında AUS hayati bir role sahiptir (Qureshi ve Abdullah, 2013).

Singh ve Gupta (2015) tarafından yapılan tanıma göre, AUS trafik akışının izlenmesi ve yönetilmesi, sıkışıklığın azaltılması, yolculara en uygun rotanın sağlanması ve trafikte mobilitenin artırılması ile zaman ve paranın israf edilmemesi için iletişim, kontrol, elektronik ve araç algılama teknolojilerini kapsayan entegre bir sistem olarak tanımlanmaktadır.

2016 yılında yapılan kapsamlı tanımlamaya göre, AUS seyahat sürelerinin azaltılması, trafik güvenliğinin artırılması, mevcut yol kapasitelerinin optimum kullanımı, mobilitenin artırılması, enerji verimliliği sağlanarak ülke ekonomisine katkısı ve çevreye verilen zararın azaltılması gibi amaçlar doğrultusunda geliştirilmiştir. Bu sistemler, kullanıcı-araç-altyapı-merkez arasında çok yönlü veri alışverişi ile izleme, ölçme, analiz ve kontrol işlevlerini içermektedir (Tektaş, Korkmaz ve Erdal, 2016).

AUS'da Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS/GIS) kullanımı oldukça yaygındır ve sistemin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Ulaştırma problemlerine coğrafi bilgi teknolojilerinin uygulanması prensipleri ile işlemektedir. Bu sistemler, veri ile haritayı birleştirerek konum verilerini tanımlayıcı bilgilerle entegre ederek haritalama ve analiz için temel sağlamaktadır.

Mobil ve web teknolojilerinin aktif bir biçimde kullanılması, kullanıcılara anlık ve efektif bilgi aktarımını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Yakın zamanda yapılan çalışmalarda CBS sistemleri ile mobil ve web teknolojilerinin entegrasyonu konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Mühendisler, yol ağları ve ulaştırma altyapısını geliştirmek için CBS teknolojisini kullanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda sadece yeni teknolojilerin kullanımı değil, aynı zamanda kurulum ve kullanım maliyetlerinin düşürülmesi de gelişmekte olan ülkelerdeki ihtiyaçları karşılamak bakımından son derece önemli bir konu olarak ele alınmaktadır. Bu durum, AUS teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve evrensel ölçekte uygulanabilirliği açısından kritik bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

1. Çevresel Sürdürülebilirlik ve Ulaşım İlişkisi

Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması ve ekosistemlerin uzun vadeli sağlığının garanti altına alınması anlamına gelmektedir. Ulaşım sektörü, hava kirliliği, sera gazı emisyonları, gürültü kirliliği ve arazi kullanımı gibi çeşitli çevresel etkilere sahiptir (Banister, 2019; Ünal, Tektaş ve Tektaş, 2025). 2023'te yapılan araştırmaya göre kent içi ulaşımın, şehirlerdeki karbon emisyonlarının %40'ından sorumlu olduğunu ve bu oranın gelişmekte olan ülkelerde daha da yüksek olduğunu belirtmektedir (Zhang ve Liu; 2023). Sürdürülebilir ulaşım, ekonomik

büyüme ve sosyal kalkınma hedeflerini desteklerken, çevresel etkileri minimize etmeyi amaçlamaktadır. AUS, bu dengeyi sağlamak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

2. Akıllı Trafik Yönetim Sistemleri ve Çevresel Faydaları

Akıllı trafik yönetim sistemleri, sensörler, kameralar ve veri analitiğini kullanarak trafik akışını optimize etmekte ve trafik sıkışıklığını azaltarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürmektedir. 2021 yılında yapılan bir çalışmada, adaptif trafik sinyalizasyon sistemlerinin CO_2 emisyonlarını %12-15 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Adnan, Hassan ve Ergen,2021). Özellikle, dinamik trafik yönetim sistemleri, gerçek zamanlı veri kullanarak trafik ışıklarını optimize ettiği, araçların rölantide kalma sürelerini azalttığı ve bu sistemlerin uygulandığı şehirlerde NOx emisyonlarının %18'e kadar düşüş gösterdiğini belirlemişlerdir (Chen ve Johnson, 2022; Ünal, Tektaş ve Tektaş,2025).

3. Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik ve Akıllı Toplu Taşıma

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedefleri doğrultusunda geliştirilen akıllı toplu taşıma sistemleri, gerçek zamanlı veri paylaşımı, dinamik güzergâh planlaması ve talep odaklı hizmet sunumu gibi teknolojik olanaklar sayesinde kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu sistemler, toplu taşımanın erişilebilirliğini ve güvenilirliğini artırarak bireyleri özel araç kullanımından vazgeçmeye teşvik etmekte ve böylece daha çevreci ve sürdürülebilir ulaşım davranışlarının gelişmesine katkı sağlamaktadır (Santos, Behrendt ve Teytelboym, 2020).

Ayrıca bisiklet ve scooter paylaşımı, araç paylaşımı ve talep odaklı taşıma gibi paylaşımlı hareketlilik hizmetlerinin akıllı teknolojilerle entegre edilmesi, kentlerde bireysel araç sahipliğini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Shaheen ve Cohen'in (2021) bulgularına göre, bir araba paylaşım sistemi üyesi, üyelik sonrası ortalama 9 ila 13 özel aracın trafikten çekilmesine dolaylı olarak katkı sunmaktadır. Bu durum, akıllı ulaşım çözümlerinin yalnızca ulaşım etkinliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda trafik yoğunluğunu ve çevresel etkileri azaltma konusunda da önemli rol oynadığını göstermektedir.

4. Elektrikli ve Otonom Araçlar: Fırsatlar ve Zorluklar

Elektrikli araçlar (EA) ve otonom araçlar (OA), AUS dönüşümünde kilit rol oynayan teknolojik bileşenler arasında yer almaktadır. Elektrikli araçlar, fosil yakıt kullanımını azaltarak sıfır veya düşük emisyonlu bir ulaşım biçimi sunmakta, bu yönüyle kentsel çevre kalitesine olumlu katkı sağlamaktadır (Özbay, Közkurt, Dalcalı ve Tektaş;2020). OA ise sürüş optimizasyonu ve trafik yönetimi açısından sundukları avantajlarla yakıt tüketimini azaltmakta ve çevresel etkileri minimize etmeyi hedeflemektedir (Akkaya ve Özbay, 2022; Brown, Gonder, ve Repac, 2019). Ancak bu

teknolojilerin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri yalnızca olumlu yönleriyle sınırlı değildir. Stern ve Hoekstra (2023), otonom araçların yaygınlaşmasının bireysel seyahat taleplerini artırarak toplam enerji tüketiminde artışa ve dolayısıyla beklenmedik çevresel sonuçlara neden olabileceğini belirtmektedir. Bu durum, özellikle kent içi ulaşımda bireysel motorlu araç kullanımının yeniden artış göstermesi riskini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla hem EA hem de OA teknolojilerinin çevresel ve toplumsal faydalarının maksimize edilebilmesi için, bu sistemlerin toplu taşıma ve aktif ulaşım modlarıyla bütünleşik bir şekilde planlanması ve uygulanması büyük önem taşımaktadır.

5. Büyük Veri ve Yapay Zekâ Tabanlı Ulaşım Optimizasyonu

Son yıllarda büyük veri analitiği ve yapay zekâ teknolojileri, ulaşım sistemlerinin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler; trafik tahminleri, güzergâh optimizasyonu, dinamik fiyatlandırma ve talep tahmini gibi uygulamalarda kullanılarak hem operasyonel verimliliği artırmakta hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunmaktadır (Tektaş, Tektaş ve Yıldırım, 2024; Li, Yang ve Sun, 2020).

Makine öğrenmesi algoritmalarının ulaşım alanında kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Kumar ve Singh (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, trafik tahmininde makine öğrenmesi tabanlı modellerin kullanılması sayesinde kent içi sera gazı emisyonlarında yaklaşık %17 oranında bir azalma sağlandığı rapor edilmiştir. Bu bulgu, yapay zekâ temelli karar destek sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından kayda değer potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bununla birlikte, gerçek zamanlı veri analitiği uygulamaları sayesinde toplu taşıma operatörleri filo yönetimini daha etkin şekilde gerçekleştirebilmekte, araç doluluk oranlarını optimize edebilmekte ve enerji tüketimini azaltacak stratejiler geliştirebilmektedir. Bu tür teknolojik yaklaşımlar, kent içi ulaşım sistemlerinde daha esnek, kaynak verimliliği yüksek ve çevre dostu çözümlerin uygulanmasına zemin hazırlamaktadır.

SEÇİLMİŞ ŞEHİRLERDE AUS UYGULAMALARI

AUS, şehirlerin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla dünya genelinde farklı stratejilerle uygulanmaktadır. Bu bölümde, beş farklı kıtadan ve Türkiye'den seçilen şehirlerin AUS uygulamaları incelenmekte ve bu sistemlerin çevresel etkileri değerlendirilmektedir.

Singapur: Tıkanıklık Ücretlendirmesi ve Entegre Trafik Yönetimi

Singapur, sürdürülebilir ulaşım politikalarının etkin biçimde uygulandığı örnek kentlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kentsel trafik tıkanıklığının azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi amacıyla geliştirdiği Elektronik Yol Ücretlendirme Sistemi (Electronic Road Pricing, ERP), dünya genelinde gelişmiş sıkışıklık ücretlendirme uygulamalarının başında gelmektedir. Bu sistem, trafik yoğunluğuna bağlı olarak zaman ve mekâna göre değişkenlik gösteren ücretlendirme mekanizmaları aracılığıyla sürücülerden ücret tahsil edilmesini sağlamaktadır. Böylece, özel araç kullanımının caydırılması, toplu taşıma sistemlerine yönelimin teşvik edilmesi ve kent içi ulaşım talebinin daha dengeli bir şekilde yönetilmesi amaçlanmaktadır (Phang ve Toh, 2004). ERP sistemi, sadece ulaşım politikalarının entegrasyonu açısından değil, aynı zamanda kullanıcı davranışlarının yönlendirilmesi ve trafik yönetiminin dijitalleşmesi açısından da önemli bir yenilik sunmaktadır.

ERP sistemi, Singapur'un entegre trafik yönetimi politikalarıyla birlikte çalışarak trafik akışını gerçek zamanlı izleyen, yönlendiren ve müdahale edebilen dijital altyapılarla desteklenmektedir. Bu sayede sadece araç yoğunluğu değil, aynı zamanda karbon emisyonları ve enerji tüketimi de etkin biçimde kontrol altına alınmaktadır. Ayrıca, sistemin elde ettiği gelirlerin büyük bir bölümü toplu taşıma altyapısının geliştirilmesine ve sürdürülebilir ulaşım yatırımlarına yönlendirilmektedir (Varol, 2017). Bu bütünleşik yaklaşım, Singapur'un ulaşım planlamasında yalnızca verimliliği değil, çevresel sürdürülebilirliği de merkeze aldığını göstermektedir(Şekil 1).



Şekil 1: Singapur'un entegre trafik yönetimi ERP sistemi (URL 1)

Barcelona: Akıllı Toplu Taşıma ve Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı

Barcelona, sürdürülebilir kentsel dönüşüm hedefleri doğrultusunda geliştirdiği Kentsel Hareketlilik Planı (PMUS-Plan de Movilidad Urbana Sostenible / Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı) ile ulaşım sektöründe kapsamlı bir çevresel iyileştirme stratejisi benimsemiştir. Plan kapsamında hayata geçirilen akıllı otobüs durakları, gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemleri ve bisiklet paylaşım ağları gibi AUS uygulamaları, fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesi yönünde doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu teknolojik entegrasyon, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini ve kullanıcı tercihini artırarak özel araç kullanımından kaynaklanan çevresel yükün minimize edilmesini hedeflemektedir (Ajuntament de Barcelona, 2019).

Kentin çevre odaklı yaklaşımının en önemli bileşenlerinden biri olan "Superblock" (Süper Blok) konsepti, motorlu taşıt trafiğinin sınırlandırılması ve yaya öncelikli alanların genişletilmesi yoluyla kentsel hava kalitesinde ölçülebilir iyileşmeler sağlamaktadır. Bu model, karbon dioksit (CO_2), azot oksit (NOx) ve partikül madde (PM) emisyonlarının azaltılması açısından önemli çevresel kazanımlar sunmakta, aynı zamanda gürültü kirliliğinin düşürülmesi ve kentsel ısı adası etkisinin hafifletilmesi gibi ikincil çevresel faydalar da yaratmaktadır (Mueller vd., 2020). Bu bütünleşik yaklaşım, teknolojik yenilikler ile mekânsal planlama stratejilerinin sinerjik kullanımının sürdürülebilir kentsel çevre yaratma potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 2: Barcelona'nın "Superblock" şehir planı (URL 2)

Seul: Akıllı Kart Entegrasyonu ve Gerçek Zamanlı Bilgi Sistemleri

Seul, toplu taşıma sistemlerinde teknolojik entegrasyon yoluyla çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı amaçlayan öncü kentlerden biridir. Özellikle akıllı kart teknolojisinin (T-money) yaygınlaştırılması, kent içi ulaşımda önemli çevresel kazanımların elde edilmesini sağlamıştır (Audouin et al., 2015; Park ve Kim, 2013). Bu sistem, yolcu hareketliliğini optimize ederek bekleme sürelerini azaltmakta, araç içi doluluk oranlarını dengeli hale getirmekte ve ödeme işlemlerinin dijitalleşmesi yoluyla kâğıt kullanımını minimize etmektedir. Söz konusu teknolojik dönüşüm, toplu taşıma kullanım oranlarını artırarak özel araç bağımlılığının azalmasına katkı sağlamakta, bu durum ise kent ölçeğinde sera gazı emisyonlarının düşürülmesi, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin azalması gibi önemli çevresel faydalar yaratmaktadır (Kim, 2008; Lee ve Kim, 2021).

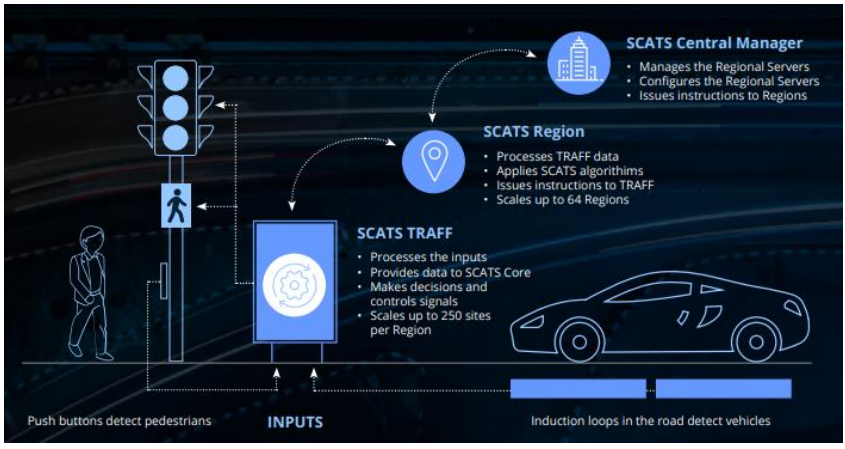
Buna ek olarak, Seul'de uygulamaya konan gerçek zamanlı bilgi sistemleri, özellikle otobüs ve metro hatlarında yolculara seyahat süreleri, araç konumları ve sefer sıklıkları hakkında anlık veri akışı sağlayarak ulaşım davranışlarının çevresel açıdan optimize edilmesini desteklemektedir. Bu sistemler, kullanıcıların güzergâh seçimlerini ve seyahat zamanlamalarını daha bilinçli bir şekilde planlamalarını mümkün kılarak gereksiz bekleme sürelerini, aktarma kayıplarını ve boş araç kullanımını minimize etmektedir. Sonuç olarak, yakıt tüketiminin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve kentsel hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi doğrudan çevresel çıktılar elde edilmektedir (Kim ve Kwon, 2019; Audouin ve Finger, 2018). Seul'ün bu entegre yaklaşımı, AUS teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada yalnızca teknik bir araç olmaktan öte, davranışsal dönüşüm ve ekolojik bilinç geliştirme açısından da stratejik bir role sahip olduğunu ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3: Seul akıllı kart uygulaması (URL 3)

Melbourne: Adaptif Trafik Sinyalizasyon Sistemi

Avustralya'nın Melbourne şehri, adaptif trafik sinyalizasyon sistemi olan SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) ile trafik yönetiminde önemli bir çevresel dönüşüm gerçekleştirmiştir. Bu sistem, gerçek zamanlı trafik koşullarını analiz ederek sinyal sürelerini optimize etmekte, böylece dur-kalk durumlarını azaltmakta ve yakıt tüketimini düşürmektedir (Little ve Wooster, 1994; Smit ve Boulter, 2013).



Şekil 4: Melbourne adaptif trafik sinyalizasyon sistemi olan SCATS(URL 4)

Bogotá: Hızlı Otobüs Taşıma Sistemi (BRT)

Kolombiya'nın başkenti Bogotá, TransMilenio adlı hızlı otobüs taşımacılığı (Bus Rapid Transit, BRT) sistemi aracılığıyla sürdürülebilir kentsel ulaşım politikalarının uygulanmasında öncü şehirlerden biri konumundadır. İlk olarak Aralık 2000'de hizmete sunulan sistem, 2024 itibarıyla 114,4 km uzunluğundaki 12 ana koridor boyunca, 120 otobüs güzergâhı ile Bogotá ve komşu Soacha kentine hizmet vermektedir. TransMilenio, yüksek kapasiteli, düşük emisyonlu otobüsler aracılığıyla özel araç kullanımını azaltmayı ve kentsel ulaşımda çevresel etkiyi en aza indirmeyi hedeflemektedir (Hidalgo ve Muñoz, 2014; Millard-Ball, 2008). Bu sistem, sadece fiziksel altyapı değil, aynı zamanda AUS ile de desteklenmektedir. Özellikle duraklara entegre edilen gerçek zamanlı bilgi sistemleri, yolcuların otobüs varış saatleri ve hat durumları hakkında anlık bilgiye erişmesini sağlamaktadır. Bu uygulama, toplu taşıma sistemine olan güveni ve kullanıcı memnuniyetini artırmakta, dolayısıyla toplu taşıma tercih oranlarını yükseltmektedir (Nakahashi, 2009; Reyes-Sanchez et al., 2024).

Uygulamanın çevresel ve toplumsal etkilerine yönelik yapılan bilimsel çalışmalar, hava kirliliği düzeylerinde düşüş, PM2.5 ve CO_2 konsantrasyonlarında anlamlı azalma, ayrıca kamu sağlığında iyileşmeler gözlendiğini ortaya koymaktadır (Guevara-Luna et al., 2020; Morales-Betancourt et al., 2022). TransMilenio, sadece bir BRT sistemi değil, aynı zamanda entegre ulaşım teknolojileri ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin birleştiği bir model olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5: Bogotá, BRT(Bus Rapid Transit) TransMilenio hızlı otobüs taşıma sistemi (URL 5)

İstanbul: İstanbulkart ve AUS Entegrasyonu

İstanbul'un çok modlu entegre toplu taşıma altyapısı, AUS kapsamında çevresel sürdürülebilirliğe yönelik güçlü bir örnek teşkil etmektedir. Şehir, metro, metrobüs, tramvay, otobüs ve deniz yolu gibi çeşitli toplu taşıma modlarını İstanbulkart adı verilen tekil elektronik ücretlendirme sistemi ve dijital mobil platformlar üzerinden entegre ederek,

ulaşımda erişilebilirlik ve verimliliği artırmayı başarmıştır (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2024). Bu dijital entegrasyon, bireyleri özel araç kullanımından caydırarak toplu taşıma tercihlerini artırmakta; bu da doğrudan karbon emisyonlarının azaltılması, trafik yoğunluğunun hafifletilmesi ve enerji tüketiminin optimize edilmesi gibi çevresel kazanımları beraberinde getirmektedir.



Şekil 6: İstanbulkart (URL 6)

Özellikle metro gibi tamamen elektrikle çalışan raylı sistemlerin yaygınlaştırılması, fosil yakıt kullanımını azaltarak kent genelinde hava kalitesinin iyileştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır. İstanbul'un bu model yaklaşımı, AUS teknolojilerinin yalnızca dijital altyapıyı değil, aynı zamanda iklim politikaları ve sürdürülebilir ulaşım hedefleriyle entegrasyonunu göstermesi açısından dikkat çekici bir uygulamadır.

Konya*: *BİSAY Yapay Zekâ Destekli Bisiklet Sayaçları

Konya, sürdürülebilir ulaşım politikaları kapsamında AUS çevresel veri üretimiyle entegre eden öncü şehirlerden biridir. Konya Büyükşehir Belediyesi tarafından geliştirilen yapay zekâ destekli bisiklet sayaçları**,** kent genelindeki bisiklet yollarına entegre edilerek hem kullanıcı sayılarının gerçek zamanlı takibini mümkün kılmakta hem de ulaşım planlamasında çevresel analizlerin temelini oluşturmaktadır (Konya Büyükşehir Belediyesi, 2025). Bu sistemler, bisiklet kullanım oranlarını analiz ederek kent içi motorlu taşıt bağımlılığını azaltmayı hedefleyen stratejik yatırımlara yön vermekte; aynı zamanda karbon emisyonlarının düşürülmesi **ve** hava kalitesinin artırılması gibi çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir. Akıllı sayaçlar sayesinde elde edilen veriler hem altyapı yatırımlarının yönlendirilmesinde hem de bireylerin aktif ulaşım tercihlerinin desteklenmesinde işlevsel bir rol üstlenmektedir. Konya'nın bu yenilikçi yaklaşımı, AUS teknolojilerinin veri odaklı ve çevreye duyarlı şehir planlama süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7: Konya BİSAY (URL 7)

ÇEVRESEL ETKİ DEĞERLENDİRME ÇERÇEVESİ

AUS, bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım altyapısına entegrasyonu yoluyla, ulaşım sistemlerinin verimliliğini artırmayı ve olumsuz çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan uygulamalardır. Kentleşme, motorlu taşıt yoğunluğu ve fosil yakıt tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan çevresel sorunlar özellikle sera gazı emisyonları, hava kirliliği ve enerji verimsizliği bu tür teknolojik çözümlere olan ihtiyacı daha da artırmıştır.



Şekil 8: AUS projelerinin çevresel etkilerini değerlendirmede kullanılan beş ana gösterge

AUS uygulamalarının çevresel sürdürülebilirliğe olan katkılarının nicel ve sistematik biçimde değerlendirilmesi, karar vericiler ve politika yapıcılar açısından stratejik önem arz etmektedir. Bu çalışmada, AUS projelerinin çevresel etkilerini sistematik biçimde değerlendirebilmek amacıyla, literatürde yer alan çevresel gösterge setlerine dayalı bir analiz çerçevesi benimsenmiştir. Bu çerçeve kapsamında, AUS uygulamalarının çevresel performansını bütüncül ve karşılaştırılabilir bir yaklaşımla incelemek üzere beş temel gösterge belirlenmiştir. Bu gösterge şekil 8'de görülmekte ve AUS çevresel etki değerlendirmesi Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1: AUS Çevresel etki değerlendirmesi

Gösterge	Açıklama	AUS Teknolojilerinin Katkı Biçimi	Kaynaklar
Sera Gazı Emisyonu Azaltımı (CO_2 eşdeğeri)	Ulaşımda verimliliği artırarak sera gazı salınımını düşürmeyi ifade eder.	Gerçek zamanlı trafik yönetimi ve toplu taşıma entegrasyonu araçların dur-kalk sayısını azaltarak CO_2 emisyonlarını düşürür. Akıllı sinyalizasyon emisyonu minimize eder; park yönlendirme sistemleri ise park arama süresini kısaltarak yakıt ve emisyon azaltımı sağlar.	Chen, Zhang ve Liu (2019); Li ve Wang (2020); Zhang vd. (2021)
Hava Kirletici Emisyonları (NOx, $PM_{2.5}$, CO)	Zararlı kirleticilerin (NOx, $PM_{2.5}$, CO) atmosfere salınımındaki azalma.	Akıllı sinyalizasyon ve adaptif hız kontrol, motorların optimum verimde çalışmasını sağlar. Trafik sıkışıklığını azaltarak kirletici salınımlarını düşürür, kent içi hava kalitesini artırır.	Thompson ve Martinez (2022); Anderson vd. (2020); Kumar ve Patel (2021)
Enerji Tüketimi ve Yakıt Tasarrufları	Ulaşımda enerji verimliliğini artırma ve fosil yakıt kullanımını azaltma etkisi.	Yeşil dalga senkronizasyonu ile dur-kalk sayısı azalır, yakıt tüketimi düşer. Toplu taşıma uygulamaları özel araç talebini azaltır. Araç paylaşımı ve karpool entegrasyonu enerji verimliliğini güçlendirir.	Rodriguez ve Smith (2019); Johnson vd. (2023); Lee ve Kim (2021)
Arazi Kullanımı Etkileri	Kent içi alanların sürdürülebilir kullanımına yönelik etkiler.	Akıllı park sistemleri ve araç paylaşımı otopark ihtiyacını azaltır, yeşil alanların korunmasına imkân verir. Kompakt kent gelişimini destekleyerek kentsel yayılmayı sınırlar.	Wilson vd. (2022); Garcia ve Brown (2020); Davis vd. (2021)
Gürültü Kirliliği Azaltımı	Trafik kaynaklı gürültü seviyelerindeki azalma.	Trafik akışını optimize eden AUS uygulamaları motor, fren ve hızlanma kaynaklı gürültüyü azaltır. Adaptif sinyalizasyon ve düşük emisyon bölgeleri yaşam kalitesini artırır. Akıllı hız kontrol sabit hızlarla gürültüyü azaltır.	Taylor ve White (2020); Miller vd. (2022); Nelson ve Clark (2021)

SONUÇ

Bu araştırma, AUS uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini sera gazı emisyonları, hava kalitesi, enerji tüketimi, arazi kullanımı ve gürültü kirliliği gibi temel göstergeler üzerinden sistematik ve çok boyutlu bir yaklaşımla ele almıştır. Çalışmanın bulguları küresel ölçekte hızla artan kentsel nüfus ve hareketlilik taleplerinin modern şehirlerin ulaşım sistemleri üzerindeki çevresel baskısını artırdığı ve

geleneksel altyapıların bu zorluklara yanıt vermede yetersiz kaldığı sonucuna ulaşmıştır.

AUS bileşenleri kentsel çevresel performansı iyileştirmede önemli bir yere sahiptir. Adaptif trafik yönetimi, akıllı toplu taşıma sistemleri, elektrikli ve otonom araçların entegrasyonu ile büyük veri ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon teknolojilerinin, trafik akışını iyileştirerek yakıt tüketimi ile emisyon değerlerini (CO_2, NO_x, $PM_{2.5}$, CO) anlamlı düzeyde azalttığı görülmüştür.

Adaptif trafik sinyalizasyon sistemlerinin CO_2 emisyonlarında %12-15 oranında azalma sağladığı (Adnan, Hassan ve Ergen, 2021) ve dinamik trafik yönetim sistemlerinin NO_x emisyonlarını %18'e kadar düşürdüğü (Chen ve Johnson, 2022) yönündeki somut bulgular, AUS'un hava kalitesi ve iklim değişikliğiyle mücadeledeki doğrudan etkilerini ortaya koymaktadır. Ulaşım sektörünün küresel enerjiyle ilişkili CO_2 emisyonlarının yaklaşık %24'ünü oluşturduğu göz önüne alındığında (IEA, 2023), bu emisyon azaltımları stratejik öncelik taşımaktadır.

Akıllı toplu taşıma, erişilebilirliği ve güvenilirliği artırarak bireyleri özel araç kullanımından uzaklaştırmakta ve çevreci ulaşım davranışlarını teşvik etmektedir (Santos, Behrendt ve Teytelboym, 2020). Araç paylaşım sistemlerinin, ortalama 9 ila 13 özel aracın trafikten çekilmesine dolaylı katkı sağladığı tespiti (Shaheen ve Cohen, 2021), AUS'un arazi kullanımı verimliliğini artırdığını ve kentsel gürültü seviyelerini düşürdüğünü gösteren bulgularla (Wilson vd., 2022; Garcia ve Brown, 2020; Davis vd., 2021) tutarlıdır.

AUS'un çevresel faydaları yüksek olmakla birlikte, projelerin yaygınlaştırılması; yüksek ilk yatırım maliyetleri, altyapı yetersizlikleri, kurumsal koordinasyon eksiklikleri ve kullanıcı davranışları gibi çeşitli yapısal engellerle karşılaşmaktadır. Daha da önemlisi, otonom araçların yaygınlaşmasının, bireysel seyahat taleplerini artırarak toplam enerji tüketiminde artışa ve beklenmedik çevresel sonuçlara yol açabileceği riski (Stern ve Hoekstra, 2023), AUS politikalarının sadece teknolojik ilerlemeye değil, aynı zamanda davranışsal ve mekânsal planlamaya da odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

AUS teknolojilerinin çevresel ayak izini azaltma potansiyelinin tam anlamıyla hayata geçirilmesi; bütünleşik ulaşım politikaları, sürdürülebilir finansman modelleri, veri güvenliğini sağlayan düzenlemeler ve kullanıcı odaklı tasarım yaklaşımlarının benimsenmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, politika yapıcıların:

- EA ve OA'da dâhil olmak üzere tüm AUS sistemlerinin, çevresel ve toplumsal faydaları maksimize etmek amacıyla toplu taşıma ve aktif ulaşım modlarıyla (bisiklet, yürüme) bütünleşik bir şekilde planlanmasını ve uygulanmasını sağlamaları gerekmektedir.

- Sınırlı kaynakları en etkili şekilde kullanabilmek için, hangi AUS teknolojilerinin çevresel getirilerinin en yüksek olduğu konusunda rehberlik sağlayan metodolojik çerçeveleri kullanmaları önemlidir.

Bu çalışma, mevcut literatürün çoğunlukla yalnızca belirli bir çevresel göstergeye veya tekil bir teknolojiye odaklanarak AUS uygulamalarının karmaşık etkilerini bütüncül biçimde değerlendirmeyi sınırladığı boşluğu doldurmayı hedeflemiştir. Geliştirilen çoklu çevresel gösterge yaklaşımına dayalı kapsamlı ve sistematik değerlendirme çerçevesi, AUS araştırmalarında çevresel boyutun daha gerçekçi ve çok boyutlu bir perspektifle analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu metodolojik katkı (Li ve Wang, 2020), akıllı şehirler bağlamında çevresel değerlendirme yaklaşımlarının sistematikleştirilmesi açısından önemli bir zemin oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, AUS teknolojileri kentlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında hayati bir araçtır. Ancak çevresel ve toplumsal faydaların kalıcı olması, yalnızca teknolojik gelişmelere değil, bu sistemlerin kentsel hareketlilik planlaması, toplu taşıma entegrasyonu ve olası geri tepme etkilerini yönetmeye odaklanan kapsamlı ve bütünleşmiş kentsel sürdürülebilirlik politikalarına bağlıdır. Akıllı ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi, Birleşmiş Milletler ’in "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar” hedefine ulaşılması için kritik önem taşımaktadır (United Nations, 2015).

REFERANSLAR

Adnan, M., Hassan, S., ve Ergen, E. (2021). Evaluation of adaptive traffic signal systems on emission reduction: A case study in Istanbul. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 89, 102634. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102634

Akkaya, S., ve Özbay, H. (2022). Otonom araçların akıllı ulaşım politikaları üzerindeki etkileri. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 5(2), 200-210.

Ajuntament de Barcelona. (2019). Pla de Mobilitat Urbana Sostenible 2019–2024. Retrieved from

Anderson, M., Roberts, J., ve Singh, P. (2020). Adaptive traffic control systems and urban air quality improvement: A comprehensive analysis. Journal of Environmental Engineering, 146(8), 04020089. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001742

Ankara Büyükşehir Belediyesi. (2023). Ankara Trafik Yönetim Sistemi ve Akıllı Kavşaklar: Çevresel ve Ekonomik Etki Raporu. Ankara Büyükşehir Belediyesi Yayınları.

Audouin, M., ve Finger, M. (2018). What can the South learn from the North regarding the implementation of IoT solutions in cities? In From innovation to social impact (pp. 165–180). https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/27706/1/1002300.pdf

Audouin, M., Razaghi, M., ve Finger, M. (2015). How Seoul used the 'T-Money' smart transportation card to re-plan the public transportation system of the city: Implications for governance of innovation in urban public transportation systems. 8th TransIST Symposium. https://www.researchgate.net/publication/290574722

Banister, D. (2019). Transport and the environment: The need for policy reform. Transport Reviews, 39(4), 485–497. https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1633843

Brown, A., Gonder, J., ve Repac, B. (2019). Environmental impacts of automated vehicles: A review of the literature. Transportation Research Record, 2673(5), 66–77. https://doi.org/10.1177/0361198119839392

Chen, L., Zhang, H., ve Liu, M. (2019). Carbon emission reduction through intelligent transportation systems: A systematic review. Transportation Research Part D, 68, 84–98. https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.002

Chen, Y., ve Johnson, P. (2022). Autonomous vehicles and urban sustainability: A system dynamics approach. Journal of Cleaner Production, 315, 128243. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128243

Davis, R., Thompson, K., ve Johnson, S. (2021). Smart city technologies and sustainable land use planning: Integration strategies for urban development. Urban Planning Review, 45(3), 215–232. https://doi.org/10.1080/02665433.2021.1945678

ESCAP (United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific). (2019). Using smart transport technologies to mitigate greenhouse gas emissions from the transport sector in Asia. https://repository.unescap.org/handle/20.500.12870/344

Garcia, A., ve Brown, D. (2020). Intelligent parking systems and urban land use optimization: Environmental and social implications. Cities, 102, 102734. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102734

Guevara-Luna, F. A., ve Guevara-Luna, M. A. (2020). Passengers exposure to PM2.5 in self-polluted BRT-diesel operated transport system microenvironments. Asian Journal of Atmospheric Environment, 14(2), 105–115. https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.2.105

Hidalgo, D., ve Muñoz, J. C. (2014). A review of technological improvements in Bus Rapid Transit (BRT) and buses with high level of service (BHLS). Public Transport, 6, 185–213. https://doi.org/10.1007/s12469-014-0089-9

IEA. (2023). Transport sector CO2 emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000–2030. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022

Johnson, E., Martinez, C., ve Lee, S. (2023). Energy efficiency in smart transportation: Mobile applications and public transit integration. Energy Policy, 175, 113467. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113467

Kim, G. C. (2008). Challenges for environmentally sustainable transport in Seoul. Journal of Environmental Studies. https://s-space.snu.ac.kr/bitstream/10371/90679/1/6.Challenges_for_Environmentally_Sustainable_Transport_in_Seoul.pdf

Kim, J., ve Kwon, H. (2019). Improving public transportation in the Seoul metropolitan area. KDI School of Public Policy. https://archives.kdischool.ac.kr/bitstream/11125/32774/1/reforming_public_transportation_in_sma_5-17-19_2.pdf

Kim, S., ve Park, J. (2021). Impacts of integrated smart card systems on public transport demand in Seoul metropolitan area. Transport Policy, 105, 35–43. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.02.005

Konya Büyükşehir Belediyesi. (2024). Akıllı Şehir Konya: Bisiklet Ulaşım Sistemi ve Sürdürülebilirlik Raporu. Konya Büyükşehir Belediyesi Yayınları.

Kumar, A., ve Patel, N. (2021). Real-time traffic optimization and pollutant emission reduction in urban environments. Environmental Science ve Technology, 55(12), 8234–8243. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01456

Kumar, A., ve Singh, P. (2022). Machine learning applications in traffic prediction and emission reduction. Sustainable Cities and Society, 75, 103352. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103352

Lee, J., ve Kim, G. C. (2021). The Smart Transportation Card (T-Money): Integrating public transit systems to improve citizen mobility in Seoul, 1996–2004. Global Delivery Initiative. https://www.effectivecooperation.org/system/files/2021-06/gdi_case_study_on_smart_transportation_card_in_seoul_-_integrating_public_transit_systems.pdf

Lee, K., ve Wong, T. (2022). Electronic road pricing and urban sustainability: Evidence from Singapore. Journal of Transport Geography, 98, 103244. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103244

Li, X., ve Wang, R. (2020). Smart traffic signal control and greenhouse gas emission reduction: A quantitative assessment. Transportation Research Record, 2674(9), 89–101. https://doi.org/10.1177/0361198120935443

Li, X., Yang, J., ve Sun, X. (2020). Big data in sustainable urban mobility: A comprehensive review. Communications in Transportation Research, 1, 100005. https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100005

Martinez, L., ve Kumar, P. (2022). Smart charging strategies for electric vehicles: Implications for grid stability and renewable energy integration. Energy Policy, 160, 112667. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112667

Millard-Ball, A. (2008). Bus Rapid Transit and Carbon Offsets. California Climate Action Reserve. https://www.climateactionreserve.org/wp-content/uploads/2009/03/future-protocol-development_bus-rapid-transit-and-carbon-offsets.pdf

Miller, P., Jackson, T., ve Adams, L. (2022). Noise pollution mitigation through adaptive traffic management systems in urban areas. Applied Acoustics, 191, 108678. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108678

Morales Betancourt, R., ve Galvis, B. (2022). Toward cleaner transport alternatives: Reduction in exposure to air pollutants in a mass public transport. Environmental Science ve Technology. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07004

Nakahashi, S. (2009). Challenges in expanding the feasibility of Bus Rapid Transit as Clean Development Mechanism projects (Doctoral dissertation). ProQuest. https://search.proquest.com/openview/de6bdb4e6706716a4145f37383f2e00e/1

Nelson, G., ve Clark, B. (2021). Intelligent speed adaptation systems and urban noise reduction: A field study approach. Transportation Research Part F, 78, 245–261. https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.02.008

Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A. ve Tektaş, M. (2020). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 3(1), 34-50.

Park, J., ve Kim, D. (2013). Korea's Integrated Fare and Smart Card Ticket System. Korea Transport Institute. https://centers.ibs.re.kr/html/living_en/transport/KSP%205%20Lessons%20from%20Korea%E2%80%99s%20Integrated%20Fare%20and%20Smart%20Card%20Ticket%20System.pdf

Patel, V. N. (2021). Assessment of transportation network performance using SCATS and microsimulation techniques. Flinders University. https://flex.flinders.edu.au/file/37389698-ee43-4f93-8d97-66af0b5c0d69/1/Assessment%20of%20transportation%20network%20performance%20using%20SCATS%20and%20Microsimulation%20techniques%281%29.pdf

Phang, S. Y., ve Toh, R. S. (2004). Road congestion pricing in Singapore: 1975 to 2003. Transportation Journal, 16–25.

Qureshi, K. N., ve Abdullah, A. H. (2013). A survey on intelligent transportation systems. Middle-East Journal of Scientific Research, 15(5), 629–642.

Reyes-Sanchez, A., Sharifi-Asl, S., ve Liu, Y. (2024). Case study VI: Sustainable transportation in Latin America—Bus Rapid Transit systems in Curitiba and TransMilenio in Bogotá. In Green Cities and Transportation. https://uta.pressbooks.pub/oertgreentransport/chapter/chapter-8-sustainable-transportation-in-latin-america-bus-rapid-transit-systems-in-curitiba-brazil-and-transmilenio-in-bogota-colombia/

Rodriguez, C., ve Garcia, M. (2023). Real-time route optimization for freight delivery: Environmental benefits and challenges. Transportation Research Part E, 169, 102736. https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102736

Rodriguez, M., ve Smith, J. (2019). Green wave synchronization and fuel consumption optimization in smart cities. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(8), 2987–2996. https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2871821

Santos, G., Behrendt, H., ve Teytelboym, A. (2020). Part II: Policy instruments for sustainable road transport. Research in Transportation Economics, 28(1), 46–91. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100810

Shaheen, S., ve Cohen, A. (2021). Shared mobility policy briefs: Definitions, impacts, and recommendations. Transport Policy, 119, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.03.002

Singh, S., ve Gupta, P. (2015). Comparative study ID3, CART and C4.5 decision tree algorithm: A survey. International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST), 27(27), 97–103.

Smit, R., ve Boulter, P. (2013). The effects of intelligent transport systems on CO_2 emissions – an Australian perspective. Proceedings of the CASANZ Conference, Sydney. https://www.academia.edu/download/41283839

Stern, R., ve Hoekstra, M. (2023). Unintended consequences of autonomous vehicles on travel behavior and environmental impacts. Environmental Science ve Technology, 57(2), 853–861. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06190

Taylor, S., ve White, M. (2020). Traffic flow optimization and acoustic environment improvement in metropolitan areas. Journal of Urban Technology, 27(4), 65–84. https://doi.org/10.1080/10630732.2020.1786337

Tektaş, M., Korkmaz, K., ve Erdal, H. (2016). Akıllı ulaşım sistemlerinin geleceği: Ekonomik ve çevresel faydaları. Balkan Journal of Social Sciences.

Tektaş, M., & Tektaş, N. (2019). Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) uygulamalarının sektörlere göre dağılımı. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 2(1), 32-41.

Tektaş, N., Tektaş, M., ve Yıldırım, B. (2024). Akıllı ulaşım sistemleri dünya pazarının incelenmesi. Yapay zekâ ve akıllı ulaşım sistemleri (ss. 9–30). Aktif Yayıncılık.

Thompson, R., ve Martinez, D. (2022). Air quality benefits of intelligent transportation systems: A multi-city comparative study. Atmospheric Environment, 278, 119089. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119089

United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. United Nations General Assembly. https://sdgs.un.org/2030agenda

Ünal, S., Tektaş, N. ve Tektaş, M. (2025). Bandırma Kentsel Karayolu Ulaşımıyla İlgili Emisyonlar ve Yeşil Altyapı. Anadolu Çevre ve Hayvan Bilimleri Dergisi, 10(4), 381-391. https://doi.org/10.35229/jaes.1637057

Varol, Ç. (2017). Sürdürülebilir gelişmede akıllı kent yaklaşımı: Ankara'daki belediyelerin uygulamaları. Çağdaş Yerel Yönetimler, 26(1), 43–58.

Wilson, C., Evans, H., ve Turner, K. (2022). Smart parking management and sustainable urban land use: Policy implications for city planners. Journal of Urban Planning and Development, 148(2), 04021065. https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000789

Zhang, M., ve Liu, Y. (2023). Urban transport carbon emissions in developing countries: Challenges and mitigation strategies. Environmental Science ve Policy, 137, 13–22. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.004

Zhang, Q., Liu, W., ve Chen, Y. (2021). Intelligent parking guidance systems and carbon footprint reduction: A comprehensive evaluation framework. Journal of Cleaner Production, 289, 125687. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125687

URL 1: https://www.shutterstock.com/tr/search/singapore-traffic-management-system?image_type=photo

URL 2: https://www.akillisehir.com/idet/4/30/barselona

URL 3: https://www.zuiyanhong.com/2011/04/south-korea-seoul-t-money-smart-card.html

URL 4: https://www.transport.nsw.gov.au/system/files/media/documents/2022/SCATS-Core-brochure-Final-web-spreads_0.pdf

URL 5: https://brt.cl/celebrating-18-years-of-transmilenio-growing-pains-and-what-lies-ahead-for-bogotas-brt/

URL 6: https://www.istanbulkart.istanbul/OurCards
URL 7: https://www.konya.bel.tr/haber/konya-buyuksehirin-yapay-zeka-destekli-bisiklet-sayaclari-devrede

Beyin Tümörü Görüntülerinin Derin Öğrenme Temelli Transfer Öğrenme Modelleriyle Sınıflandırılması

Halil İbrahim KİRAZ[1]
Selim SÜRÜCÜ[2]
Esra GÜNEY[3]

-

1- Öğrenci; Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. halilibrahimm.kiraz@gmail.com ORCID No: 0009-0007-0800-6940
2- Arş. Gör. Dr.; Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü selimsurucu@karatekin.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8754-3846
3- Öğr. Gör. Dr.: Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Rektörlük halilibrahimm.kiraz@gmail.com ORCID No: 0000-0001-5078-9722

ÖZET

Bu çalışma, Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRI) yöntemiyle elde edilen beyin tümörü görüntülerinin transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılarak otomatik sınıflandırılmasını amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemlerle yapılan manuel teşhislerin zaman alıcı ve hataya açık olması, yapay zekâ destekli sistemlerin önemini artırmaktadır. Bu amaçla, dört farklı sınıfa (glioma, meningioma, pituitary ve tümör olmayan) ayrılmış bir veri seti üzerinde ResNet50, VGG16, DenseNet121 ve Vision Transformer (ViT) modelleri eğitilerek performansları karşılaştırılmıştır. Modellerin performansı, doğruluk, F1 skoru ve Eğri Altındaki Alan (AUC) gibi standart metriklerle değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, ViT modelinin %95.7'lik doğruluk oranıyla diğer konvolüsyonel sinir ağı (CNN) tabanlı modellere kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini göstermiştir. Bu çalışma, otomatik teşhis sistemlerinin geliştirilmesinde transfer öğrenme yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymakta ve klinik karar destek sistemleri için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Tümör Sınıflandırma, MRI Sınıflandırma, Derin Öğrenme, Sağlıkta Yapay Zeka, Beyin Tümörü.

GİRİŞ

Beyin tümörleri, dünya genelinde ciddi morbidite (hasta olma durumu) ve mortaliteye (ölüm) neden olan önemli sağlık sorunlarıdır. Özellikle glioma ve meningioma gibi zararlı tümörlerin erken ve doğru teşhisi, tedavi sürecinin başarısı ve hasta sağkalımı açısından hayati öneme sahiptir. Günümüzde beyin tümörü teşhisinde altın standart yöntemlerden biri olan MRI, uzman radyologlar tarafından detaylı bir inceleme gerektirir. Ancak, bu süreç hem uzmanlık gerektirmesi hem de yoğun iş yükü nedeniyle hata riskini arttırabilmektedir. Son yıllarda derin öğrenme (DL) algoritmalarının tıbbi görüntü analizinde gösterdiği olağanüstü başarılar, bu alandaki geleneksel yaklaşımların sınırlılıklarını aşmada önemli bir potansiyel sunmaktadır (Mohanned vd., 2021; Yamanakkanavar vd., 2020;Aamir vd.,2022) Bu çalışmada, önceden büyük ölçekli veri setleri (örneğin ImageNet) üzerinde eğitilmiş derin öğrenme modellerinin, yeni bir göreve (beyin tümörü sınıflandırması) uyarlanmasını sağlayan bir makine öğrenmesi tekniği olan transfer öğrenme yaklaşımı benimsenmiştir. Transfer öğrenme, sınırlı tıbbi görüntü verisiyle dahi yüksek doğruluk elde etmeye olanak tanır.

Bu çalışmanın temel amacı, farklı mimarilere sahip dört popüler transfer öğrenme modelinin (ResNet50, VGG16, DenseNet121 ve ViT) beyin tümörü sınıflandırma görevindeki performanslarını karşılaştırmalı olarak analiz etmektir. Çalışma kapsamında, her modelin sınıflandırma doğruluğu, F1 skoru ve genelleme yeteneği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle

son dönemde görüntü sınıflandırmada çığır açan Transformer mimarisinin bu problemdeki başarısı detaylı olarak incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Veri Seti

Çalışmada, MRI beyin görüntülerinden oluşan açık kaynak bir veri seti kullanılmıştır (Bhuvanesh, 2020). Bu veri seti, dört ana kategoriye ayrılmıştır: glioma_tumor, meningioma_tumor, pituitary_tumor ve no_tumor.

Görseller farklı çözünürlüklerde ve .jpg formatındadır. Veri setinin, eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç farklı alt kümeye ayrılması, modellerin genelleme yeteneğinin objektif bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

Transfer Öğrenme Modelleri

Çalışmada kullanılan modellerin her biri, kendine özgü mimari avantajlara sahiptir:

- ResNet50: Artık bağlantılar (residual connections) kullanarak derin ağlarda ortaya çıkan degrade olan gradyan problemini çözen bir mimaridir (He vd., 2015). Medikal görüntüleme alanındaki karmaşık sınıflandırma problemlerinde sıklıkla yüksek başarı göstermiştir.
- VGG16: 3x3 boyutunda küçük konvolüsyonel filtreler kullanarak derin bir yapı oluşturan, mimarisi sadeliğiyle bilinen bir modeldir (Simonyan vd.,2015). Bu basit yapısı, transfer öğrenme uygulamaları için uygun bir temel sağlar.
- DenseNet121: Yoğun bağlantılı (densely connected) bloklar içeren bir mimaridir, bu sayede her katman kendisinden önceki tüm katmanlardan girdi alır (Huang vd.,2018). Bu yapı, parametre verimliliğini artırır ve gradyanın daha etkili yayılmasını sağlar.
- Vision Transformer (ViT): Görüntüleri küçük parçalara (patches) ayırarak Transformer mimarisinin doğal dil işleme (NLP) alanındaki başarısını görüntü sınıflandırmaya uyarlayan yenilikçi bir modeldir (Huo vd.,2023). ViT, özellikle büyük

veri setleriyle eğitildiğinde CNN tabanlı modellere rakip performans sergiler.

Eğitim Parametreleri

Tüm modeller için standartlaştırılmış bir eğitim süreci uygulanmıştır. Ortak hiperparametreler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Modellerin eğitim parametreleri

Hiperparametre	Değer
Learning Rate	0.001 (ReduceLROnPlateau)
Optimizer	Adam
Batch Size	32
Epoch	20 (EarlyStopping aktif)
Loss Function	CrossEntropyLoss
Scheduler	ReduceLROnPlateau (patience=5)
Early Stopping	Patience = 7
Input Size	224x224

Eğitim sürecinde aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır:

- Veri Artırma: Görüntüleri yatay çevirme, döndürme, yakınlaştırma gibi yöntemlerle modelin genelleme kabiliyeti artırılmıştır.
- Early Stopping: Model doğrulama kaybı artmaya başladığında eğitimi erken durdurmak için kullanılmıştır.
- Learning Rate Scheduler: Öğrenme oranı, eğitim süreci boyunca adaptif olarak güncellenmiştir.
- Confusion Matrix ve Sınıflandırma Raporları: Her modelin başarı oranı ve sınıflar arası karışıklık detaylı olarak analiz edilmiştir.

Değerlendirme Metrikleri

Bu çalışma kapsamında, modellerin başarısı 3 farklı başarı ölçütüne göre değerlendirilmiştir. Bu metrikler;

- Doğruluk, bir sınıflandırma modelinin tüm tahminleri arasında doğru olanların oranını gösteren en temel ve en çok tercih edilen metriktir (Hossin & Sulaiman, 2015). Denklem 1'de doğruluk metriğinin matematiksel formülü verilmiştir.

$$Doğruluk = \sqrt{\frac{Doğru\ Pozitif\ (TP)+Doğru\ Negatif\ (TN)}{Doğru\ Pozitif\ (TP)+Doğru\ Negatif\ (TN)+Yanlış\ Pozitif (FP)+Yanlış\ Negatif\ (FN)}} \quad (1)$$

- F1 Skoru, bir modelin kesinlik ve duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasıdır (Yacouby & Axman, 2020). Kesinlik; Pozitif olarak tahmin edilen örneklerden gerçekten pozitif

olanların oranıdır. Duyarlılık ise, gerçek pozitif örneklerden modelin doğru bir şekilde pozitif olarak tahmin edebildiğini örneklerin oranıdır. Denklem 2'de bu metriğin matematiksel denklemi verilmiştir.

$$F1\ Skoru = 2 * \frac{Kesinlik * Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık} \quad (2)$$

- Eğri Altındaki Alan (AUC): ROC eğrisinin altında kalan toplam alandır. ROC eğrisi ise, bir sınıflandırma modelinin çeşitli eşik değerlerinde duyarlılık ve yanlış pozitif oranı arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafiktir (Hossin & Sulaiman, 2015). AUC değeri 0 ile 1 arasında değişir: 1'e yakın bir AUC değeri, modelin mükemmel bir şekilde ayrım yapabildiğini gösterirken, 0.5'lik bir değer rastgele tahmine eşittir.

SONUÇ

Eğitim ve test süreçlerinin tamamlanmasının ardından, modellerin elde edilen performansları Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

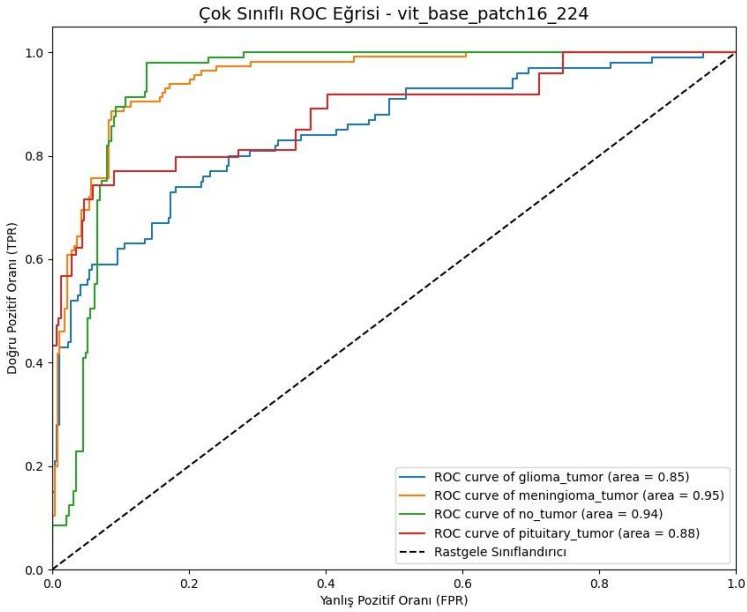
Tablo 2: Model performanslarının karşılaştırılması

Model	Doğruluk (%)	F1 Skoru	Epoch Sayısı
ResNet50	94.3	0.935	13
VGG16	91.8	0.913	8
DenseNet121	94.5	0.928	7
ViT-B/16	95.7	0.947	10

Tablo 2 incelendiğinde, tüm modellerin beyin tümörü sınıflandırmasında yüksek doğruluk oranları elde ettiği görülmektedir. En düşük performansı gösteren VGG16 modeli bile %91.8'lik bir doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu durum, transfer öğrenme yaklaşımının bu tür tıbbi görüntüleme görevleri için ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

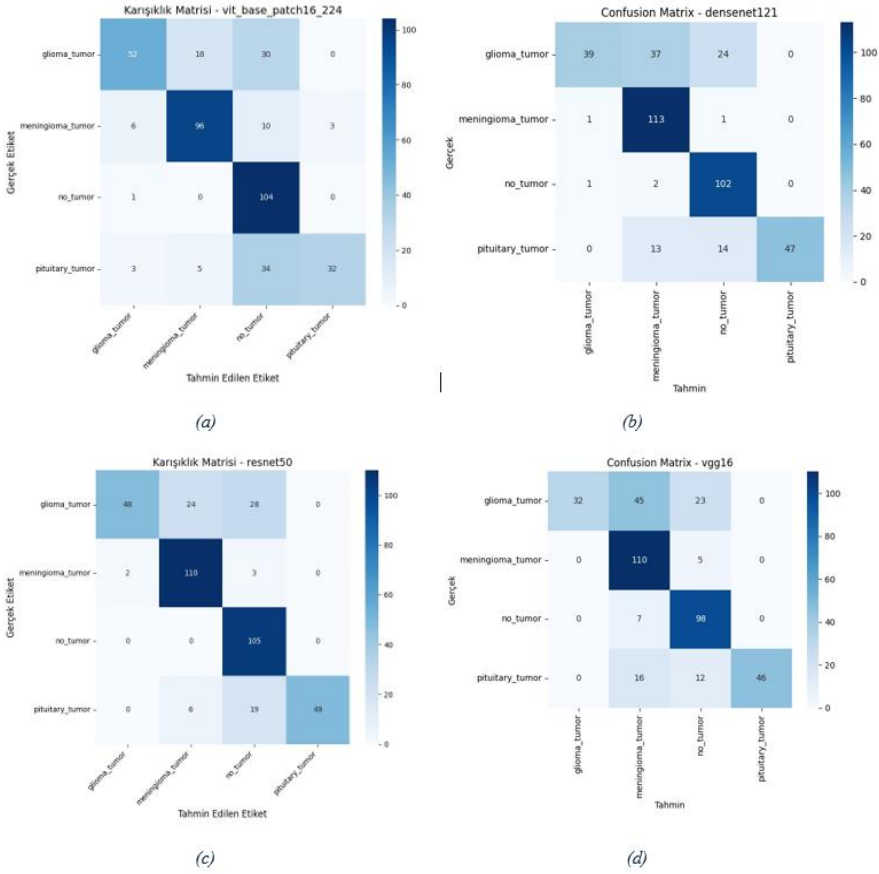
Tablo 2'ye göre, en başarılı model olarak %95.7'lik doğruluk ve 0.947'lik F1 skoru ile ViT-B/16 olmuştur. Bu sonuç, özellikle büyük veri setleriyle eğitildiğinde ViT'nin CNN tabanlı modellere göre üstün bir performans gösterdiği bulgusunu destekler niteliktedir. ViT modeline ait ROC eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'e göre model, özellikle meningioma

ve tümör olmayan sınıfları ayırt etmede son derece başarılı olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, glioma tümörü için daha düşük bir performans gösterse de, elde edilen 0.85'lik AUC değeri yine de güçlü bir sınıflandırıcı olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 1. ViT-B/16 modeline ait ROC eğrisi

Dört farklı derin öğrenme modelinin (ViT, DenseNet, ResNet50, VGG16) test veri setine ait performansını gösteren karışıklık matrisleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, tüm modellerin no_tumor sınıfını diğer sınıflara kıyasla daha yüksek bir başarı oranıyla sınıflandırma eğiliminde olduğu görülmektedir. Şekil 2'ye göre ViT modeli en başarılı model olduğu ve özellikle meningioma_tumor sınıfında 96 doğru tahminde bulunarak en iyi sınıflandırma başarısına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Modellerin sonuçlarına ait karmaşıklık matrisleri: (a) Vit-B/16 modeline ait karmaşıklık matrisi, (b) DenseNet210 modeline ait karmaşıklık matrisi (c) ResNet50 modeline ait karmaşıklık matrisi (d) VGG-16 modeline ait karmaşıklık matrisi

REFERANSLAR

Aamir, M., Rahman, Z., Dayo, Z. A., Abro, W. A., Uddin, M. I., Khan, I., ... Hu, Z. (2022). A deep learning approach for brain tumor classification using MRI images. Computers and Electrical Engineering, 101, 108105.

Bhuvanesh, S. (2020). Brain Tumor Classification (MRI). Kaggle. https://www.kaggle.com/datasets/sartajbhuvaji/brain-tumor-classification-mri

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep Residual Learning for Image Recognition. arXiv. https://arxiv.org/abs/1512.03385

Hossin, M., & Sulaiman, M. N. (2015). A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process, 5(2), 1–11. https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201

Huang, G., Liu, Z., van der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2018). Densely Connected Convolutional Networks. arXiv. https://arxiv.org/abs/1608.06993

Huo, Y., Jin, K., Cai, J., Xiong, H., & Pang, J. (2023). Vision Transformer (ViT)-based Applications in Image Classification. In 2023 IEEE 9th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS) (pp. 135–140). IEEE. https://doi.org/10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS58521.2023.00033

Mohanned, H. H., Sürücü, S., & Choupani, R. (2021). Lung Inflammatory Classification of Diseases using X-ray Images. In 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK) (pp. 548–553). IEEE. https://doi.org/10.1109/UBMK52708.2021.9558905

Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. arXiv. https://arxiv.org/abs/1409.1556

Yacouby, R., & Axman, D. (2020). Probabilistic Extension of Precision, Recall, and F1 Score for More Thorough Evaluation of Classification Models. In S. Eger, Y. Gao, M. Peyrard, W. Zhao, & E. Hovy (Eds.), Proceedings of the First Workshop on Evaluation and Comparison of NLP Systems (pp. 79–91). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2020.eval4nlp-1.9

Yamanakkanavar, N., Choi, J. Y., & Lee, B. (2020). MRI Segmentation and Classification of Human Brain Using Deep Learning for Diagnosis of Alzheimer's Disease: A Survey. Sensors, 20(11), 3243. https://doi.org/10.3390/s20113243

Atıksu Arıtma Tesisinde Mikroplastikler, Giderimleri ve Ekosistem Üzerindeki Etkileri

Senar AYDIN[1]
Mehmet Emin AYDIN[2]

1- Prof. Dr..; Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü. senarozcan@gmail.com ORCID No: 0000-0002-0960-480X
2- Prof. Dr.; Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. aydinme@gmail.com ORCID No: 0000-0001-6665-198X

ÖZET

Plastik üretimi 20. yüzyılın ortalarından bu yana katlanarak artmıştır. Mikroplastikler (MP'ler; <5 mm) daha büyük plastik artıkların parçalanması ve birincil mikroplastiklerin (örneğin mikroboncuklar, fiberler gibi) doğrudan salınımı ile oluşan yaygın kirleticilerdir. Mikroplastikler katkı maddeleri (plastikleştiriciler, alev geciktiriciler gibi) ve adsorplanmış kirleticileri (kalıcı organik kirleticiler, metaller gibi) taşırlar ve bu da ilişkili kimyasallar için taşıyıcı görevi görmeleri konusunda endişelere yol açar. Mikroplastikler çevresel ortamlarda (okyanuslar, nehirler, topraklar, atmosfer ve biyota), gıdalarda ve hatta insan dokularında tespit edilmişlerdir. Mikroplastiklerin su organizmalarında beslenmede azalma, davranış değişikliği, oksidatif stres, enerji metabolizması bozuklukları ve üreme bozukluğu gibi etkilere neden olduğu rapor edilmiştir. Mikroplastikler ayrıca adsorbe edilmiş hidrofobik organik kirleticiler ve metaller ile etkileşime girerek biyoyararlanımı ve toksisiteyi potansiyel olarak değiştirmektedir. Mikroplastikler atıksu arıtma tesislerine evsel atıksu, endüstriyel deşarjlar, yağmursuyu ve birleşik kanalizasyon akışları, atmosferik çöküntüler ve katı atıklar vasıtası ile ulaşabilirler. Atıksu arıtma tesisleri atıksuya karışan mikroplastikler için giderim işlevi görürken aynı zamanda alıcı ortama mikroplastiklerin taşınmasını sağlarlar. Yapılan çalışmalarda atıksu arıtma tesisi giriş atıksuyunda mikroplastik konsantrasyonlarının metodoloji ve bölgesel faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. Konvansiyonel atıksu arıtma tesisleri genellikle birincil arıtma (ızgara, kum tutucu, ön çöktürme), ikincil arıtma (biyolojik arıtım ve son çöktürme) ve ileri arıtım (filtrasyon, membran prosesler, dezenfeksiyon) arıtma işlemlerini içerirler. İkincil atıksu arıtma tesislerinde genellikle sayıca yaklaşık %80-90 giderim verimi rapor edilirken, ileri arıtım içeren arıtma tesislerinde yaklaşık %90-99 giderim sağlandığı rapor edilmektedir. Ancak atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda bulunan mikroplastikler alıcı ortama deşarj edilmektedir. Bu çalışma atıksu arıtma tesislerinin hem çevresel mikroplastik kirliliğine karşı bir engel hem de bir kaynak olarak rolüne odaklanarak, oluşum ve giderim konusunda nicel veriler sunmakta, atıksu arıtma tesisinde mikroplastiklerin akıbeti, ekolojik ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler –Atıksu, Arıtma, Arıtma Tesisleri, Çevresel Etkiler, Mikroplastik..

GİRİŞ

Plastikler, dayanıklılık, düşük maliyet, hafiflik, esneklik, tepkimeye girmeme, düşük ısı ve elektrik iletkenliği ve korozyon direnci gibi çok yönlü özellikleri sayesinde günlük yaşamda her alanda kullanılmaktadır. Günlük aktivitelerimizin yanı sıra plastikler, endüstriyel, tarımsal, tıbbi, ulaşım ve

inşaat gibi çeşitli uygulamalarda da önem kazanmıştır (Conley vd., 2019). Bu özelliklerinden dolayı plastik kullanımı artarak devam etmektedir. Plastik üretimdeki artış ve plastik atıkların uygun olmayan bertaraf yöntemleri sonucunda plastikler çevresel ortamlara yayılmaktadır. Üretilen toplam plastik atıkların yalnızca %9'u geri dönüştürülmekte, %12'si yakılmakta ve plastik çöplerin %79'u çöplüklere ve okyanuslara atılarak birden fazla çevresel matriste birikmektedir (Costa vd., 2020).

1907 yılında ilk sentetik plastik polimerin ortaya çıkışıyla başlayan plastik üretimi 1950 yılında 1.5 milyon ton iken yıllar içerisinde sürekli artış eğilimi göstermiştir. Plastikler temel olarak termoplastikler ve termoset plastikler olarak sınıflandırılır. Termoplastikler arasında polivinilklorür (PVC), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polipropilen (PP), poliamid (naylon) ve akrilik bulunurken, termoset plastikler arasında bakalit, polyesterler, poliüretan ve epoksi reçineleri bulunur (Wu vd., 2014). Plastik malzemelerin bozunması biyotik ve abiyotik olabilir. Biyotik bozunma altında biyolojik olarak parçalanabilir plastik malzemeler, bakteri, mantar, biyofilmler ve böcekler gibi farklı mikroorganizma türleri ve kombinasyonları aracılığıyla daha küçük parçalara ayrılır (Yuan ve ark., 2020). Abiotik bozunma durumunda ise, daha büyük plastik malzemeler termal, foto-oksidatif ve mekanik kuvvetler gibi çeşitli etkilerle daha küçük parçacıklara ayrılır (Kong ve ark., 2020).

Mikroplastikler boyutları 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Mikroplastik kavramı ilk olarak 2004 yılında deniz ortamındaki çapı 5 mm'den küçük plastik parçacıkları tanımlamak için önerilmiştir (Thompson, 2004). 100 nm'den küçük parçacıklar nanoplastik olarak sınıflandırılır. Mikroplastikler birincil ve ikincil mikroplastikler olarak kategorize edilirler. Birincil mikroplastikler ticari uygulanabilirlikleri nedeniyle bilinçli şekilde orijinal olarak 5 mm'den daha küçük boyutlarda üretilirken, ikincil mikroplastikler 100 nm'ye kadar değişir. Birincil mikroplastiklerin çeşitli kullanım alanları kozmetik, kişisel bakım ürünleri, deterjanlar, tıbbi teşhis, ilaçlar, mürekkepler, boyalar, beton, polimer, çimento, kaplamalar, kağıt yapımı, atıksu arıtımı, kanalizasyon çamurunun susuzlaştırılması, parlatma maddeleri, katkı maddeleri, tarım ve bahçecilik ve kumlama bilyeleri sayılabilir (Fan vd., 2021). Plastik endüstrisi ayrıca daha büyük plastikler üretmek için daha küçük boyutlu renkli plastik peletler de üretmektedir. Giyim üretimi için küçük boyutlu sentetik elyaf üretimi de birincil mikroplastikler kapsamına girer. Bu peletler üretim, taşıma ve kullanım sırasında çevreye salınırlar (Andrady, 2017). İkincil mikroplastikler plastik poşetler, şişeler, giysiler, borular, ambalaj kapakları, ipler, ağlar, lastikler gibi daha büyük boyutlu plastik malzemelerin bozunma yoluyla daha küçük boyutlu plastik parçacıklara dönüşen parçacıklardır (Reisser vd., 2013). İkincil mikroplastikler ayrıca çamaşır makinelerinde sentetik tekstillerin yıkanması sırasında salınan sentetik lifleri de içerir. Okyanustaki

mikroplastiklerin yaklaşık %35'i çamaşır makinelerinden salınan mikrofiberlerden kaynaklanmaktadır (Prata, 2018). Son araştırmalar klozete atılabilen ıslak mendillerde ve hijyenik pedlerde dokunmamış PP, PE veya HDPE liflerinin bulunduğunu da bildirmiştir (Briain vd., 2020).

Mikroplastiklerin kaynakları kara veya deniz kaynaklı olabilir. Karasal ortamlar okyanuslara göre plastik kontaminasyonuna daha yatkındır. Bunun nedeni tahmini toplam girdi katkısının %80'den fazlasının kötü yönetilen atıklar, çöp sahaları, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurun tarımsal uygulamaları, toz emisyonları, atmosferik birikim ve lastikten kaynaklanan salımlar gibi kaynaklardan gelmesidir. %20'den azı ise deniz yoluyla, yasadışı atık dökümü, nakliye, limanlar, balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği gibi yollarla meydana gelmektedir (Miranda vd., 2020). En yaygın kullanılan ve çevrede en fazla bulunan polimerler polietilen (PE), polipropilen, polyester, PVC ve naylondur. Dayanıklılık ve parçalanmama gibi özelliklerle zenginleştirilen plastik atıkların kötü yönetimi, plastiğin çevrede daha uzun süreler, hatta yüzlerce yıl kalmasına neden olmaktadır. Örneğin PET 450 yıllık bir ömre sahipken, LDPE, HDPE, PS, PP ve PVC gibi yaygın olarak kullanılan diğer plastik polimerlerin ömürleri sırasıyla 10-600, >600, 50-80, 10-600 ve 50-150 yıldır (Mohanan vd., 2020). Kalıcılıkları, toksisiteleri ve uzun menzilli taşınma kabiliyetleri nedeniyle bilim insanları, plastiklerin kalıcı, biyoakümülatif ve toksik (PBT) kirleticiler olarak sınıflandırılmasını talep ettiler (Alava vd., 2023). Özellikle su kaynaklarında ve sedimentte biriken plastikler kirliliğe neden olmakta ve su ekosistemi için önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

Su kirliliği kontrol tesisleri veya su geri kazanım tesisleri olarak da adlandırılan atıksu arıtma tesislerinin atıksu deşarjları yoluyla çevresel mikroplastiklere önemli katkıda bulunmaktadır. Mikroplastikler su ortamlarına girdiğinde salınabilen toksik katkı maddeleri, bisfenol A (BPA), antioksidanlar, stabilizatörler, alev geciktiriciler, pigmentler, dolgu maddeleri ve fitalat esterler (plastikleştiriciler) dahil olmak üzere üretimleri sırasında kullanılan pek çok kimyasalı içermektedir (Hahladakis vd., 2018). Ek olarak mikroplastikler lipofilik yüzeyleri nedeniyle farmasötikler ve kalıcı organik kirleticiler (poliklorlu bifeniller (PCB'ler), poliaromatik hidrokarbonlar (PAHs), pestisitler) gibi hidrofobik toksik bileşikleri adsorbe ederler. Metaller bazı plastik ürünlerde katkı maddesi olarak kullanılır ve su ortamına karışabilir. Bununla birlikte metaller ayrıca su ortamlarında mikroplastikler tarafından adsorplanır (Dobaradaran vd., 2018). Mikroplastikler bakteri ve virüslerin kolonize olması ve büyümesi için bir yer sağlayarak yüzeyinde uzun mesafelere taşınabilen biyofilmler oluşturabilir (Zettler vd., 2013).

Çeşitli sucul organizmalar su ortamındaki mikroplastikleri yutabilir ve bu da farklı toksikolojik etkilere neden olur. Bu durum aynı zamanda biyolojik birikime yol açar ve ekosisteme zarar verir. Mikroplastiklerden kaynaklanan toksik bileşiklerin suda yaşayan organizmalarda ve nihayetinde

insanlarda birikebileceği endişesi vardır (Liebmann vd., 2018). 2012 yılında ilk olarak mikroplastiklerin toprak ortamına zarar verebileceği öne sürülmüştür (Rillig vd., 2012). Nizzetto vd. (2016a) mikroplastiklerin toprağa yıllık salımı okyanuslara salımdan 4 ila 23 kat daha fazla olduğunu rapor etmiştir. COVID-19 salgını da küresel plastik üretiminde %5-10'luk bir artışa yol açmıştır. Salgında sona yaklaşılsa da mikroplastiklerin çevresel ortamlardaki uzun vadeli etkisi devam etmektedir (Zhao ve Zhang, 2023). Son yıllarda mikroplastiklerden kaynaklanan iklim değişikliği ve çevre kirliliği küresel çapta ilgi odağı haline gelmiştir. Sera gazı kaynakları arasında okyanuslar ve karasal ortamdaki topraklar en büyük karbon deposudur. Mikroplastiklerin fitoplankton, zooplankton ve alglerle etkileşimi, deniz karbon döngüsünü bozar ve karbon fiksasyonunu etkileyerek iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya katkıda bulunur (Shen vd., 2020). Toprağın antropojenik mikroplastik kirliliği nedeniyle bozulması toprakta depolanan karbonun sera gazı olarak atmosfere yayılmasına ve iklim değişikliğine doğrudan katkıda bulunmasına neden olabilmektedir. PE, PS, PP, PVC, LDPE, polylactic acid (PAA) polimerlerini içeren mikroplastiklerin topraktan atmosfere CO_2, CH_4 ve N_2O sera gazlarının emisyonunu artırdığı çalışmalarda tespit edilmiştir (Chia vd., 2023). Bu mikroplastikler besin zinciri yoluyla hayvanların ve insanların içine girerek erken doğum, cinsiyet oranı değişikliği, üreme sistemi bozuklukları ve düşük vücut ağırlığı gibi sağlık sorunlarına yol açar (Park vd., 2020). Toprak ortamında mikroplastikler toprak biyotasına (solucanlar, toprak kuyruklu böcekleri ve toprak nematodu) girebilir ve vücut ağırlığında ve büyüme hızında azalma ve ölüm oranında artış gibi olumsuz sağlık sorunlarına yol açabilir (Huerta Lwanga vd., 2016). Topraktaki mikroplastikler ayrıca toprak yapısını ve özelliklerini, bitki performansını ve mikrobiyal aktiviteleri de etkileyebilir (Xu ve ark., 2020). Ayrıca mikroplastikler çeşitli toksinlerin sudan toprağa taşınmasına yardımcı olur. Bu nedenlerle atıksu arıtma tesislerindeki mikroplastik kirliliği sorunu da giderek artan bir endişe kaynağıdır.

Bu çalışma atıksu arıtma tesislerinin hem çevresel mikroplastik kirliliğine karşı bir engel hem de bir kaynak olarak rolüne odaklanarak, oluşum ve giderim konusunda nicel veriler sunmakta, atıksu arıtma tesisinde mikroplastiklerin akıbeti ekolojik ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir.

ATIKSU ARITMA TEKNOLOJİLERİ

Küresel nüfus artışı ve endüstriyel gelişmeler nedeniyle su kaynaklarının sürdürülebilirliği önemli tehditlerle karşı karşıya kalmaktadır. Birleşmiş Milletler Dünya Su Kalkınma Raporuna göre (2017) 2030 yılına kadar evsel atıksu üretiminin yıllık 555 milyon metreküpe ulaşması öngörülmektedir, ancak şu anda atıksuyun yalnızca %42'si arıtılmakta ve/veya yeniden kullanılmaktadır. Atıksu arıtma teknolojileri genel olarak birincil, ikincil ve üçüncül arıtma olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerdeki arıtma tesisleri genellikle basit, düşük maliyetli ve atıksudan büyük katıları ve askıda partikülleri uzaklaştırmada etkili olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun nedeni gelişmekte olan ülkelerin genellikle yüksek düzeyde atıksu kalitesi elde etmek yerine daha fazla kişiye temel atıksu arıtma hizmetleri sunmaya odaklanmasıdır. Yaygın olarak kullanılan birincil arıtma teknikleri ızgara, kum tutucu ve çöktürme proseslerini içermektedir. Izgaralar atıksu içerisindeki büyük katı maddelerin giderimini sağlayarak hem arıtım hem de arıtma süreçlerinde boru, pompa ve mekanik aksamda hasar ve tıkanmalara karşı tesisin de korunmasını sağlar. Kum tutucu atıksu arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılır ve genellikle ızgara ünitesinden sonra uygulanır. Kum tutucu inorganik katıları uzaklaştırarak arıtım ve ekipman hasarını önlemeye yardımcı olur. Ön çöktürme kendi ağırlığı ile çökelebilen katı parçacıkların çökelmesini kolaylaştırmak için atıksuyun bir tank veya havuzda çökelmesini içerir. İkincil atıksu arıtımı sudaki çözünmüş organik maddeleri, besin maddelerini ve patojenleri gidermek için genellikle biyolojik işlemlere dayanır. Yaygın teknikler arasında aktif çamur, anaerobik-anoksik-oksik ve ardışık kesikli reaktörler bulunur. Atıksudaki organik maddeleri parçalamak için aerobik mikroorganizmalar kullanan klasik aktif çamur atıksu arıtma tesislerinde en yaygın kullanılan teknolojidir. Ardışık kesikli reaktör tekniği, ardışık arıtma aşamaları (doldurma, reaksiyona sokma, çökeltme, boşaltma ve bekleme) için tek bir tank aracılığıyla esneklik sağlama kabiliyeti nedeniyle gelişmekte olan ülkelerde de yaygın olarak uygulanmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerdeki ikincil arıtma,gelişmiş ülkelerdekiyle aynı düzeyde atıksu kalitesine ulaşamasa da atıksuyun çevresel etkisini azaltmak ve su kaynaklı hastalıkların bulaşmasını en aza indirerek halk sağlığını iyileştirmek üzere tasarlanmıştır. Evsel atıksuların üçüncül arıtımı kullanılan teknolojilerle ilişkili daha yüksek maliyetler nedeniyle birincil ve ikincil arıtımdan daha az yaygındır. Üçüncül arıtımda kullanılan iki ana teknik dezenfeksiyon ve filtrasyondur. Dezenfeksiyon olarak klorlama veya UV kullanımı halk sağlığı açısından suyun yeniden kullanımı veya çevresel olarak güvenli deşarj uyumluluğu için atıksudaki patojenleri ortadan kaldırır. Gelişmekte olan ülkelerdeki sınırlı kaynaklar üçüncül arıtımın büyük ölçekte uygulanmasını genellikle zorlaştırmaktadır (Awad vd., 2019; Ta ve Promchan, 2024).

Geleneksel atıksu arıtma metodolojileri, atıksuyun karmaşık yapısı ve farmasötikler, mikroplastikler ve nanomalzemeler gibi yeni ortaya çıkan kirleticiler nedeniyle giderek yetersiz kalmaktadır. İklim değişikliği, mevsimsel değişimler, endüstriyel deşarj ve kanalizasyon içi fizyo-biyokimyasal süreçlerden etkilenen atıksu özelliklerinin değişkenliği arıtma verimliliğini etkilemektedir (Gao vd., 2023). Atıksu hem geleneksel hem de gelişmiş arıtma prosesleri kullanılarak mikroplastikler arıtıldıktan sonra bile, atıksularda önemli miktarda mikroplastik bulunur. Atıksularda kalan mikroplastik konsantrasyonları, atıksu arıtma tesislerinin giriş suyundan önemli ölçüde daha az olsa da yine de çevreye önemli miktarda mikroplastik taşımaktadır. Çamaşır makinelerinden çıkan sentetik lifler, atıksu arıtma tesislerinden geçtikten sonra bile su kütlelerine ulaşabilir (Napper ve Thompson, 2016). Atıksu arıtma tesislerinde atıksuyun karıştırılması veya pompalanması sırasında oluşan kesme kuvvetleri, mikroplastikleri daha küçük parçacıklara ayırarak sudaki mikroplastiklerin sayısını artırabilir. Ayrıca arıtma sürecindeki sıcaklık değişimleri de mikroplastiklerin parçalanma ve bozunmasına neden olmaktadır (Enfrin vd., 2019). Mikroplastiklerin biyotik ve abiyotik ortamlarda neden olduğu riski azaltmak için mikroplastiklerin potansiyel kaynaklarını ve su ortamına erişim yolları belirlemek ve anlamak çok önemlidir. Mikroplastiklere ek olarak atıksu arıtma tesislerindeki mikroplastiklerin parçalanmasından kaynaklanan nanoplastikler de fizikokimyasal özellikleri nedeniyle ekosistem için potansiyel tehditleri nedeniyle ciddi bir endişe kaynağıdır.

ATIKSU ARITMA TESİSİNDE MİKROPLASTİKLER VE GİDERİMLERİ

Atıksu arıtma tesisleri birçok kaynaktan plastik kirliliği almaktadır. Atıksudaki birincil mikroplastik kaynağı kişisel bakım ve hijyen ürünlerine eklenen mikroboncukların insan faaliyetleri yoluyla doğrudan atıksuya deşarj edilmesidir (Cheung vd., 2017). Ayrıca polyester ve naylon gibi sentetik giysiler, yıkama işlemi sırasında atıksuya birçok partikül salmakta ev ikincil mikroplastik oluşumuna neden olmaktadır (Napper vd., 2016). Atıksu arıtma tesisleri kullanılan arıtma türüne bağlı olarak mikroplastiklerin bir kısmını giderebilmektedir. Ancak atıksu arıtma tesislerinde arıtım süreçleri sırasında giderilemeyen milyonlarca mikroplastik nehir ve okyanuslar gibi alıcı ortamlara deşarj etmektedir. Yapılan araştırmalarda

atıksu arıtma tesisleri genellikle %90'ın üzerinde mikroplastik giderme verimliliğine sahip olduğu görülmektedir. Buna rağmen atıksu arıtma tesisleri kirlenmenin kritik noktası olarak kabul edilmektedir. Özellikle sudan uzaklaştırılan mikroplastiklerin çamurda birikmesi ve stabilize arıtma çamurlarının tarım alanlarında bertarafı sonucu mikroplastikler çevreye yayılmaktadır. Örneğin 650000 kişilik bir nüfusa hizmet veren bir İskoç arıtma tesisinde %98'den yüksek bir mikroplastik giderim verimliliğine sahip olmasına rağmen her gün yaklaşık 65 milyon mikroplastiğin çevreye salındığı bildirilmiştir (Murphy vd., 2016). Amerika Birleşik Devletleri'ndeki atıksu arıtma tesisi çıkış deşarjları yoluyla akuatik ortamlara günde 8 trilyon mikroboncuğun deşarj edildiği rapor edilmiştir (Rochman vd., 2015). Debi ve ölçülen mikroplastik sayımlarını kullanarak üç atıksu arıtma tesisinden deşarj edilen çıkış suyunun mikroplastik yükü günde 500 milyon ile 1 milyar olarak bulunmuştur (Conley vd., 2019). Atıksu arıtma tesislerinden deşarj edilen atıksu debileri göz önüne alındığında atıksu arıtma tesislerinin mikroplastikler için bir vektör olduğu daha net ortaya çıkmaktadır.

Atıksu örnekleme

Atıksuda mikroplastiklerin tespiti ile ilgili standartlaşmış bir analiz yöntemi bulunmamaktadır. Buna bağlı olarak atıksudan örnekleme yöntemi ile ilgili bir standardizasyon yoktur. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmalarda atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik analizi için atıksu örneklemesi yazarlar tarafından farklı şekillerde gerçekleştirilmiştir. Genellikle plastik içermeyen otomatik örnekleme cihazı ile kompozit örnekleme, paslanmaz çelik kovalar veya cam kaplar ile manuel örnekleme, yüzey filtrasyon, ayrı pompalama ve filtrasyon gibi yöntemler kullanılmıştır. Örneklenen atıksu hacimlerine bakıldığında arıtma tesisi giriş suyundan 500-1000 mL alınırken, birincil arıtım, ikincil arıtım, üçüncül arıtım gibi tesis ara noktalarından 1-10 L aralığında, arıtma tesisi çıkış suyundan ise 5-100 L arasında değişen hacimlerde örneklemeler yapılmıştır. Örnekleme yöntemi ve örneklenen atıksu hacimlerinin farklılığı analiz sonuçlarının değişkenliğine neden olabilmektedir. Özellikle daha az hacim atıksu ile gerçekleştirilen çalışmalarda atıksu debisi ve karakterizasyonundaki değişimler gözönüne alındığında tüm atıksuyu temsil eden örnekleme yapılamadığından mikroplastik analiz sonucu temsili olmayabilir. Mikroplastikler suda zamansal ve mekansal olarak eşit olmayan bir dağılım gösterdiğinden otomatik örnekleme yöntemi ile 12-24 saat kompozit numune alınması ve örnekleme hacminin artırılması önemlidir. Zaman içinde kompozit numuneler alma numunenin heterojenliğini azaltmaya ve böylece daha temsili veriler elde etmeye yardımcı olacaktır. Kirleticiler için atıksu arıtma tesisindeki giderim verimi hesaplanırken atıksuyun tesisdeki arıtma proseslerinde kalış sürelerinde dikkate alınması önemlidir. Atıksu arıtma

tesisinde gerçekleştirilen bazı örneklerde havuzların yüzeyinden su örnekleri alınmıştır. Mikroplastiklerin hafif olmaları sebebiyle su yüzeyinde toplanması daha muhtemel olmakla birlikte yalnızca yüzey suyunu dikkate almak mikroplastik miktarlarının doğru tespiti açısından risk içerebilir. Yapılan araştırmalar farklı yoğunluğa sahip mikroplastiklerin atıksuyun farklı derinliklerinde bulunabileceği göstermiştir. Son yıllarda daha yaygın olarak ayrı pompalama ve filtreleme yöntemi kullanılmaktadır. Mikroplastikleri tutan bir filtrasyon cihazına doğru suyun pompalanması ile oluşan yöntemde örnekleme hacmi önemli ölçüde artmaktadır. Yerinde örnekleme ve ayırma işlemi ile daha büyük numune hacmi almayı sağlamakla birlikte ayırma işlemi sürecinde kontaminasyona maruz kalınabilir. Atıksudan mikroplastiklerin ayrılması için süzme işlemi genellikle 20 μm ile 5 mm gözenek çapına sahip elekler ile gerçekleştirilmiştir.

Mikroplastiklerin tespiti

Atıksu arıtma tesislerinden alınan numuneler genellikle yüksek seviyelerde girişim yapan organik madde içerir ve bu da mikroplastiklerin tanımlanmasını ve sınıflandırılmasını engelleyebilir. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmalarda mikroplastiklerin analizlerinden önce numuneyi saflaştırmak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Numune alma sürecinde olduğu gibi atıksuda bulunan mikroplastiklerin analizinde standart bir numune temizleme prosedürü yoktur. Çalışmalarda en çok uygulanan ön işlemlerden biri reaksiyonu hızlandırmak için harici bir ısı kaynağıyla birlikte %30 hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanan ıslak peroksidasyondur. Atıksu matriksinde çoğu organik maddenin giderilmesine olanak sağladığı için organik maddelerin giderilmesinde tercih edilen yöntemdir. Ancak 60 ºC'nin üzerinde yüksek sıcaklıklarda H_2O_2 ile oksidasyon sonucunda mikroplastiklerin morfolojisi ve kimyasal yapısı üzerinde değişimlere neden olabilmektedir. Yüksek organik madde içeriğine sahip numunelerde oksidasyon sürecinin tamamlanması uzun zaman (5-10 gün) alabilmektedir. Bu süreci kısaltmak için genellikle bir katalizör (Fe^{+2}) varlığında H_2O_2 kullanarak organik bileşikleri oksitleyen Fenton reaktifi kullanılmıştır. Böylelikle mikroplastik parçacıkların yapısının ve morfolojisinin korunarak işlem süresinin (12-24 sa) önemli ölçüde kısaldığı gözlenmiştir. Çalışmalarda enzimler (selülaz, proteaz, lipaz ve kitinaz) kullanılarak da organik madde giderimi etkin şekilde gerçekleştirilmiştir. Ancak enzim kullanan bozunma süreçlerinin tamamlanması birkaç gün sürebilmekte ve uygun maliyetli olmayabilir. Alkali ve asitle gerçekleştirilen organik madde giderme yöntemleri ise mikroplastiklere zarar verebildiğinden uygulama alanları oldukça sınırlı olmuştur.

Organik madde giderimi sağlanan numunelerde atıksudan mikroplastiklerin ayrılması için yoğunluk ayırma yöntemleri

kullanılmaktadır. Bunu sağlamak için numune belirli bir süre boyunca yüksek yoğunluklu bir tuz çözeltisiyle bekletilerek yoğun bileşikler ve inorganik maddeler kabın dibinde kalarak iki farklı faz elde edilmektedir. Çalışmalarda optimum ayırmayı sağlamak için çeşitli tuzlar kullanıldığı gözlenmektedir. Sodyum klorür (NaCl) bulunabilirliği, düşük maliyeti ve ayrıca çevre dostu yapısı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmiştir. Özellikle atıksularda ilk mikroplastik analizlerinin gerçekleştirildiği çalışmalarda NaCl kullanıldığı görülmektedir. Ancak NaCl ile gerçekleştirilen çalışmalarda yoğunluğu 1.2 g/cm^3'ün üzerindeki polietilen tereftalat (1.32 g/cm^3) ve polivinil klorür (1.1–1.45 g/cm^3) gibi yüksek yoğunluklu polimerlerin ayrılmaması önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durum atıksudaki mikroplastik miktar ve türünün yanlış rapor edilmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda çinko klorür ($ZnCl_2$) (1.5-1.7 g/cm^3) ve sodyum iyodür (NaI) (1.6-1.8 g/cm^3) gibi daha yoğun tuz çözeltilerinin yoğunluk ayırma sürecinde kullanıldığı görülmektedir. NaI pahalı olması ve akuatik yaşam için toksik olması nedeniyle daha az kullanılmaktadır. Düşük fiyatı ve yoğunluk ayırma verimliliğinin iyi olması nedeniyle $ZnCl_2$ yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek yoğunluklu polimerlerin ayrılmasında etkili olması nedeniyle bazı araştırmalarda çinko bromür ($ZnBr_2$) (4.22 g/cm^3) kullanılsa da maliyetli olması ve tehlikeli kimyasallar sınıfında yer alması nedeniyle kullanımı sınırlıdır.

Mikroplastikler atıksudan ayrıldıktan sonra boyutlarına, şekillerine ve renklerine göre karakterize etmek için genellikle optik teknikler kullanılarak fiziksel olarak karakterize edilmektedir. İncelen çalışmalarda mikroplastiklerin fiziksel özelliklerini görsel olarak ayırmak ve belirlemek için bir stereomikroskop veya bir optik mikroskop kullanılmıştır. Bu analiz yöntemi yoruma tabidir ve analiz gerçekleştiren kişiye büyük ölçüde bağlıdır. Bu durum toplam mikroplastik sayısının fazla veya az rapor edilmesine neden olabilir. Son yıllarda yapılan çalışmalar da taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroplastik parçacıkları derinlemesine görsel olarak karakterize etmek için uygulanmıştır. Çalışmalarda atıksuda tespit edilen mikroplastikler boyut açısından sınıflandırılmıştır. Atıksu arıtma tesisi giriş suyunda genellikle toplam sayının %30-50'sini 500 µm'den büyük mikroplastikler oluştururken, çıkış atıksuyunda ise toplam mikroplastik sayısının %90'dan fazlası 500 µm'den küçük mikroplastiklerden oluşmaktadır. Çalışmalardaki morfolojik tespitlere göre arıtma tesisi giriş ve çıkış atıksularında mikroplastiklerin %70'inden fazlası fiber ve fragmentlerden oluşmaktadır. En yaygın tespit edilen mikroplastik renkleri ise beyaz, siyah ve şeffaf olarak tanımlanan renklerdir.

Atıksu örneklerinde tespit edilen mikroplastik parçacıkların polimer türlerini tanımlamak için çalışmalarda yaygın olarak Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, mikro-FTIR, zayıflatılmış toplam yansıma ATR-FTIR spektroskopisi ve Raman spektroskopisi kullanılmıştır. Son

yıllarda sınırlı olmakla birlikte bazı çalışmalarda kromatografik yöntemlerde (LC-MS, GC-MS) kullanılmıştır.

Atıksuda mikroplastik ve giderimleri

Tablo 1'de 2021-2025 yılları arasında birincil, ikincil ve üçüncül arıtım ünitesi içeren kentsel ve evsel atıksu arıtma tesislerinde atıksu arıtma tesisi giriş, atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda tespit edilen mikroplastik miktarları, atıksu arıtma tesisi mikroplastik giderim verimi, atıksu arıtma tesisinde karşılaşılan mikroplastiklerin polimer türleri ve çalışmanın nerede gerçekleştirildiği verilmiştir. Tablo 1'de atıksu arıtma tesisi giriş atıksuyunda tespit edilen mikroplastik miktarlarının çok fazla değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Giriş atıksuyunda 0.70-8.72 MP/L (Zhang vd., 2021b), 1.9 MP/L (Le vd., 2023) gibi düşük mikroplastik miktarlarının tespit edilmesinin yanısıra 1567.49±413.18 MP/L (Franco vd., 2021), 2405.5±113.1 MP/L (Ren vd., 2025) gibi çok yüksek mikroplastik miktarları da tespit edilmiştir.

Tablo 1: Atıksu arıtma tesisinde mikroplastikler ve giderimleri

Arıtma tesisi prosesleri	Arıtma tesisi giriş mikroplastik miktarı (MP/L)	Arıtma tesisi çıkış mikroplastik miktarı (MP/L)	Mikroplastik giderimi (%)	Polimer türü	Ülke	Kaynak
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (temas tankı)	288.5	22.9	92.1	PP, PE, PS, PA, PES, PET, PVC	Çin	Yang vd., 2021
Birincil ve ikincil arıtım	72.6	8.2	84.7-93.0	PC, PUR, PET	Türkiye	Vardar vd., 2021
Birincil ve ikincil arıtım	645.03±182.22 1567.49±413.18	16.40±7.85 131.35±95.36	>90	PVC, PE, EAA ve diğer	İspanya	Franco vd., 2021
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	38 41	0.4 0.002	>99	PP, PE, PET, acrylic, PA-6	Yunanistan	Zeri vd., 2021
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (filtrasyon)	64.78±18.88	1.97±0.21	97	PE, PVC, PP, PC ve diğer	İsrail	Ben-David vd., 2021
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (disk filtrasyon)	61±26	0.8±0.4	99	PP, PE, PET ve diğer	Finlandiya	Salmi vd., 2021
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (fiber filtrasyon)	44.07±3.16	1.97±0.31	96	PET, PP, PE	Çin	Zhang vd., 2021a
Birincil ve ikincil arıtım	0.70-8.72	0.07-0.78	89.2-93.6	PP, PE, PET ve diğer	Çin	Zhang vd., 2021b
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (UV dezenfeksiyon)	219.50±77.75	12.98±14.58	94.09	PVC, PE, PS, PET, acrylic, rayon, PP, olefin, nylon	Çin	Bao vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (disk filtrasyon)	392.2±223.1 71.2±8.2 38.8±1.8	1.8±1.2 3.1±0.5 0.5±0.2	>95	PE, PP, polyester, PA, PS, PET	Çin	Shan vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (UF, membran)	77±7.21	10.67±3.51	96.97	PE, PP, PET, PS, PU, PA, alkyd, acrylic, EDPM	Tayland	Tadsuwan ve Babel, 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (filtrasyon)	18.1-9.7	0.56-0.06	94.9-99.7	PE, PP, PET, PCL, PUR, PEUR, SBR, ABS, phenoxy reçine ve diğer	İtalya	Galafassi vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (Yapay sulak alan)	70.00±18.67 54.33±16.11	19.33±1.25 17.33±1.25	72.38 68.10	PP, PE, PS, PA,	Çin	Long vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri	114±17-216±65	0.26±0.29-	99.8	PP, PE, acrylic, PES/PET	Güney Kore	Kim vd., 2022

arıtım (filtrasyon)		0.48±0.11		ve diğer		
Birincil ve ikincil arıtım	135.3±28.0	8.5±4.7	93.7	PP, PE, PS, PET, PA	Türkiye	Üstün vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (filtrasyon)	16.1±3.3	1.13	89-95	PE, PET, PP, PET, PA, PS, PVC	İspanya	Menéndez-Manjón vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	7-177	<41	>80	PP, PE, PET, PS, PVC	Çin	Yang vd., 2022
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (lagün, dezenfeksiyon)	207-220 183-198 387-443	157-177 138-161 277-340	21.8 25.5 25.2	PE, PET, PVC, nylon, PP ve diğer	Vietnam	Van Do vd., 2022
Birincil ve ikincil arıtım	53.9	1.9	96	PS ve PVC	Türkiye	Altuğ ve Erdoğan, 2022
Birincil ve ikincil arıtım	843.2±147.5	11.13±3.14	98.7	PP, PE, PA, PS, PVC ve diğer	İran	Sharifi vd., 2023
Birincil ve ikincil arıtım	20.7-218.8 45.50-194.7	1.0-24.3 0.8-34	82.5-97.5	PP, PE, PET ve PVC	Meksika	Flores-Munguía vd., 2023
Birincil ve ikincil arıtım	2.9-51.9	1.3-5.9	14.2-96.8	PE, PP, PET, PVC, PA, PS, alkyd ve diğer	Tayland	Maw vd., 2023
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	1.9 6.9 125.3	0.6 0.3 0.14	68.8 95 99.9	PE, PP, PES, acrylic ve diğer	Vietnam	Le vd., 2023
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	150-4670	0.2-11.4	98.2-99.9	PE, PP, PS, PES, PET ve diğer	Güney Kore	Lee vd., 2024
İkincil arıtım	3.8-10.2	3.1-8.8	14.4-54.6	PVA, PE, PVC, PP, PET acrylic, PVB, PUR, PVE, PI, PVME	Çin	Gao vd., 2024
Birincil ve ikincil arıtım	10.2-20.2 9.8-27.2	0.6-1.2	97	PET, PE, PS, PP, PVA	Belçika	Wang vd., 2024
Birincil ve ikincil arıtım	25±5-300±57	-	20-77	PET, PS, PAN, ABS, PP/PE, cellulose	İtalya	Sarti vd., 2024
Birincil arıtım	1114±90	607±101	46	PET, PE, PVC, PA, PS, PP, EVA	Fas	Hajji vd., 2024

Birincil, ikincil ve ileri arıtım (filtrasyon)	47.06±37.63- 69.44±41.00	4.06±3.06- 5.44±3.51	88.6-93.0	PE, PET, PS, PVC, PA, PP, PES, EAA	Kazakistan	Zhaxylykova vd., 2024
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (koagülasyon-flokülasyon-durultucu)	4.3-51.9 2.9-31.2	1.3-4.2 2.2-14.0	50-96.8 14.2-53.6	PE, PP, PET, PA, PS, alkyd reçine ve diğer	Tayland	Maw vd., 2024
Birincil ve ikincil arıtım	31.2±17.3	8.5±5.6	72.5	PET, PS, PE	Nepal	Bastakoti vd., 2024
İkincil arıtım	5.9	0.55	90.7	-	Vietnam	Kieu-Le vd., 2025
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (oksidasyon)	76.6±2.5 67.3±4.0 98.7±7.7	14.8±0.6 17.2±0.6 23.0±0.4	80.68 74.45 76.69	PE, PP, PS, PET, PA, PVC, PC ve PMMA	Çin	Chen vd., 2025
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	176.10-204.44	0.09-0.027	66.45-100	HDPE, LDPE, PS, PP, PET, PA6, PA12, PVC, PC, PTFE, PVA, PMMA, POM	Finlandiya	Viitala vd., 2025
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	875.5±32.1 2405.5±113.1	37.9±19.7 71.5±9.4	95.7 97.0	PP, PAM, PVC, PE, PET, PU ve diğer	Çin	Ren vd., 2025
Birincil, ikincil ve ileri arıtım (membran)	140-290	10-30	78.6-96.6	PP, PS, PE, PET, PVC, PA, PU, EVA, ABS, acrylic	Çin	Lian vd., 2025
Birincil ve ikincil arıtım	205-520	0.5-1.4	99.6-99.8	PET, PP, PS, PE, PVC, PAN, PA, ABS, PVA	Estonya	Ayankunle vd., 2025

PE, polyethylene; PP, polypropylene; PET, polyethylene terephthalate; PS, polystyrene; PA, polyamide; PES, polyether sulfone; PVC, polyvinylchloride; PC, polycarbonate PCL, polycaprolactone; PUR, polyurethane; PEUR, polyether urethane; EDPM, ethylene-propylene diene; SBR, styrene-butadiene; ABS, acrylonitrile butadiene styrene; EAA, ethylene acrylic acid, EVA, ethylene-vinyl acetate; PVA, polyvinyl acetate; PVB, polyvinyl butyral; PVE, polyethylvinyl ether; PI, polyimide; PVME, polyvinyl methyl ether; EAA, ethylene-acrylic acid copolymer; PMMA, polymethyl methacrylate; HDPE, high density-polyethylene; LDPE; low density-polyethylene; PTFE, polytetrafluoroethylene; POM, polyoxymethylene; PAM, polyacrylamide; PU, polyurethane; PAN, polyacrylonitrile; ABS, acrylonitrile butadiene styrene

- tespit edilmedi

İncelenen verilere göre daha yoğun nüfuslu alanlara hizmet veren atıksu arıtma tesisleri, giriş ve çıkış sularında mutlaka daha yüksek mikroplastik konsantrasyonları anlamına gelmemektedir. Nüfusun daha yüksek ($2.0x10^6$ kişi) olduğu bir atıksu arıtma tesisinde giriş ve çıkış suyu örneklerinde sırasıyla 72.6 ve 8.2 MP/L tespit edilirken, nüfusu daha düşük (21.388-22.005 kişi) olan bir kentin arıtma tesisi giriş ve çıkış atıksuyunda (Long vd., 2022) da benzer değerler tespit edilmiştir. Bu sonuçlar atıksudaki mikroplastik miktarının arıtma tesisinin hizmet verdikleri toplam nüfustan ziyade atıksu karakterizasyonu veya analiz tekniklerinin etkisi ile olabileceğini göstermektedir.

Tablo 1'de gerçekleştirilen çalışmalarda tespit edilen polimer türleri verilmiştir. Genel olarak, PE, PP, PET, PVC, PS ve PA atıksu arıtma tesislerinde tespit edilen en yaygın polimerlerdir. Atıksu arıtma tesisleri kentsel kanalizasyonlar aracılığıyla yerleşim yerlerinden gelen çamaşır makinesi atıklarını aldığından PE, PET ve PA'nın baskın tespit edilmesi olasıdır. Çalışmalarda günlük yaşamda yaygın kullanımları nedeniyle PE ve PP polimer türü mikroplastikler en sık tespit edilenlerdir. PE'nin yüksek yaygınlığı genellikle mikroboncuk içeren ve nihayetinde bu tesislere ulaşan kişisel bakım ürünlerinin kullanımı ve gıda ambalajlarındaki kullanımına atfedilebilir. PET ayrıca çeşitli çalışmalarda önemli bir baskın polimer olarak tanımlanmıştır. PET sentetik giysilerde yaygın olarak kullanıldığından ev ortamlarından ve endüstriyel çamaşırhanelerden (hastanelerden, otellerden vb. gelen tekstil ürünleri) gelen çamaşır atıksuları başlıca emisyon kaynaklarından biri olabilir. Endüstriyel çamaşırhanelerin mikroplastik salımdaki rolü hakkında çok az bilgi bulunmaktadır. İsveç endüstriyel çamaşırhane atıksuyunda yıkanmış tekstilin kg'ı başına 5000 ila 5375000 mikroplastik salınabileceği tespit edilmiştir (Brodin vd., 2018). PVC ayrıca atıksu ve çamurda tespit edilen baskın polimer türü olmuştur. PVC ve PP türü şişelerin, kapların ve hatta boruların sürekli kırılmasıyla PVC ve PP mikroplastikler arıtma tesislerine ulaşabilir. Atıksu arıtma tesislerine ulaşan plastiklerin kaynakları ve yolları hala tam olarak anlaşılamamıştır. Tespit edilen mikroplastiklerin polimer türlerinin bilinmesi dolaysıyla mikroplastiklerinin kaynağının tespit edilmesine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle atıksu arıtma tesislerindeki polimer tipi dağılımının ve miktarının araştırılması önemlidir.

Tablo 1'de sunulan çalışmalarda mikroplastik giderimi için dizayn edilmemiş olmasına rağmen atıksu arıtma tesislerinde mikroplastiklerin yüksek giderim oranları elde edildiği görülmektedir. Birincil, ikincil ve üçüncül arıtım içeren atıksu arıtma tesislerinde genel olarak ön arıtma ve birincil arıtma gibi arıtma proseslerinin sonraki proseslere göre daha verimli mikroplastik giderimi sağladığı görülmektedir. Bu esas olarak daha düşük yoğunluklu mikroplastiklerin ön çöktürme havuzunda daha ağır partiküllerden ayrılması ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte bazı çalışmalarda ikincil arıtma çıkışında birincil arıtma çıkışına göre daha

yüksek mikroplastik miktarları rapor edilmiştir. Bu durumu fazla çamurdaki mikroplastik konsantrasyonu nispeten yüksek olduğundan ikincil çökeltme havuzunda katı maddenin yeniden süspanse olması ile açıklamışlardır (Salmi vd., 2021). Benzer şekilde bir çalışmada atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda daha yüksek mikroplastik miktarları tespit edilmiştir. Yazarlar bu durumun arıtma tesisi çıkışı atıksu örnekleme noktasındaki daha kararlı akışın aksine, birincil çöktürücüden gelen daha türbülanslı atıksu akışına atfedilebileceğini öne sürmüşlerdir (Lares vd., 2018).

Arıtma tesisinde giderilen mikroplastiklerin morfolojisi arıtma verimini etkilemektedir. Yapılan araştırmada birincil arıtma işlemlerinde giderilen mikroplastiklerin %50'sinden fazlasının fiber ve fragment mikroplastikler olduğu ve bu morfolojilerin gideriminin etkili olduğunu bildirilmiştir (Yuan vd., 2022). Genel olarak ızgara, kum tutucu ve ön çökeltme gibi fiziksel süreçleri içeren konvansiyonel arıtma prosedürleri ile atıksudan mikroplastikler etkili bir şekilde giderilebilse de filtrasyon ve membran ileri arıtımlarını içeren atıksu arıtma tesislerinde giderim verimlerinin daha da arttığı gözlenmektedir. Ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon membran proseslerini içeren arıtma tesislerinde mikroplastiklerin %90'ından fazlasının giderdiği rapor edilmiştir. Bazı araştırmalarda mikrofiltrasyon kullanan arıtma tesislerinde %80 giderim verimi tespit edilmiş olup bu durum atıksuda bulunan fiber türü mikroplastiklerin filtre edilme sürecindeki kaçışı ile açıklanmıştır. Ayrıca membran proseslerin işletme zorlukları ve maliyetleri atıksu arıtma tesisi ileri arıtım uygulamalarında kullanımlarını sınırlandırmaktadır.

Atıksudaki askıda katı maddelerin giderimi için kullanılan koagülasyonun atıksudan mikroplastik gideriminde kullanımı düşük maliyet ve kolay uygulanabilirlik açısından tercih edilen bir yöntemdir. İkincil atıksu arıtma tesisi çıkış sularının demir, alüminyum ve polyamin bazı koagülantlar ile koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme prosesleri sonucunda %99.4 oranında mikroplastik giderildiği rapor edilmiştir (Rajara vd., 2020). Ayrıca elektrokoagülasyon ile %90 ile %98 oranında giderim verimleri tespit edilmiştir (Perren vd., 2018; Akarsu vd., 2021).

Konvansiyonel aktif çamur prosesi ve son çökeltme tankından oluşan ikincil arıtma prosesleri pek çok atıksu arıtma tesisinde kullanılan konvansiyonel proseslerdir. Yapılan araştırmalarda atıksudaki mikroplastik sayısını aktif çamur prosesi ve son çökeltme tankında dolaylı olarak azalttığı bulunmuştur. Ancak yapılan araştırmalara bakıldığında klasik aktif çamur prosesi ile mikroplastiklerin giderim oranı oldukça değişkendir. Ek arıtma prosesleri ile birleştirildiğinde aktif çamur kullanan atıksu arıtma tesislerinin giderim verimliliği %98'in üzerinde bulunmuştur. Aktif çamur prosesinde mikroplastiklerin giderim prosesi mikroplastiklerin aktif çamur floklarının yüzeylerine biyosorpsiyonu, çamur matrisi içerisinde hapsolma, çöktürme ünitesinde çeşitli çökelme mekanizmaları ile sudan çamura transfer edilmesi şeklinde olabilmektedir. Atıksu arıtma tesisi çıkış atıksuyunda mikroplastik

miktarlarının azalması atıksudan mikroplastik gideriminin olduğunu bize ifade ederken aynı zamanda suyun arıtılması sürecinde ortaya çıkan arıtma çamurlarında mikroplastiklerin akümüle olması anlamına gelmektedir. Mikroplastiklerin %90'dan fazlasının atıksu arıtımı sırasında biyokatı fraksiyonunda tutulduğu tespit edilmiştir (Carr vd., 2016). Stabilize edilmiş arıtma çamurlarının çoğunlukla tarımda toprak iyileştirici olarak kullanılması mikroplastiklerin tarım alanlarına taşınmasında önemli bir vektördür. Üretilen arıtma çamurlarının %40'ının tarım alanlarına verilmesi ile Avrupa tarım topraklarına her yıl milyon kişi başına 125 ila 850 ton mikroplastik eklendiği rapor edilmiştir (Nizzetto vd., 2016b).

Atıksu arıtma tesisine gelen suyun içerisinde mikroplastiklerin varlığı arıtma tesisi açısından da riskler içermektedir. Atıksuda bulunan mikroplastikler arıtma tesisinin işletme proseslerine zarar vererek atıksu arıtım performansını etkileyebilirler. Atıksu arıtma tesislerinde biyolojik arıtma ünitelerinde mikrobiyal toplulukların yapısını değiştirebilir ve hücre dışı polimerleri etkileyerek, oksidatif stresi artırarak ve atıksu arıtımı için gerekli olan mikroorganizmalardaki enzimatik aktiviteyi bozarak işlevsel mikrobiyal aktiviteyi azaltabilirler. Ayrıca mikroplastikler suya bünyesindeki toksik katkı maddeleri salabilirler ve sudaki zararlı bileşikleri adsorbe ederek mikroorganizmalar için daha da zararlı hale gelebilirler. Bazı çalışmalarda mikroplastiklerin aerobik granüler çamur sistemlerinde kimyasal oksijen ihtiyacını ve amonyak azotu giderimini engellediği, yukarı akışlı anaerobik çamur örtüsü reaktörlerinde artan mikroplastik konsantrasyonları daha fazla kimyasal oksijen ihtiyacını inhibisyonuna ve metan üretiminin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Zhou vd., 2024).

Tablo 2'de atıksu arıtma tesisinde farklı arıtma proseslerinde mikroplastik giderimi ve maliyetleri verilmişti (Sol vd., 2020).

Tablo 2: Atıksu arıtma tesisinde farklı arıtma proseslerinde mikroplastik giderimi ve maliyeti

Arıtma prosesi	Mikroplastik giderimi (%)	Maliyet
Klorla dezenfeksiyon	7	Düşük
Koagülasyon-flokülasyon	47-82	
Hızlı kum filtresi	45-97	
Çözünmüş hava flotasyonu	95	
Oksidasyon hendeği	97	
Konvansiyonel aktif çamur	96-98	
Aeorbik, anoksik, aerobik (A2O)	72-98	Düşük-orta
Ardışık kesikli reaktör	98	
Ultrafiltrasyon	42	Orta
Diskfiltre	40-98	
Ozon	90	
Ters ozmoz	90	Yüksek
Dinamik membran	99	
Membran biyoreaktör	≥99	

Yapılan çalışmalarda özellikle son yıllarda membran biyoreaktörler, nanofiltrasyon, ters ozmoz gibi prosesleri içeren arıtma tesislerinde mikroplastiklerin giderimi oldukça yüksektir. Ancak atıksu arıtma tesislerinde bu giderim teknolojilerinin uygulanmasında bazı kısıtlamak bulunmaktadır. Öncelikle mevcut tesislerin iyileştirilmesi veya yenilerinin inşasıyla ilişkili yüksek maliyetler söz konusudur. Bu finansal sınırlama genellikle atıksudan mikroplastikleri etkili bir şekilde gidermekte zorlanan eski veya yetersiz arıtma yöntemlerinin kullanılmasına yol açmaktadır.

MİKROPLASTİKLERİN EKOLOJİK VE SAĞLIK ETKİLERİ

Çevreye karışan mikroplastikler insanlar, karasal ve deniz canlıları üzerinde doğrudan ve dolaylı toksisiteye neden olabilir. Mikroplastiklere uzun süre maruz kalmak kronik toksisiteye neden olabilir. İlk olarak toksisite plastik ürünlerin üretiminde kullanılan polimer malzeme kaynaklı olabilir. İkinci olarak ise küçük boyutlu ve keskin uçlu olmaları sebebiyle vücuda alınan mikroplastikler organizmalara zarar verebilir ve iltihaplanmaya neden olabilir. Ayrıca plastiklerin özelliklerini iyileştirmek için plastiklere eklenen katkı maddeleri de organizmalar için toksik olabilir. Örneğin ftalatlar ve polibromlu difenil eterler plastiklerin plastisitesini ve yangına dayanıklılığını artırmak için kullanılan katkı maddesi olup endokrin bozucu bileşiklerdir (Contreras-Llin vd., 2024). Mikroplastiklerin atıksudaki farklı kirleticiler ile bir arada bulunması toksisitenin artmasına neden olabilir. Mikroplastikler yüzey özellikleri ve boyutları sebebiyle ağır metaller ve organik kirleticiler başta olmak üzere pek çok kirleticiyi adsorbe edebilir ve beraberinde taşıyabilir. Ayrıca deterjan, kişisel bakım ürünü ve endüstriyel temizleyicilerde yaygın olarak kullanılan yüzey aktif maddelerin atıksuda bulunması mikroplastiklerin organik kirletici adsorpsiyon kapasitesini artırmaktadır (Luqman vd., 2023). Mikroplastiklerin boyutu potansiyel toksisitelerinin şekillendirmede önemlidir. Daha büyük mikroplastik parçacıkların hücrelere girme olasılığını düşük ve oksidatif strese neden olma etkisi daha düşüktür. Tek biçimli olmayan mikroplastik parçaları küresel benzerlerine kıyasla daha belirgin fiziksel hasara neden olma eğilimindedir (Li vd., 2023). Atıksu arıtma tesisleri arıtma proseslerine yaygın olarak kullanılan karıştırma işlemi nedeniyle yüksek su kesme kuvvetlerine maruz kalan plastik parçaların ikincil mikroplastik ve daha küçük boyutlu nanoplastiklere dönüşmesine neden olmaktadır (Enfrin vd., 2020).

Mikroplastiklere ve atıksu arıtma tesislerinden deşarj edilen atıksularından salınan kirleticilere doğrudan maruz kalan balıklar, oksidatif stres, nörotoksisite ve enzim aktivitesinde, büyüme ve beslenme performansında değişiklikler yaşayabilir. Akdeniz'de yapılan bir araştırma örneklenen balık türlerinin neredeyse yarısının sindirim sistemlerinde mikroplastikler bulunduğunu ortaya koymaktadır (Wright vd., 2013). Benzer şekilde zooplanktonlarda mikroplastiklere maruz kalmak, erken tüy dökümüne, büyüme geriliğine ve artan ölüm oranlarına ve diğer olumsuz etkilere yol açabilir (Ahmed vd., 2023). Mikroplastiklerde adsorbe olmuş ağır metaller ve organik kirleticilerin mikroplastiklerden salımı, bu maddelerin balıklar gibi organizmalardaki diğer dokulara taşınması ve olumsuz sağlık etkilerine neden olma potansiyeli oluşturur (Abad L´opez vd., 2023). Dahası ağır metaller ve kalıcı organik kirleticiler (KOK'lar) gibi tehlikeli kimyasallar plastikten sızar ve canlıların dokularında birikir. Bu kimyasallar endokrin sistemini bozabilir, üreme sağlığına zarar verebilir ve memelilerin hayatta kalma oranlarını düşürebilir (Yong vd., 2020). Mikroplastik yutulması küçük memelilerin beslenme alışkanlıklarını değiştirerek onları yırtıcılara karşı daha savunmasız hale getirebilir ve durum popülasyonlarının azalmasına katkıda bulunabilir (Jeong vd., 2024).

Mikroplastik maruziyeti hem bireysel organizmaları hem de tüm ekosistemleri bozarak türler arası etkilere yol açabilir. Mikroplastik tüketen küçük memeliler, daha büyük yırtıcıların avı olabilir ve vücutlarında mikroplastik biriktirebilirler. Benzer şekilde mikroplastik tüketen balıklar insanlar ve diğer hayvanlar tarafından tüketilebilir ve bu da besin zinciri boyunca mikroplastik kontaminasyonuna neden olabilir. Mikroplastik tüketimi türler arası etkileşimler üzerinde davranışsal ve fiziksel bir etkiye sahip olabilir ve avcı-av dinamiklerini ve besin ağlarını bozabilir. Bu durum, özellikle iklim değişikliği ve diğer insan kaynaklı faktörlerin baskısı altında olan bölgelerde biyolojik çeşitliliği azaltabilir ve ekosistemleri değiştirebilir (Carrasco vd., 2025).

Atıksu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurlarının tarımda kullanımı mikroplastiklerin toprağı ve dolayısıyla gıda kalitesini etkileyebilmesi nedeniyle potansiyel tehlikeler konusunda endişelere yol açmaktadır. Plastik içeren biyokatıların kullanımı ve tarım alanlarının sulanması için kullanılan sulama suyunun mikroplastik içermesi de dahil olmak üzere çeşitli yollarla tarım topraklarına girebildikleri için mikroplastikler gıda güvenliğini de etkiler.

Mikroplastikler solunum, yutma ve doğrudan cilt teması dahil olmak üzere çeşitli yollarla insan vücuduna girerler. Mikroplastikler insan vücuduna öncelikle gastrointestinal sistem yoluyla yani süt, şeker, tuz ve şişelenmiş su gibi mikroplastikler ile kirlenmiş gıdaları tüketilmesi yoluyla girebilmektedir (Rahman vd., 2024a, 2024b). Kozmetik ürünler cilt bariyerini bozarak mikroplastiklerin endokrin sisteme girmesine ve onu etkilemesine olanak tanıyabilir (Zhao vd., 2024a). Mikroplastiklerin insanlar

üzerindeki toksisitesi üzerine yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır, Bazı çalışmalarda mikroplastiklerin hücresel ve organoid düzeylerdeki potansiyel etkileri ve hayvanlardaki davranışları değerlendirilmiştir. Mikroplastik parçacıkların hücre deneylerindeki toksik etkilerini araştıran araştırmalar insan sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkileri ortaya çıkarmıştır. Mikroplastikler ve nanoplastikler oksidatif stres oluşturarak DNA hasarına ve organ işlev bozukluğuna yol açabilir (Li vd., 2023) ve ayrıca doğrudan bağışıklık sistemi etkilerine neden olarak bağırsak bağışıklık hücresi bozukluğuna neden olabilir (Khan vd., 2023). Ayrıca mikroplastikler yayın balığı, istiridye ve zebra balığı gibi bazı hayvan türlerinde üreme ve gelişimsel toksisiteyle ilişkilendirilmişlerdir (Sangkham vd., 2022). İnsan böbrek ve karaciğer hücrelerinde polistiren maruziyeti deneyleri gerçekleştirilmiş ve bunların hücresel morfoloji, proliferasyon ve metabolizmada değişikliklere yol açabileceği gözlemlenmiştir (Goodman vd., 2022). Mikroplastikleri ve nanoplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini tam olarak anlamak ve olumsuz etkilerini en aza indirebilmede etkili stratejiler geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle belirli boyutlarda ve morfolojilerde mikroplastikler kullandığından, mikroplastiklerin gerçek dünyadaki çevresel konsantrasyonlarda ve morfolojilerindeki ekolojik ve toksik etkilerini araştırmak çok önemlidir. Ayrıca mikroplastiklerin bulunduğu ortamdaki diğer kirleticiler ile birlikte oluşturduğu sinerjik ekotoksikolojik etkinin ortaya konulması da önemlidir.

SONUÇ VEDEĞERLENDİRME

Atıksu arıtma tesisleri mikroplastiklerin önemli kaynakları ve bu yeni ortaya çıkan kirleticilerin akuatik ve karasal ekosistemlere girmesinin önemli bir yolu olarak tanımlanmıştır. Bu tesisler çamaşırhanelerden ve evsel atıklardan kanalizasyon sistemine ve ayrıca endüstriyel ortamlardan büyük miktarlarda mikroplastik almaktadır. Atıksu arıtma tesislerine ulaşan toplam mikroplastik yükünün yaklaşık %80'nin üzerinde giderim oranlarına ulaşılmasına rağmen hala yüksek atıksu deşarjları ile çok miktarda mikroplastik çevreye salınmaktadır. Bu çalışma kapsamında son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalardaki örnekleme uygulamaları, arıtma protokolleri, analitik yöntemler, atıksu arıtma tesislerindeki mikroplastiklerin oluşumu ve giderimi incelenmiş ve iyileştirme için aşağıda sıralanan bazı öneriler oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında incelenen makalelerde mikroplastiklerin tespiti ve analizleri için kullanılan yöntemlerin değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Numune alma sürecinden morfolojik ve polimer karakterizasyon sürecine kadar atıksuda mikroplastik tespiti için standart bir prosedür olmaması nedeniyle farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu durum çalışmalarda tespit edilen atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış suyundaki mikroplastik miktarı ve atıksu arıtma tesisi giderim performanslarının mukayese edilebilirliğini önlemektedir. Atıksu arıtma tesislerine ulaşan atıksular kentin farklı alanlarından gelmektedir. Mikroplastikler hakkında doğru bilgi elde etmek atıksuya ulaşan mikroplastiklerin kaynaklarını ve alınacak önlemleri belirlemek açısından önemlidir. Atıksu arıtma tesisi numuneleri karmaşık olup stereomikroskop kullanılarak analizi gerçekleştiren kişinin görsel ayırma ve karakterizasyon yetisine bağlı olan bir yöntem ile sağlıklı sonuçlar elde edilmesi kısıtlıdır. Bu nedenle atıksu arıtma tesisleri için mikroplastik örnekleme ve analitik yöntemlerinin standartlaştırılması veri karşılaştırılabilirliğini ve güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca atıksu arıtma tesisleri deşarjları ile çevreye deşarj edilen gerçek mikroplastik miktarlarının ortaya çıkmasını sağlayacaktır.

Birincil ve ikincil arıtma proseslerini içeren konvansiyonel atıksu arıtma süreçleri genellikle küçük mikroplastikleri gidermede etkisizdir. Ayrıca bu prosesler mikroplastiklerin kimyasal ve biyolojik bozunma süreçlerine karşı direnci nedeniyle mikroplastiklerin çamurda birikmelerine neden olmaktadır. Arıtma çamurlarının çamur tarım arazilerine gübre olarak uygulandığında çevre kirliliği için ikincil bir yol oluşturur. Genel olarak mikroplastik kirliliğinin yol açtığı çevresel zorlukla başa çıkmak için bilgi paylaşımı ve mikroplastiklerin giderim verimliliğinin artırılması şarttır. Uluslararası iş birliği, yöntemlerin standardizasyonu ve kapasite geliştirme bu sorunu etkili bir şekilde çözmenin yolunu açabilir.

İleri arıtma teknolojileri veya mevcut proseslerin optimizasyonu yoluyla arıtma verimliliğini %95 veya daha yükseğe çıkarmak bir hedef olabilir. Aktif karbon geniş yüzey alanı, yüksek gözenekliliği ve güçlü adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle bunların giderilmesi için uygun bir adsorban olarak kabul edilir. Yeni çalışmalar da aktif karbonun sudan mikroplastikleri uzaklaştırmak için bir yöntem olarak kullanımı araştırılmış ve %95'in üzerinde giderim verimleri elde edilmiştir. Ancak performansını optimize etmek ve kalan zorlukları ele almak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Atıksu arıtma tesisi çıkış suyunun alıcı ortama deşarj edilmesi için izlenen su kalite parametreleri içerisine mikroplastikler içinde limit değerler belirlenebilir. Ayrıca arıtma tesisinde oluşan arıtma çamurlarının toprakta kullanımına dair yönetmelik kapsamında çamurun mikroplastik içeriği ve potansiyel riskleri göz önünde bulundurularak tarımda güvenli bir şekilde bertarafı ve kullanımı için limit değerlerin belirlenmesi gereklidir.

Mikroplastiklerin kullanımını ve deşarjını kısıtlamanın önemli yollarından birisi yasal düzenlemelerdir. Ancak bu konu ile ilgili sınırlı sayıda yasal düzenleme mevcuttur. AB Plastik Stratejisi 2018 yılında mikroplastik kirliliğini yenilikçi azaltma çözümleri gerektiren bir sorun olarak vurgulamıştır (European Commission, 2018). Baş Bilimsel Danışmanlar Grubu 2019 yılında mikroplastik kirliliğiyle ilişkili çevresel ve sağlık risklerini ve bu riskleri azaltmak için ihtiyati tedbirlere ihtiyaç duyulduğunu bildirmiştir (Group of Chief Scientific Advisors, 2019). AB'nin 2020 yılında uygulamaya koyduğu Döngüsel Ekonomi Eylem Planı hem kasıtlı olarak artan hem de kasıtsız olarak serbest bırakılan mikroplastik miktarını ele almayı taahhüt etti. Sıfır Kirlilik Eylem Planı 2021 yılında mikroplastik salımlarını 2030 yılına kadar %30 oranında azaltması hedefini belirlemiştir. Avrupa Kimyasal Ajansı (ECHA) Avrupa Komisyonu'na ürünlere kasıtlı olarak eklenen mikroplastikler için bazı düzenleyici kısıtlamalar önermiştir. Öneriye göre bir karışımdaki mikroplastik konsantrasyonu en fazla %0.01 olması durumunda 20 yılı aşkın bir süre içinde 500 bin ton mikroplastik salımını önlemesi beklenmektedir (European Chemicals Agency, 2022). Dünya çapında ve ülkemizdeki yasal düzenlemelerde ise alışveriş poşetleri gibi tek kullanımlık plastik ürünlere odaklanmış, kullanımlarını azaltmak ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri konusunda toplumda farkındalık yaratmak için önlemler ve düzenlemeler uygulamaktadır (European Council Directive, 2019). Bazı ülkelerde mikroboncuk kısıtlamaları gibi birincil mikroplastikler hakkında yasal düzenleme bulunmasına rağmen ikincil mikroplastikler ile ilgili nerdeyse hiçbir yasal düzenleme bulunmamaktadır. Özellikle tarımsal faaliyetlerde kullanılan sera örtüsü ve diğer birçok plastik kullanımından kaynaklanan ikincil mikroplastik kaynakları ile ilgili düzenlemelerin gerçekleştirilmesi önemlidir. Evlerdeki kolay değişiklikler atıksu ile salınan mikroplastiklerin çoğunu yakalayabilir. Örneğin çamaşır makineleri bir elyaf toplama sistemi içerecek şekilde düzenlenebilir. Bu bazı ülkelerde halihazırda mevcuttur ve kullanılmaktadır. Genel olarak tüketici davranışlarındaki ve yönetmeliklerdeki değişiklikler yoluyla kirliliğin önlenmesi çevredeki mikroplastikleri azaltmanın en etkili yolu olabilir. Mevzuatta eksik olan yasal düzenlemelerin karasal ortamda ve özellikle de düzenleme ve kısıtlama politikaları açısından büyük ölçüde göz ardı edilen katı atık bertarafı, tarım alanındaki uygulamalar gibi pek çok alanda daha da güçlendirilmesi gerekmektedir. Mikroplastik girdisini kaynağında azaltmak için politikalar ve kamuoyu bilinçlendirme kampanyaları yürütülmelidir.

REFERANSLAR

Abad López, A. P., Trilleras, J., Arana, V. A., Garcia-Alzate, L. S., & Grande-Tovar, C. D. (2023). Atmospheric microplastics: Exposure, toxicity, and detrimental health effects. *RSC Advances, 13*, 7468–7489.

Ahmed, A. S. S., Billah, M. M., Ali, M. M., Bhuiyan, M. K. A., Guo, L., Mohinuzzaman, M., Hossain, M. B., Rahman, M. S., Islam, M. S., Yan, M., & Cai, W. (2023). Microplastics in aquatic environments: A comprehensive review of toxicity, removal, and remediation strategies. *Science of the Total Environment, 876*, 162414.

Akarsu, C., Kumbur, H., & Kideys, A. E. (2021). Removal of microplastics from wastewater through electrocoagulation-electroflotation and membrane filtration processes. *Water Science and Technology, 84*(7), 1648–1662.

Alava, J. J., Jahnke, A., Bergmann, M., Aguirre-Martínez, G. V., Bendell, L., Calle, P., Domínguez, G. A., Faustman, E. M., Falman, J., Kazmiruk, T. N., Klasios, N., Maldonado, M. T., McMullen, K., Moreno-Báez, M., Öberg, G., Ota, Y., Price, D., Shim, W. J., Tirapé, A., Vandenberg, J. M., Zoveidadianpour, Z., & Weis, J. (2023). A call to include plastics in the global environment in the class of persistent, bioaccumulative, and toxic (PBT) pollutants. *Environmental Science & Technology, 57*(22), 8185–8188.

Altuğ, H., & Erdoğan, Ş. (2022). Wastewater treatment plants as a point source of plastic pollution. *Water, Air, & Soil Pollution, 233*(10), 1–14.

Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin, 119*(1), 12–22.

Awad, H., Gar Alalm, M., & El-Etriby, H. K. (2019). Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries. *Science of the Total Environment, 660*, 57–68.

Ayankunle, A. Y., Buhhalko, N., Pachel, K., Lember, E., Drenkova-Tuhtan, A., & Heinlaan, M. (2025). Microplastics in Estonian wastewater treatment plants: First evaluation of baseline concentrations and stage-wise removal efficiency. *Aquatic Toxicology, 281*, 107305.

Bao, R., Wang, Z., Qi, H., Mehmood, T., Cai, M., Zhang, Y., Yang, R., Peng, L., & Liu, F. (2022). Occurrence and distribution of microplastics in a wastewater treatment plant in a tropical region of China. *Journal of Cleaner Production, 349*, 131454.

Bastakoti, S., Adhikari, A., Thaiba, B. M., Neupane, B. B., Gautam, B. R., Dangi, M. B., & Gir, B. (2024). Characterization and removal of microplastics in the Guheshwori Wastewater Treatment Plan*t, Nepal. Science of the Total Environment, 935*, 173324.

Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M., & Sabbah, I. (2021). Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique. *Science of the Total Environment, 752*, 141880.

Briain, Ó., Mendes, A., McCarron, S., Healy, M. G., & Morrison, L. (2020). The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment. *Water Research, 182*, 116021.

Brodin, M., Norin, H., Hanning, A. C., Persson, C., & Okcabol, S. (2018). *Microplastics from industrial laundries – A study of laundry effluents.* Swedish Environmental Protection Agency Report.

Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research, 91*, 174–182.

Carrasco, L., Mora, E. J., Utrilla, M. J., Pizarro, I. T., & Maldonado, B. M. (2025). Birds as bioindicators: Revealing the widespread impact of microplastics. *Birds, 6.*

Chen, B.-y., Chen, L., Xia, Q., Dai, D., Chen, Z.-w., & Zhu, S.-g., Xie, F.-z. (2025). A comparative study on microplastic removal efficiencies and diversity contributions of three wastewater treatment plants in Hefei, China. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 13*, 117573.

Cheung, P. K., & Fok, L. (2017). Characterisation of plastic microbeads in facial scrubs and their estimated emissions in Mainland China. *Water Research, 122*, 53–61.

Chia, R. W., Lee, J. Y., Lee, M., Lee, G. S., & Jeong, C. D. (2023). Role of soil microplastic pollution in climate change. *Science of the Total Environment, 887*, 164112.

Conley, K., Clum, A., Deepe, J., Lane, H., & Beckingham, B. (2019). Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year. *Water Research X, 3*, 100030.

Contreras-Llin, A., Carrera, J., & Diaz-Cruz, M. S. (2024). Navigating microplastics in wastewater treatment: Understanding analysis, mitigation, removal strategies, impact, and current knowledge gaps. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*, 114792.

Costa, J. P. D., Santos, T. R., & Duarte, A. C. (2020). *The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures*. European Parliamentary Research Service (EPRS). https://policycommons.net/artifacts/1426661/the-environmental-impacts-of-plastics-and-micro-plastics-use-waste-and-pollution/2041108/ adresinden 6 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır.

Dobaradaran, S., Schmidt, T. C., Nabipour, I., Khajeahmadi, N., Tajbakhsh, S., Saeedi, R., & Faraji Ghasemi, F. (2018). Characterization of plastic debris and association of metals with microplastics in coastline sediment along the Persian Gulf. *Waste Management, 78*, 649–658. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.037

Enfrin, M., Lee, J., Gibert, Y., Basheer, F., Kong, L., & Dumée, L. F. (2020). Release of hazardous nanoplastic contaminants due to microplastics fragmentation under shear stress forces. *Journal of Hazardous Materials, 384*, 121393.

European Chemicals Agency. (n.d.). *Microplastics.* Retrieved December 21, 2022, https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics adresinden 6 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır.

European Commission. (2018). *A European strategy for plastics in a circular economy.*

European Council. (2019). *Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment* (pp. 1–19).

Fan, C., Huang, Y.-Z., Lin, J.-N., & Li, J. (2021). Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: The use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. *Environmental Technology & Innovation, 23*, 101798.

Flores-Munguía, E. J., Rosas-Acevedo, J. L., Ramírez-Hernández, A., Aparicio-Saguilan, A., Brito-Carmona, R. M., & Violante-González, J. (2023). Release of microplastics from urban wastewater treatment plants to aquatic ecosystems in Acapulco, Mexico. *Water, 15*(20), 3643.

Franco, A. A., Arellano, J. M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Quiroga, J. M., & Coello, M. D. (2021). Microplastic pollution in wastewater treatment plants in the city of Cádiz: Abundance, removal efficiency and presence in receiving water body. *Science of the Total Environment, 776*, 145795.

Galafassi, S., Di Cesare, A., Di Nardo, L., Sabatino, R., Valsesia, A., Fumagalli, F. S., Corno, G., & Volta, P. (2022). Microplastic retention in small and medium municipal wastewater treatment plants and the role of the disinfection. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(7), 10535–10546.

Gao, S., Wu, Q., Zhang, B., Peng, M., Zeng, J., & Zhu, L. (2024). Significant effects of rural wastewater treatment plants in reducing microplastic pollution: A perspective from China's southwest area. *Journal of Hazardous Materials, 480*, 136488.

Gao, Y., Shi, X., Jin, X., Wang, X. C., & Jin, P. (2023). A critical review of wastewater quality variation and in-sewer processes during conveyance in sewer systems. *Water Research, 228*, 119398.

Goodman, K. E., Hua, T., & Sang, Q.-X. A. (2022). Effects of polystyrene microplastics on human kidney and liver cell morphology, cellular proliferation, and metabolism. *ACS Omega, 7*, 34136–34153.

Group of Chief Scientific Advisors. (2019). *Environmental and health risks of microplastic pollution.* https://doi.org/10.2777/54199 adresinden 6 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır.

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials, 344*, 179–199.

Hajji, S., Ben-Haddad, M., Abelouah, M. R., Rangel-Buitrago, N., & Ait Alla, A. (2024). Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge. *Science of the Total Environment, 945*, 174115.

Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., Van Der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology, 50*(5), 2685–2691.

Jeong, E., & Lee, J.-Y., Redwan, M. (2024). Animal exposure to microplastics and health effects: A review. *Emerging Contaminants, 10*, 100369.

Khan, A., & Jia, Z. (2023). Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience, 26*, 106061.

Kieu-Le, T.-C., Ngo, T.-P., Lai, M.-T., Pham, N.-H., Nguyen, N.-B.-T., Nguyen, P.-D., Le, T.-M.-T., & Strady, E. (2025). Microplastics in wastewater and sludge from centralized industrial wastewater treatment plants in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Science of the Total Environment, 945*, 174115.

Kim, M.-J., Na, S.-H., Batool, R., Byun, I.-S., & Kim, E.-J. (2022). Seasonal variation and spatial distribution of microplastics in tertiary wastewater treatment plant in South Korea. *SSRN Electronic Journal*, 129474.

Kong, S., Lv, X., Peng, D., & Chen, M. (2020). A new test method for biodegradability of plastics in sediment. *Environmental Technology & Innovation, 19*, 101217.

Lares, M., Ncibi, M. C., & Sillanpää, M. (2018). Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research, 133*, 236–246.

Le, T.-M.-T., Truong, T.-N.-S., Nguyen, P.-D., Le, Q.-D.-T., Tran, Q.-V., Le, T.-T., Nguyen, Q.-H., Kieu-Le, T.-C., & Strady, E. (2023). Evaluation of microplastic removal efficiency of wastewater-treatment plants in a developing country, Vietnam. *Environmental Technology & Innovation, 31*, 102994.

Lee, J.-H., Cheon, S.-J., Kim, C.-S., Joo, S.-H., Choi, K.-I., Jeong, D.-H., Lee, S.-H., & Yoon, J.-K. (2024). Nationwide evaluation of microplastic properties in municipal wastewater treatment plants in South Korea. *Environmental Pollution, 358*, 124433.

Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G., & Song, M. (2023). Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environmental Health, 1*, 249–257.

Lian, Y., Wang, X., Sun, P., Wang, H., & Fang, C. (2025). Occurrence, characteristics and removal of microplastics in wastewater treatment plants with different treatment processes. *Chinese Journal of Chemical Engineering, 85*, 316–326.

Liebmann, B., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Reiberger, T., & Schwabl, P. (2018). Assessment of microplastic concentrations in human stool: Preliminary results of a prospective study. *United European Gastroenterology Journal, 6*(Suppl. 1), A127.

Long, Y., Zhou, Z., Yin, L., Wen, X., Xiao, R., Du, L., Zhu, L., Liu, R., Xu, Q., Li, H., Nan, R., & Yan, S. (2022). Microplastics removal and characteristics of constructed wetlands WWTPs in rural area of Changsha, China: A different situation from urban WWTPs. *Science of the Total Environment, 811*, 152352.

Luqman, M., Shahid, T., Awan, M. U. F., Kashif, S. U. R., Arooj, F., & Awan, A. R. (2023). Quantification and characterization of microplastics (MPs) pollution in peri-urban agricultural lands of Lahore, Pakistan. *PLoS One, 18*.

Maw, M., Boontanon, N., Aung, H. K. Z. Z., Jindal, R., Fujii, S., Visvanathan, C., & Boontanon, S. K. (2024). Microplastics in wastewater and sludge from centralized and decentralized wastewater treatment plants: Effects of treatment systems and microplastic characteristics. *Chemosphere, 361*, 142536.

Menéndez-Manjón, A., Martínez-Díez, R., Sol, D., Laca, A., Rancaño, A., & Díaz, M. (2022). Long-term occurrence and fate of microplastics in WWTPs: A case study in Southwest Europe. *Applied Sciences, 12*(4), 2133.

Miranda, M. N., Silva, A. M. T., & Pereira, M. F. R. (2020). Microplastics in the environment: A DPSIR analysis with focus on the responses. *Science of the Total Environment, 718*, 134968.

Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology, 11*, 580709.

Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology, 50*(11), 5800–5808.

Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2016). Release of synthetic microplastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Marine Pollution Bulletin, 112*(1–2), 39–45.

Nizzetto, L., Futter, M., & Lang, A. S. (2016a). Pollution: Do microplastics spill on to farm soils? *Nature, 537*(7621), 488.

Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016b). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology, 50*(21), 10777–10779.

Park, H. J., Oh, M. J., Kim, P. G., Kim, G., Jeong, D. H., Ju, B. K., Lee, W. S., Chung, H. M., Kang, H. J., & Kwon, J. H. (2020). National reconnaissance survey of microplastics in municipal wastewater treatment plants in Korea. *Environmental Science & Technology, 54*(3), 1503–1512.

Perren, W., & Wojtasik, A., Cai, Q. (2018). Removal of microbeads from wastewater using electrocoagulation. *ACS Omega, 3*(4), 3357–3364.

Prata, J. C. (2018). Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. *Marine Pollution Bulletin, 129*(1), 262–265.

Rahman, M. M., & Toha, M., Sikder, S. (2024a). Micro/nanoplastics pollution from landfill sites: A comprehensive review on the formation, distribution, effects and potential mitigation. In *Springer Water* (pp. 247–265).

Rahman, R.-R., Baqee, A., Alam, M., Khan, M. W., Muhib, M. I., & Kabir, A. (2024b). Organ-specific bioaccumulation of microplastics in market fish of Dhaka and size-dependent impacts of PVC microplastics on growth of Anabus testudineus. *Environmental Pollution, 361*, 124807.

Rajala, K., Grönfors, O., Hesampour, M., & Mikola, A. (2020). Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals. *Water Research, 183*, 116045.

Reisser, J., Shaw, J., Wilcox, C., Hardesty, B. D., Proietti, M., Thums, M., & Pattiaratchi, C. (2013). Marine plastic pollution in waters around Australia: Characteristics, concentrations, and pathways. *PLoS ONE, 8*(11), e80466.

Ren, H., Zhao, H., Wang, H., Niu, B., Wang, Y., Lu, Y., Jiang, G., Zhang, Z., & Hao, Z. (2024). Identification and assessment of microplastics in wastewater treatment plants using laser direct infrared spectroscopy and depolymerization-coupled liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Hazardous Materials, 495*, 138852.

Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports, 7*, 1362. https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7

Rochman, C. M., Kross, S. M., Armstrong, J. B., Bogan, M. T., Darling, E. S., Green, S. J., Smyth, A. R., & Veríssimo, D. (2015). Scientific evidence

supports a ban on microbeads. *Environmental Science & Technology, 49*(18), 10759–10761.

Salmi, P., Ryymin, K., Karjalainen, A. K., Mikola, A., Uurasjärvi, E., & Talvitie, J. (2021). Particle balance and return loops for microplastics in a tertiary-level wastewater treatment plant. *Water Science and Technology, 84*(1), 89–100.

Sangkham, S., Faikhaw, O., Munkong, N., Sakunkoo, P., Arunlertaree, C., Chavali, M., Mousazadeh, M., & Tiwari, A. (2022). A review on microplastics and nanoplastics in the environment: Their occurrence, exposure routes, toxic studies, and potential effects on human health. *Marine Pollution Bulletin, 181*, 113832.

Sarti, C., Cincinelli, A., Bresciani, R., Rizzo, A., Chelazzi, D., & Masi, F. (2024). Microplastic removal and risk assessment framework in a constructed wetland for the treatment of combined sewer overflows. *Science of the Total Environment, 952*, 175864.

Shan, W., Li, B., Zhang, H., Zhang, Z., Wang, Y., Gao, Z., & Li, J. (2022). Distribution, characteristics and daily fluctuations of microplastics throughout wastewater treatment plants with mixed domestic–industrial influents in Wuxi City, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering, 16*, 1440.

Sharifi, H., Movahedian Attar, H., & Bina, B. (2023). Occurrence and removal of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with conventional activated sludge process: A case study in Isfahan, Iran. *Environmental Health Engineering and Management, 10*(1), 59–66.

Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro)plastic crisis: An ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production, 254*, 120138.

Sol, D., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2020). Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments. *Science of the Total Environment, 740*, 140016.

Ta, A. T., & Promchan, N. (2024). Microplastics in wastewater from developing countries: A comprehensive review and methodology suggestions. *Trends in Analytical Chemistry, 171*, 117537.

Tadsuwan, K., & Babel, S. (2022). Microplastic abundance and removal via an ultrafiltration system coupled to a conventional municipal wastewater treatment plant in Thailand. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*(3), 107142.

The United Nations. (2017). *World water development report*. https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2017 adresinden 6 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır.

Thompson, R. C. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science, 304*(5672), 838.

Üstün, G. E., Bozdaş, K., & Can, T. (2022). Abundance and characteristics of microplastics in an urban wastewater treatment plant in Turkey. *Environmental Pollution, 310*, 119890.

Van Do, M., Le, T. X. T., Vu, N. D., & Dang, T. T. (2022). Distribution and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants. *Environmental Technology & Innovation, 26*, 102286.

Vardar, S., Onay, T. T., Demirel, B., & Kideys, A. E. (2021). Evaluation of microplastics removal efficiency at a wastewater treatment plant discharging to the Sea of Marmara. *Environmental Pollution, 289*, 117862.

Viitala, M., Tsering, T., Hyvonen, M., Reinikainen, S. P., & Mänttäri, M. (2025). Microplastic budgets and discharges to Lake Saimaa from three Finnish wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management, 389*, 126093.

Wang, Q., Li, Y., Yang, X., Van Hulle, S. W. H., & Rousseau, D. P. L. (2024). Microplastics in two different constructed wetlands systems for wastewater treatment: Removal and fate. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 12*, 114341.

Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution, 178*, 483–492.

Wu, Z. W., Liu, G. F., Song, S. X., & Pan, S. B. (2014). Regeneration and recycling of waste thermosetting plastics based on mechanical thermal coupling fields. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 15*(12), 2639–2647.

Xu, S., Ma, J., Ji, R., Pan, K., & Miao, A. J. (2020). Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects. *Science of the Total Environment, 703*, 134699.

Yang, F., Li, D., Zhang, Z., Wen, L., Liu, S., Hu, E., Li, M., & Gao, L. (2022). Characteristics and the potential impact factors of microplastics in wastewater originated from different human activity. *Process Safety and Environmental Protection, 166*, 78–85.

Yang, Z., Li, S., Ma, S., Liu, P., Peng, D., Ouyang, Z., & Guo, X. (2021). Characteristics and removal efficiency of microplastics in sewage treatment plant of Xi'an City, northwest China. *Science of the Total Environment, 771*, 145377.

Yong, C. Q. Y., Valiyaveetill, S., & Tang, B. L. (2020). Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*, 1509.

Yuan, F., Zhao, H., Sun, H., Sun, Y., Zhao, J., & Xia, T. (2022). Investigation of microplastics in sludge from five wastewater treatment plants in Nanjing, China. *Journal of Environmental Management, 301*, 113793.

Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. *Science of the Total Environment, 715*, 136968.

Zeri, C., Adamopoulou, A., Koi, A., Koutsikos, N., Lytras, E., & Dimitriou, E. (2021). Rivers and wastewater-treatment plants as microplastic pathways to eastern Mediterranean waters: First records for the Aegean Sea, Greece. *Sustainability, 13*(10), 5328.

Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the "plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology, 47*(13), 7137–7146.

Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., & Gao, P. (2021b). Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China. *Journal of Cleaner Production, 291*, 125968.

Zhang, Y., Wang, H., Xu, J., Su, X., Lu, M., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021a). Occurrence and characteristics of microplastics in a wastewater treatment plant. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 107*(4), 677–683.

Zhao, B., Rehati, P., Yang, Z., Cai, Z., Guo, C., & Li, Y. (2024a). The potential toxicity of microplastics on human health. *Science of the Total Environment, 912*, 168946.

Zhao, S., & Zhang, J. (2023). Microplastics in soils during the COVID-19 pandemic: Sources, migration and transformations, and remediation technologies. *Science of the Total Environment, 883*, 163700.

Zhaxylykova, D., Alibekov, A., & Lee, W. (2024). Seasonal variation and removal of microplastics in a central Asian urban wastewater treatment plant. *Marine Pollution Bulletin, 205*, 116597.

Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., & Leusch, F. D. L. (2017). Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research, 112*, 93–99.

Gıda Kurutma İşlemlerinde Ürün Özelliklerinde Meydana Gelen Değişiklikler

Zehra YILDIZ

Prof. Dr.; Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü. zyildiz@tarsus.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1304-4857

ÖZET

Gıda ürünleri uzun süreler boyunca bozulmadan muhafaza edilmesi için kurutulurlar. Kurutma işleminde gıda ürünündeki nem ısı etkisi ile buharlaştırılarak mikroorganizma faaliyetlerini en az düzeye veya engelleyecek orana düşürülür. Buharlaşma için gereken ısı mikrodalga, kızılötesi, elektrik ve hava ile sağlanabilir. Kurutucu türleri ısı transferine ve ısının hangi kaynaktan elde edildiğine göre değişmektedir. Kurutma sıcaklığına göre kurutulan üründe bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Kurutma sıcaklığı yüksek olduğunda üründe kabuklaşma, büzülme, çatlama, çekme, renk kaybı, besin değerlerinin düşmesi, duyusal özelliklerin olumsuz etkilenmesi, kırılganlık ve sertlik gibi istenmeyen değişiklikler gerçekleşebilmektedir. Kurutma sırasında veya sonrasında kurutulan üründe meydana gelen olumsuz değişiklikler fiziksel ve kimyasal değişiklikler olarak iki grupta incelenmektedir. Kurutma işleminde üründe meydana gelen fiziksel değişikler, kabuk oluşumu, büzülme, çekme, çatlama, çökme, rehidrasyon kapasitesinin düşmesi ve çözünür madde göçüdür. Kurutma işleminde üründe meydana gelen kimyasal değişikler ise çözünebilme kapasitesinde azalma, arama kaybı, tat kaybı, renk değişikliği, protein kaybı, vitamin kaybı, lipid oksidasyonu ve karamelizasyondur. Ayrıca kimyasal ve fiziksel değişimlerin yanı sıra mikrobiyolojik değişimlerde meydana gelmektedir. Bu çalışmada kurutma işlemi sırasında fiziksel değişiklikler, kimyasal değişiklikler ve mikrobiyolojik değişiklikler açıklanmıştır. Bu değişikliklerin önlenmesi veya etkisinin daha az olması için kurutma işlemleri öncesi uygulanacak ön kurutma teknikleri kullanılabilir. Ön kurutma işlemleri ozmotik dehidrasyon, daldırma, çözeltide bekletme, kükürtleme, tuzlama ve haşlamadır. Kurutma işleminde üründe ortaya çıkan olumsuzlukları gidermek için kurutma sıcaklığı iyi ayarlanmalı ya da ürüne ön işlemler uygulanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Büzülme, Renk Kaybı, Besin Kaybı.

GİRİŞ

Gıda ürünlerinin pastörizasyon, soğutma, dondurma, kimyasal işleme ve kurutma gibi işlemlerle ürünün bozulmadan uzun süre saklanabildiği uzun raf ömrü sağlanabilir. Gıda kurutma işlemi, gıda ürününün başlangıç nem içeriğinin %60-80'den yaklaşık %10-25'e kadar azaltılması için suyun kontrollü koşullarda buharlaştırılarak besinden uzaklaştırıldığı en eski ve en yaygın uygulanılan gıda muhafaza yöntemlerinden biridir. Gıda maddelerinin kurutulması ile uzun raf ömürlü ve katma değeri yüksek kuru ürünler elde edilirken diğer taraftan nem kaybı ile ağırlık ve hacmin azaldığı için taşıma, depolama ve paketleme daha ekonomik hale gelir (Ertekin ve Yaldız, 1998; Yıldız ve Gökayaz, 2020). Kuru meyveler taze halleriyle karşılaştırıldığında tat ve aroma değişimi, kimyasal bileşimde değişiklikler, renk kayıpları, besin

kayıpları, yapının ve gözeneklerin modifikasyonu şekilde belirgin değişiklikler ortaya çıkar (Denge, 2011).
Gıda kurutma işlemlerinde birçok fiziksel, kimyasal, biyokimyasal ve mikrobiyolojik olaylardan biri ya da birden fazlası aynı anda gerçekleşmekte ve bu olaylar son ürünün kalite özelliklerinde kayba neden olan istenmeyen bazı fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir. Kurutma işlemi sırasında, gıda maddelerinde gözlenen değişimler, gıda ürünün içerdiği nemin miktarına, kurutma sıcaklığına ve kurutma süresine bağlıdır. Gıda ürünlerinin kurutulmasında çeşitli kurutma yöntemleri ve kurutucular kullanılmaktadır. Uygulanan kurutma yönteminin, kuru ürünün kalitesi üzerine önemli etkileri vardır. Kurutulacak ürünün nem içeriği, kurutma sıcaklığı, kurutma süresi kurutucu türüne göre değiştiği için en uygun kurutucu türünün tasarımı yapılmalı veya uygun kurutucu ya da kurutma yöntemi seçilmelidir. Gıda ürünlerin kurutulmasında, kurutma koşulları ve kurutma yönteminin uygun seçilmemesi sonucu özellikle kabuklaşma, kararma, kitle yoğunluğunda olumsuz değişiklik, beslenme değerinde meydana gelen kayıplar ve mikroflora da olumsuz değişiklikler meydana gelmektedir (Saçılık, 2023). Kurutulan ürünlerde su da çözünmüş maddeler ve su buharı ile taşınan uçucu bileşenler de uzaklaşmaktadır. Özellikle kurutma işleminde gıda maddesinin içerdiği suyun buharlaştırılması için yüksek sıcaklık uygulandığı durumda kurutulan ürünlerde rehidrasyon kapasitesi azalmakta, ısısal bozulma ile renk değişimi olmakta, çekme, çökme, büzülme, kabuklaşma, çatlama, doku kaybı, istenmeyen tat, aroma, koku değişimleri ve önemli besin kayıpları olmaktadır. Bu sebeple, proses optimizasyonu ile kurutma koşullarının gıda ürününe etkisi ve uygun kurutma koşulları belirlenmelidir (Arın, 2006).

KURUTULMUŞ ÜRÜNÜN YAPISINDA MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLER

Kuru gıda ürünlerinin besleyici, lifli, vitamin ve mineral içeriğinin yüksek olması son zamanlarda tüketiciler tarafından sağlıklı beslenme için tercih edilir bir besin olmasına sebep olmuştur. Kurutma sırasında veya sonrasında gıda ürününde yoğunluk, porozite, gözenek boyutu, özgül hacim gibi yapısal özellikler; matlık, parlaklık, canlılık, görünüş gibi renk özellikleri; çökme, büzülme, çekme gibi dokusal özellikler; camsılaşma, kristalleşme, lastikleşme gibi ısıl özellikler; aroma, tat, lezzet gibi duyusal özellikler; vitamin, protein içeriği gibi beslenme özellikleri ve rehidrasyon hızı, rehidrasyon kapasitesi gibi rehidrasyon özelliklerinde istenmeyen olumsuz değişiklikler kuru ürün kalitesini etkiler (Kovacı vd., 2018). Tablo 1 de gıda ürünlerinin kurutulması

sırasında son kalite özelliklerinde genellikle görülen fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik değişikliklerle besin kayıpları gösterilmiştir (Panjagari, 2018).

Tablo1: Kurutulmuş gıdaların kalite özelliklerinde meydana gelen değişiklikler

Fiziksel Değişiklikler	**Kimyasal Değişiklikler**	**Mikrobiyolojik Değişiklikler**	**Besin Kayıpları**
Rehidrasyon kapasitesi	Esmerleşme	Patojen oluşumu	Vitamin kaybı
Çözünür madde göçü	Oksidasyon		Protein kaybı
Doku kaybı	Renk kaybı		İşlevsellik kaybı
Aroma kaybı			
Büzülme			
Kabuklaşma			
Gözeneklilik kaybı	Aroma ve tat kaybı	Toksin oluşumu	Yağ asidi kaybı

FİZİKSEL DEĞİŞİKLİKLER

Kurutma süresi boyunca ve kurutma işlemi bittikten sonra yaygın olarak istenmeyen fiziksel değişimler görülür. Gıda ürünlerinin yüksek sıcaklıklar gibi uygun olmayan koşullarda ve yanlış yöntemler ya da kurutucularla kurutulması ürünün şekil ve boyut değişimine sebep olur. Hücrelerin ve gözeneklerin çökmesi, büzülmesi, çatlaması, çekmesi ve kabuklaşması şekilsel ve boyutsal değişimlerdir. Kurutma işleminde uzaklaşan nem ile beraber çözünür madde kaybı, besin kaybı ve doku kaybı da gerçekleşir. Ayrıca ürünün tekrar su tutma özelliği olan rehidrasyon kapasitesi de düşer.

Kabuk Oluşumu

Kurutma işleminin başlangıcında, kurutma hızı ve kurutma sıcaklığı yüksek ise kurutulacak ürününün yüzeyi kabuk bağlayabilir. Kabuk oluşumu ile kuruma hızı birden düşer. Büzülme ve diffüzitenin azalması birleşince bir kabuk oluşur, neme karşı geçirimsiz bir kitle ile materyal çevrilip kapatılmış olur. Buna kabuk oluşumu denir. Kuruma sonucu büzülme olmayan üst tabakalar gerilir ve sert bir kabuk oluşturur. Kabuklaşma çözünür kuru madde göçü sebebiyle de meydana gelebilir. Bu durum özellikle şeker içeriği yüksek olan meyvelerin kurutulmasında ürün yüzeyinde gözlenir. Yüzeyde oluşan kabuk alt tabakaların su direncini artırarak nem kaybını baskılar ancak nemli olan alt tabakalar basınca direnç gösterir. İç kısımlardaki su bu tabakayı aşamadığından kuruma durur. İçi ıslak, dışı kuru, yüzeyi kırılgan ve sert bir

ürün elde edilir. Daha düşük sıcaklıkta ve nemli hava ile kurutma ile kabuk oluşumu engellenebilir (Ayan, 2010; Saçılık, 2023). Çoğu gıda ürünü çok yüksek sıcaklıkta yapıldığında yüzeyde bir araya toplanan sıkıca paketlenmiş büzülmüş hücrelerden ibaret olan bu katı tabaka, yüzey üzerinde sıvı veya buhar akışına geçirgen olmayan ve kurutma hızını yavaşlatan kabuk sertleşmesine neden olur (Geankoplis, 2011).

Büzülme

Gıda ürünleri kurutulurken çekme, büzülme ve çökme gibi durumlar ürünün şeklinin ve boyutunun değişimine sebep olur. Bu olumsuz değişiklikler ürünün gözenekliliğini, gevrekliğini, çiğnenebilirliğini etkiler, hacim azalmasına ve tekstür yapısının bozulmasına yol açar (Saçılık, 2023).
Kuruma sırasında gerçekleşen en önemli yapısal değişikliklerden birisi çekmedir. Genelde kurumanın başlangıç aşamalarında gerçekleşen gıda yapısının çökmesi sonucu görülür. Meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında yapısal çekme ve çökme kaçınılmazdır özellikle yapısal çekmenin engellenmesi çok zordur. Düşük sıcaklıklarda yapılan dondurarak kurutma gibi kurutma işlemlerinde, çekme belli ölçülerde engellenebilir. Kurutma koşulları ılımlı olduğunda materyal yüzeyi, materyalin iç kısımlarına göre daha fazla ve hızlı kurumasına neden olmaz. Kuruma sonundaki yığın yoğunluğu kaybedilen su kadar azalır. Kurutma işleminde bir dış tabaka oluşursa kuruyan alt tabakanın üzerinde çökme gerçekleşmediğinden kuru ürün içinde kat kat boşluk ve çatlaklar oluşur. Bu şekilde kuruyan ürünün dış görünüşü taze haline benzer, sanki hiç çekme olmamış veya çok az olmuş gibi görünür. Kuru üründe yığın yoğunluğu çok azdır (Yokuş, 2014; Saçılık, 2023). Ürünün birim hacminin ağırlığına kitle yoğunluğu denir ve kurutulmuş ürünün bir kalite ölçüsüdür. Kurutulmuş bir ürünün kitle yoğunluğu, kurutma koşullarına göre değişir (Geankoplis, 2011).
Dengelenmeyen kuvvetlerin oluşması nedeniyle kuruma prosesi boyunca büzülme üniform olmadığı zaman çatlaklar meydana gelir. Büzülme oranı, ürünün kurutma sonrası hacminin taze halindeki hacmine oranıdır. Büzülme, ürün boyutunu, yapısını, rengini, tadını ve aroması gibi ürünün kalite özelliklerini etkileyen önemli bir sorundur. Kurutma hızını çoğunlukla etkileyen önemli bir faktör, nemin azalmasıyla ürünün büzülmesidir. Büzülme nem içeriğinin azalmasıyla artarken ürüne ve kurutma yöntemine göre farklılık gösterir. Kuruma işleminde yüzeyden su buharlaştığı için yüzey sıvısında çözünen derişimi artar. İç kısımlardaki su derişim farkı nedeniyle hücre duvarından dış yüzeye hareket eder. Büzülme stresi etkisiyle hücre duvarı zarar görür ve ürün içinde boşluklar oluşur. Nemli ve gergin olan dış yüzey sıkıştırılamayan iç yüzeyin üzerinde büzüşür. Kurumanın ilerlemesiyle dış yüzeydeki hücrelerin hacmi azalırken büzülür. Büzülme olayında, ürün yüzey alanı ve moleküler difüzyon mesafesi değiştiği için ısı ve kütle transferi etkilenerek kuruma hızı sınırlanır (Arın, 2006; Geankoplis, 2011; Saçılık,

2023). Kurutma hızı ve katıdaki derişim gradyanı düşürülerek boyutsal değişiklikler önlenebilir. Böylece ürün içinde difüzivite yaklaşık sabitlenmiş olur, yüzeydeki nem gradyanı yassılaşmış ve büzülmeye karşı ürün korunmuş olur (Arın, 2006).
Ürün büzülmez yani kurutma öncesi boyutlarını korusa, kurutma sonundaki kitle yoğunluğu sadece kaybedilen su kadar azalır. Özellikle gıda ürünleri kurutulurken büzülür sadece sert ürünlerde önemli oranda büzülme görülmez. Elastik özellik gösteren gıda ürünlerinden uzaklaşan su miktarı ile büzülme oranı doğru orantılı olarak değişir. Her ürün kurutma koşullarına bağlı olarak kendine özgü bir büzülme gösterir. Buna göre kurutulan ürünün hacmi değiştiği için kitle yoğunluğu da değişir. Ilımlı kurutma koşulları uygulandığında tüm kitle beraber kuruduğu için ürünün kitle yoğunluğu artar (Geankoplis, 2011). Kitle yoğunluğu, kurutma koşullarına göre değişir. Kitle yoğunluğu düşük olan ürünler aynı kütledeki üründen daha fazla görünmesi ve kuru ürünün taze haline daha çok benzemesi sebebiyle tüketici tarafından daha fazla tercih edilir. Ancak bu ürünlerin ambalaj, depo ve taşıma masrafları daha fazladır (Denge, 2011).

Rehidrasyon Kapasitesi

Rehidrasyon kapasitesi, hücre yapısı, deformasyon ve su tutma kapasitesi gibi fiziko-kimyasal değişimleri gösterdiğinden kurutulmuş ürünün kalitesini kontrol etmek için önemlidir. Kuru ürünlerin rehidrasyon kapasitesinin yüksek olması istenir. Rehidrasyon kapasitesi, kuru ürünün suya konulduğunda taze durumunda içerdiği kadar su alarak kurutulmadan önceki durumuna ve şekline dönüşebilme oranıdır. Dondurularak kurutulan ürünler su da bekletildiğinde ilk halini ve şeklini muhafaza edebilirken geleneksel kurutma yöntemlerinde ürün şeklini önemli ölçüde kaybeder. Kurutulmuş bir ürünün rehidrasyon yeteneği, kuru ürünün suda belli koşullarda tutulması sonucunda bünyesine aldığı su miktarı ile ölçülür (Saçılık, 2023). Kurutulmuş bir ürünün rehidrasyon özellikleri kurutma esnasında meydana gelen kimyasal ve yapısal değişimler, özellikle suyun sıcaklığı ve bekleme süresi gibi kurutma koşulları, kurutma ön işlemleri ve ürün içeriği ile ilgilidir. Yapısal ve hücresel bozulmalar minimize edildiğinde rehidrasyon oranı en yüksek seviyeye ulaşabilir. Rehidrasyon derecesi de yapısal bozulma derecesine bağlıdır (Anonim, 2010). Büzülme, kurutma sırasında çekme, daralma ve sertleşme nedeniyle ürünün yüzeyinde, boyutlarında ve şeklinde değişimine neden olduğu için içerden yüzeye su transferi zorlaşır ve kurutma hızı düşer. Bu durum ürünün rehidrasyon kapasitesini de etkiler (Ayan, 2010; Yokuş, 2014). Ayrıca rehidre edilmiş ürünün doku özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Difüzyon, kapilarite gibi suyun kütle transfer mekanizmaları, ürünün nem içeriği ve kurutulduktan sonraki meyve içindeki nem dağılımı, ürünün mikro yapısı, sorpsiyon ve rehidrasyon davranışı ve yüzey sertleşmesi için belirleyicidir. Kurutulmuş ürünlerde hızlı ve tam rehidrasyon istenirken

ürünlerin rehidrasyon kapasitesi ile ürünlerde yapısal çökmelerin de arttığı gözlemlenmiştir. Kurutma sırasında meydana gelen yapısal değişiklikler, ürünün su ortamında bekletilmesi ile geri alınamaz (Saçılık, 2023).

Çözünür Madde Göçü

Kurutma sırasında nem ile beraber aynı zamanda su da çözünmüş maddelerinde bir kısmı uzaklaşır. Kurutmada nem kaybı artarken katı kazanımı düşebilir. Kurutma sırasında üründen çözünür kuru madde transfer hızına bağlı olarak ürün yüzeyinde sertleşme, çekme veya kabuklaşma meydana gelebilir. Gıda ürünlerinde su içerisinde çözünmüş halde küçük moleküllü şekerlerden, tuzlardan hidratlanmış büyük moleküllere kadar birçok bileşeni içerir. Bu bileşenler Kuruma sırasında kurutulan madde içinde hareket eden tek bileşen su değildir çözünmüş maddelerin bir kısmı da madde içinde yer değiştirir. Meyve ve sebzeler toplandıktan sonra da halen canlı oldukları için çözeltideki su ve bazı düşük molekül ağırlıklı moleküller yarı-geçirgen olan hücre duvarı boyunca difüzlenir. Kuruyan yüzey tabakalarındaki çekme, iç kısımlar üzerinde baskı yaratarak meyve veya sebze suyunun gözenek, kılcal veya çatlaklar yoluyla yüzeye taşınır. Sıvı akışına bağlı olarak nem hareketi varsa çözünür maddeler de su ile birlikte yüzeye taşınır. Yüzeye ulaşan sıvının hücre içindeki tüm maddeleri içermektedir. Özellikle erik ve kayısı gibi yumuşak dokulu meyveler kurutulurken yüzeyleri yapışkan ve cıvık bir sıvı ile kaplanır. Su buharlaşıp ayrıldığında yüzeyde kuru madde yığılımı görülür. Yüzeydeki çözünür maddenin derişimi arttığında ise yüzeyden iç kısma çözünen difüzyonu başlar. Hücre sıvısının yüzeye ve hatta dışarı akması da çözünür madde göçüne neden olur. Sıvı faz ortadan kalktığında çözünür madde difüzyonu da durur (Saçılık, 2023).

KİMYASAL DEĞİŞİKLİKLER

Kurutma işleminde gıdaların fiziksel, duyusal özellikleriyle birlikte ürünün kimyasal bileşimlerinde de değişiklik olmaktadır. Gıdaların yapılarında bulunan vitaminler, mineraller ve proteinler gibi bazı besin gruplarındaki bileşikler kurutma işlemi sırasında meydana gelen oksidasyon gibi kimyasal tepkimelerle sonucunda azalır (Ayan, 2010).

Kimyasal değişimler, kurutulmuş ürünün rengine, dokusuna, tadına, aromasına, besleme değerlerine ve depolama stabilitesine etki eder. Kimyasal değişiklikler kurutulan gıda ürüne göre farklılık gösterir. Ayrıca, kurutma

işleminde kurutma koşulları özellikle uygulanan kurutma sıcaklığı bu değişimlerin düzeyini etkileyen en önemli faktördür (Denge, 2011).

Çözünebilme Kapasitesi

Çözünebilme kapasitesi, özellikle toz veya taneli yapıdaki gıdaların kurutulmasında kalite kriteri olarak ele alınır. İşlem koşulları, muhafaza şartları, ürün bileşimi, pH'sı ve tane büyüklüğü çözünebilme kapasitesini etkiler. Yüksek sıcaklıklarda kurutulan gıdalarda protein denatürasyonu gerçekleştiği için çözünürlük önemli oranda düşer (Anonim, 2010).

Aroma ve Tat

Kurutma sırasında gıdaya aroma, lezzet ve tat veren uçucu bileşiklerin kaynama noktası sudan daha az olduğundan nem ile beraber uçucu bileşikler buharlaşarak üründen uzaklaşabilmektedir (Anonim, 2010). Gıdalarda aroma, ürünün tat ve kokusu ile ilgilidir. Gıdaların aroması çeşitli bileşenlerinin bir araya gelmesi ile oluşur. Gıda ürünün lezzet algısında aroma maddeleri oldukça önemlidir. Aroma, tat ve koku veren doğal uçucu aromatik bileşikler gıdaların kurutulması esnasında kayba uğrar. Bu kayıp miktarı, uçucu bileşenlerin buhar basıncı, katı madde miktarı ve çözünürlük gibi etkenlere bağlı oalarak değişir. Ürün lezzetinin maksimum olduğu ve kuruduktan sonra da lezzetini koruduğu için kurutma işleminde tam olarak olgunlaşmış meyveler tercih edilir (Yazar, 2022). Ürüne aroma ve tat veren uçucu bileşiklerin kaynama noktası sudan daha düşük olduğundan kurutma esnasında buharlaşarak üründen uzaklaştığı için aromada azalma meydana gelebilmektedir. Ancak kurutma işleminin başlangıcında ürün yüzeyi üzerinde çepeçevre ince kuru bir tabaka oluşturulabilirse bu bileşikler muhafaza edilebilmektedir (Anonim, 2010). Aromayı hızlı ve tahribatsız bir şekilde algılayan elektronik burun ile aynı zamanda farklı olgunlaşma aşamaları da ayırt edebilir.

Protein Kayıpları

Kurutma işleminde ürünün vitamin, lipid ve protein gibi besin değerlerinin en üst düzeyde korunması öncelikli amaçtır. Düşük sıcaklıkta uygulanan kurutma işleminde daha az besin kaybı meydana gelir. Proteinler, uygulanan kurutma yönteminden, kurutma esnasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal değişimlerden etkisiyle değişime uğrarlar. Kurutma işleminde gıda içerisinde bulunan su içeriği azaldığı için proteinlerin dayanaklılığı artar. Bu sebeple proteinlerin biyolojik değeri ve sindirim özelliği yok olmaz (Yazar, 2022).

Vitamini Kaybı

Gıdalara uygulanan kurutma işlemi özellikle gıdaların yapılarında bulunan vitaminler gibi besinlerin kayıplarına yol açabilmektedir. Bu vitaminler, suda (Vitamin B, C) ve yağda (Vitamin A, D, E, K) çözünebilen olmak üzere iki grup halinde bulunur. Optimum kurutma koşulları sağlandığı takdirde vitamin kayıpları minimum seviyede olur. Düşük sıcaklıkta ve kısa süren kurutma işlemlerinde vitamin kayıpları azaltılabilir (Yazar, 2022). Kurutulmuş gıdalarda B vitamini kayıpları ise genellikle %10'dan azdır. Kurutulmuş ürünlerdeki A vitamini oksijen yokluğunda önlenebilir (Panjagari, 2018).
C vitamini veya diğer adıyla askorbik asit genellikle kurutma sırasında gerçekleştirilen ısıtma sebebiyle kurutma sırasında büyük ölçüde ya düşer ya da yok olur. C vitamini yüksek nem ve yüksek sıcaklığa karşı duyarlı olduğu için kurutma sırasında C vitamini kaybını azaltmak için düşük sıcaklıkta ve sıcaklığın kademeli olarak artırıldığı koşullarda kurutma işlemi yapılmalı ve ürünün nem içeriği düşürülmelidir (Anonim, 2010).
Renk esmerleşmesine yol açan askorbik asit oksidasyonunda askorbik asit, furfural ve karbondioksite ayrışır. Okidasyon tepkimesi özellikle turunçgillerin meyve sularında meydana gelmekte ve yüksek sıcaklıklarda maillard tepkimesi ile birlikte yürümektedir. Tepkime hızı pH değeri ile zıt ilişkilidir (Denge, 2011).

Lipid Oksidayonu

Lipid oksidasyonu, serbest radikallerin katalitik etkiye yol açan metallerin oksijen ile olan tepkimesi sonucu gerçekleşir. Lipid oksidasyonu özellikle kurutulmuş gıdalarda bozulmasından birçok gıda ürününün tadında acılaşma gibi istenmeyen tat değişimlerine, koku kaybına, yağda çözünen vitamin ve pigmentlerin kaybına kadar birçok soruna neden olur. Oksidasyon oranını etkileyen faktörler arasında ürünün nem miktarı, yağ asitleri, enzim aktivitesi, tepkime süresi, tepkime derecesi, oksijen içeriği, sıcaklık, metallerin varlığı, doğal anti oksidanların varlığı, UV ışığı, protein, serbest aminoasit içeriği diğer kimyasal reaksiyonlar bulunur. Nem içeriği oksidasyon tepkime hızında etkili olmakta ve su aktivitesi yaklaşık 0.3 civarında olduğunda oksidasyona karşı direnç en yüksek seviyede olduğundan oksidasyon önemli ölçüde azalmaktadır. Kurutma ve depolama sırasında oksijen miktarını minimuma indirerek lipit oksidasyonu engellenebilir veya azaltılabilir (Anonim, 2010; Yazar, 2022; Panjagari, 2018).

Karamelizasyon

Karamelizasyon, meyvelerde bulunan şekerin erime noktasının üzerinde ısıtıldığında kararmayla beraber ürün renginin kahverengileşir ve tadı acılaşmaktadır. Karamelizasyon hem asidik ve hem de bazik pH'da

gerçekleşmektedir. Asidik karamelizasyonda 1,2 Enediol dehidratasyonla Hidroksimetilfurfurala (HMF) dönüşür ve HMF polimerize olur. Bazik karamelizasyonda ise heksozların önce enediol, daha sonra gliserin aldehit ve trioz aldehide dönüşür. Bu aldehitlerin polimerizasyonu ile pigment oluşur. Karamelizasyon birçok gıdada proses kontrolü yetersizliğinden ve aşırı ısıtmadan kaynaklanmaktadır (Denge, 2011).

Renk Değişimi

Kuru gıda ürünü seçiminde ve tüketiminde ürünün sertliği, aroması, tadı ve lezzeti gibi duyusal özelliklerinin yanısıra rengi önemli bir parametredir. Kurutma işleminde kurutulan ürünün renginde solma, esmerleşme, parlaklık kaybı gibi istenmeyen renk değişimleri olmaktadır. Bir gıda ürününün kurutulması sırasında, karşılaşılan en önemli sorunlardan biri esmerleşme veya kararma olarak bilinen renk değişimidir. Renk esmerleşmesi kurutmadan önce, kurutma sırasında veya depolama süresince oluşabilir. Esmerleşme az ise ürünün sadece görünüşünde kusur vardır ama ileri derecede esmerleşme var ise ürünün tat, koku ve rehidrasyon yeteneğinde önemli oranda bozulma vardır. Esmerleşme derecesi ürününün hatalı ya da yanlış koşullarda kurutulmasıyla ilgilidir (Saçılık, 2023).
Esmerleşme tepkimeleri, renk değişikliğinin yanısıra çözünürlük ve besin değerlerinin azalmasına, tat kaybına ve yapısal değişimlere sebep olmaktadır. Esmerleşme enzimatik veya enzimatik olmayan tepkimeler sonucu gerçekleşebilir. Enzimatik olmayan esmerleşme tepkimeleri, askorbik asit bozunması, karamelizasyon ve Maillard tepkimesidir. Bunlardan en önemlisi Maillard tepkimesidir. Maillard tepkimesinde renk değişiminin yanısıra besin değerinde kayıplar yaşanırken istenmeyen acı bir tat ve koku meydana gelmektedir. Maillard tepkimesi ortamdaki suya bağımlı olarak gelişir. Esmerleşme tepkimeleri, orta seviyeli nem miktarında hızlanır, çok düşük ve yüksek nem oranlarında yavaşlar. Çok düşük su aktivitelerinde tepkenlerin mobilitelerinin sınırlı olduğu için tepkime yavaşlar su aktivitesi artınca tepkime hızlanır. Bu nedenle orta nemli gıdalarda hızlı bir esmerleşme meydana gelir. Özellikle meyve gibi ürünlerde enzim faaliyetleriyle, başta polifenoller olmak üzere birçok maddenin yükseltgenmesine bağlı enzimatik renk esmerleşmesi meydana gelir (Ayan, 2010; Anonim, 2010). Ayrıca nem uzaklaştırma hızı, kuruyan ürünlerin renk değişikliklerini doğrudan etkiler. Renk esmerleşmesini engellemek için kurutmadan önce ürüne uygulanacak soğuk daldırma, askorbik aside daldırma gibi çeşitli çözeltilere daldırma ve kükürtleme işlemleri uygulanabilir. Eğer uygun kurutma koşulları altında ürünün renk değişiminin önüne geçilebilir ya da daha az renk kaybı sağlanabilir. Sıcaklık, nem miktarı ve pH değeri kurutulmuş gıdaların kararma derecesini etkileyen faktörlerin başında gelir. Renk aynı zamanda ısıl işlem şiddetinin bir göstergesi olduğu için yüksek sıcaklık değerlerinde uygulanan kurutma işlemleri renk kaybına neden olur (Yıldız, 2024).

En yaygın kullanılan renk tanımlama modelleri Munsell, CMYK, RGB, CIE XYZ, Hunter Lab, CIE Lab (L, a, b) ve CIE L, C, h'dir (Keskin vd., 2017). CIE Lab (L, a, b) renk kaybının belirlenmesinde öncelikle üründeki kalite kontrol için başvurulan bir tanımla modelidir. L değeri 0 ile 100 arasında değer alır. L değeri, parlaklığı göstermekte olup, daha yüksek L değerlerinde ürün daha parlaktır. a ve b renk değerleri (-60)-(+60) arasında değişir. a değeri pozitif ise kırmızılığı, negatif ise yeşilliği belirtir. b değeri pozitif ise sarılığı ve negatif ise maviliği belirtir. L, a ve b renk değerleri ürün hakkında tek başına bir anlam ifade etmez ve bu değerler kullanılarak renk değeri açısından önemli olan kırmızılaşma indeksi, kahverengileşme indeksi, beyazlık indeksi, kroma, toplam renk değişimi ve hue açısı hesaplanır (Yıldız, 2023).
Toplam renk değişikliği (ΔE), kurutma sırasında renk değişimini gösterir. ΔE eşitlik 1 ile hesaplanır (Kovacı ve Dikmen, 2018).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \qquad (1)$$

Toplam renk değişikliği ΔE'nin aldığı değerlerin DIN 5033 standardına göre değerlendirilmesi Tablo 2 de verilmiştir (Çamlıbel ve Ayata, 2024).

Tablo 2: ΔE kıyaslama kriterleri

ΔE	**Farklılık**
0-0.5	İzlenme Düzeyinde
0.5-1.5	Zayıf
1.5-3.0	Fark Edilebilir
3.0-6.0	Kayda Değer
6.0-12.0	Büyük
>12.0	Çok Açık

Kroma değeri, diğer adıyla renk indeksi, kuru ürünlerin son kalite değerleri hakkında önemli bir fikir vermektedir. Kroma değeri eşitlik 2 ile belirlenip, rengin saflığını veya doygunluğunu göstermektedir. Kroma değerleri soluk renklerde düşük canlı renklerde yüksektir (Yıldız, 2023).

$$K = (a^2 + b^2)^{1/2} \qquad (2)$$

Hue renk açısı (h), a ve b'nin pozitif veya negatif değer almasına göre eşitlik 3'den eşitlik 6'ya kadar olan denklemlerden biri seçilerek hesaplanır (Yıldız, 2023).

$H = \arctan(b/a)$, $(a > 0$ ve $b \geq 0)$ (3)
$H = 180 + \arctan(b/a)$, $(a < 0$ ve $b \geq 0)$ (4)
$H = 180 + \arctan(b/a)$, $(a < 0$ ve $b < 0)$ (5)
$H = 360 + \arctan(b/a)$, $(a > 0$ ve $b < 0)$ (6)

Hue açısı (h^0), renk tonunun göstergesi olup, 360°'lik bir renk dairesi içerisinde Tablo 3'deki gibi tanımlanır. a ve b değerlerindeki düşüş hue açısının daralmasına sebep olur. Bununla beraber üründe kararma sonucu renk sarıdan kahverengileşmeye doğru değişir (Yıldız, 2023).

Tablo 3: Hue açısı kıyaslama kriterleri

h^0	**Renk tonu**
0	Kırmızı-Mor
90	Sarı
180	Mavimsi-Yeşil
270	Mavi

Kırmızılaşma indeksi (KI), a değerinin b değerine oranı olup (a/b) sıcaklığın etkisiyle ürünün kırmızılaştığını gösterir.

Kahverengileşme indeksi (BI), eşitlik 7 ile x katsayısı hesaplandıktan sonra x değeri eşitlik 8 de yerine konularak belirlenir (Polatçı ve Taşova, 2020).

$$x= [a+ (1,75xL)]/[(5,645xL) (a(3,012xb))] \quad (7)$$

$$BI= 100(x -0,31)/ 0,17 \quad (8)$$

Beyazlık indeksi (WI), gıda ürününün genel beyazlığını ve kurutma işlemi sırasında renk kaybının derecesini belirtmek için kullanılır ve eşitlik 9 ile hesaplanır. Beyazlık indeksi (WI), sıcaklıktaki değişime bağlı olarak önemli ölçüde değişir (Mohan vd., 2016).

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (9)$$

Mikrobiyolojik Değişimler

Gıda ürünlerinin kurutulması ile nem oranı belli bir düzeye düşürüldüğünde üründe bulunan küf, bakteri gibi canlı mikroorganizmaların aktif hale gelip çoğalmayacağı için ürünün mikrobiyolojik açıdan bozulma ihtimalinin çok düşüktür. Bu yüzden kuru ürün, uzun süre depolanıp saklanabilmektedir. Kurutma işlemi ile nem miktarı belli seviyeye düşürüldüğü için mikrobiyolojik ve enzimatik aktivite durdurulabilir ya da sınırlandırılıp yavaşlatılabilir. Mikroorganizmalar, uygun su aktivitesi, sıcaklık ve pH değerlerinde aktif hale gelirler. Su aktivitesi, gıda ürününün içerdiği suyun buhar basıncının, aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına (doygun su buharı basıncı) oranıdır. Mikroorganizmaların aktif olmaları için su aktivitesi değeri bakteriler için 0.9, maya ve küfler için 0.7'dir. Su aktivitesi 0.7'nin altına düştüğü zaman mikrobiyolojik faaliyetlerin gerçekleşmez (Yazar, 2022).

SONUÇLAR

Gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için uygulanan kurutma işlemleri sırasında kuru üründe istenmeyen birçok fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Bu olumsuz değişiklikler özellikle tüketici tercihlerini olumsuz etkilediği için kurutma sırasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal değişimler engellenmeli ya da en aza indirgenmelidir.

KAYNAKLAR

Alkaç, O. S., Taşova, M. Karadağ, H. (2019). Tokat ilinde yetiştirilen bazı Gerbera (Gerbera Jamesonıı) çeşitlerinin kalite özelliklerine kurutma yöntemlerinin etkisinin belirlenmesi. 3. Uluslararası ÜNİDOKAP Karadeniz Sempozyumu. Sürdürülebilir Tarım ve Çevre. 21-22-23 Haziran 2019, Tokat.

Anonim, İstanbul Sanayi Odası-İstanbul Teknik Üniversitesi Doktora/Yüksek Lisans Tezlerine Sanayi Desteği Projesi (2010). Gıda İşlemede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri IV. Yayın No: 2010/4, İstanbul.

Arın G. (2006). Kimya Mühendisliğinde Ayırma Teknikleri

Ayan, H. (2010). Güneşte ve yapay kurutucuda kurutulmuş domates (Lycopersitcum esculentum) üretimi ve proses sırasındaki değişimlerin belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı).

Çamlıbel, O., & Ayata, Ü. (2024). Atık bitkisel yağlarla muamele edilmiş İroko (Milicia excelsa Welw. CC Berg) odununda beyazlık indeksi, renk ve parlaklık değerlerinin belirlenmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *25*(1), 15-21.

Denge, A. (2011). Ayvanın Kuruması Sırasında Yapısında Meydana Gelen Fiziksel Değişimlerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Ertekin, C, Yaldız, O. (1998). Bazı Sebze, Meyve ve Baharatlı Bitkilerin Kurutulma Yöntemleri ve Kullanılan Güneş Enerjili Kurutucular, Tarımsal Mekanizasyon 18. Ulusal Kongresi, Tekirdağ,17- 18 Eylül, S. 673-693.

Geankoplis, C. J. (2011). Taşıma Süreçleri ve Ayırma Süreci İlkeleri

Keskin, M., Setlek, P., & Demir, S. (2017). Renk ölçüm sistemlerinin gıda bilimleri ve tarımda kullanım alanları. International Advanced Researches & Engineering Congress, 2350-2359.

Kovacı, T., Dikmen, E. (2018). Kurutma sistemleri, enerji tüketimleri ve ürün kalitesine etkileri ve örnek sistem tasarımı. Teknik Bilimler Dergisi, 8(2), 25-39.

MEB (2013). Gıda Teknolojisi, Sebze ve Meyvelerde Ön İşlemler, Ankara

Mohan A, Shanmugam S, Nithyalakshmi V. (2016). Dondurularak ve Sıcak Havada Kurutulmuş Karpuzun (Citrullus Lanatus) Kabuğunun Besleyici, Fiziko-Kimyasal ve Anti-Besin Özelliklerinin Karşılaştırılması. Biosci Biotech Res Asya. 13(2)

Panjagari, N. R., (2018). Principles of the Food Processing & Preservation,

Saçılık K., Kurutulmuş Ürünün Yapısında Meydana Gelen Değişimler, Kurutma Teknolojisi, Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri, https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=155441. Erişim tarihi: 15.11.2023

Yazar, G. J. (2022). Ökse otu yapraklarını kurutma ve kuru yaprakların depolanmasında bazı biyoaktif bileşenlerin değişimlerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Yıldız, Z., & Gökayaz, L. (2020). Raflı doğal konvektif güneş enerjili kurutucuda elma kuruma kinetiğinin incelenmesi. Engineering Sciences, 15(1), 34-42.

Yıldız, Z. (2023). Farklı Yöntemlerle Kurutulan Muz Halkalarının Renk Analizi. Journal of Agriculture, 6(1), 11-25.

Yıldız, Z. (2024). Gıda Kurutmada Yaygın Kullanılan Kurutma Öncesi İşlemler, BİDGE Yayınevi.

Polatcı, H., & Taşova, M. (2020). Sıcaklık kontrollü mikrodalga kurutucu geliştirilmesi ve portakal kurutma performansının belirlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 131-138.

Yokuş, B. (2014). Farklı ön işlemlerin ve uygulanan farklı kurutma yöntemlerinin elmada toplam fenol miktarı ve antioksidan aktivite üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri İçin Yüzey Kaplama İşlemi Uygulanmış Metalik Bipolar Plakalar

Murat BÖREKÇİ[1]
Ayşegül AŞKIN[2*]

1- Dr..; Osmangazi Üniversitesi,Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, mborekci@gmail.com ORCID No: 0000-0001-9607-9558
2- Prof. Dr.; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, aaskin@ogu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5781-3905

ÖZET

Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC), hidrojen ve oksijeni doğrudan yüksek verimlilikle elektriğe dönüştürerek sıfır emisyon vaat etmekte, özellikle karbon emisyonu yüksek, taşımacılık gibi sektörler için iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Daha hafif, verimli, daha uygun maliyetli ve uzun ömürlü PEMFC hücreleri için yoğun çaba sarf edilmektedir. Bu çabaların yoğunlaştığı nokta PEMFC yığınında temel bileşimi olarak, ağırlıkça ve maliyet açısından önemli yer tutan bipolar plakalardır (BP). Bu çalışmada, literatürde yer alan yeni nesil bipolar plaka (BP) materyallerine yönettik çalışmalar içerisinde yer alan yüzey modifikasyonu işleminden geçmiş metalik BP ler özetlenmiş, metal çeşitleri, kaplama/modifikasyon metotları, kaplama malzemeleri, test sonuçları yönünden incelenmiş ve ticarileşme çabaları kapsamında alınan patentler özetlenmişlerdir.

Anahtar Kelimeleri: Bipolar Plaka, Kaplama, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PEMFC), Yüzey Modifikasyonu.

GİRİŞ

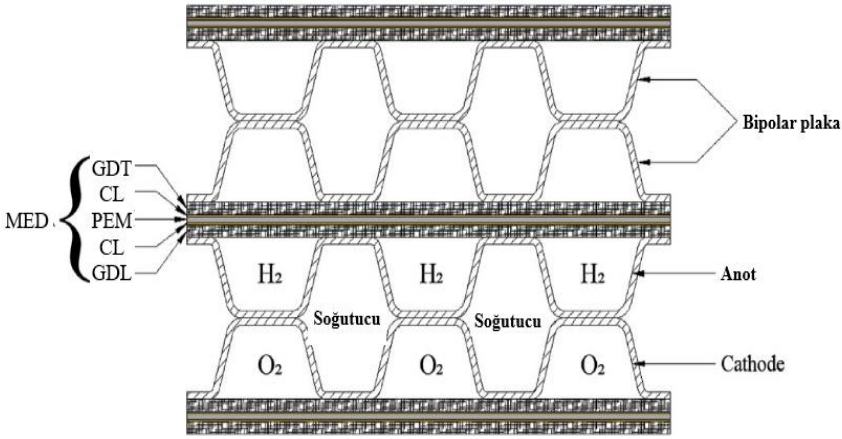
21. yüzyılda hayatımıza giren kavramlardan biri "net sıfır' veya 'net sıfır emisyon" kavramıdır. Bu kavram, atmosfere salınan sera gazı miktarı ile aynı miktarda sera gazının atmosferden uzaklaştırılması veya dengelenmesi durumunu ifade eder. Birleşmiş milletler iklim değişikliği sözleşmesi kapsamında imzalanan Paris anlaşmasının amacı iklim değişikliğini azaltmak ve küresel ısınmayı kontrol altında tutarak olumsuz etkilerini sınırlamaktır. Paris Anlaşması'na göre, küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamak için 2050'ye kadar "net sıfır emisyona ulaşılması hedeflenmiştir. Türkiye de 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu hedef doğrultusunda, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, sanayide dönüşüm, sürdürülebilir tarım uygulamaları, temiz teknoloji yatırımları, döngüsel ekonomi ve karbon yakalama uygulamaları gibi alanlarda çalışmalar yapılmaktadır.

Yenilebilir ve temiz enerji kaynakları arasında, hidrojen, her türlü hava koşullarında kullanımı, bol kaynak, kirletici emisyona neden olmaması ve yüksek yanma değeri gibi avantajları nedeniyle en umut verici yenilenebilir temiz enerji olarak kabul edilir (Gao vd 2024). Hidrojen yakıt hücreleri, farklı yakıtların (çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen yakıtlar dahil) kimyasal enerjilerini elektrokimyasal reaksiyon yoluyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Geleneksel güç üretim kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, yakıt hücreleri Carnot çevriminin sınırlamalarını aşar ve dolasıyla hem teoride hem de pratikte daha yüksek enerji kullanım verimliliğine sahiptir (Ding vd., 2025). Yakıt hücresi, kimyasal enerjiyi diğer geleneksel güç üretim kaynaklarına kıyasla daha iyi verimlilikle (% 40-90

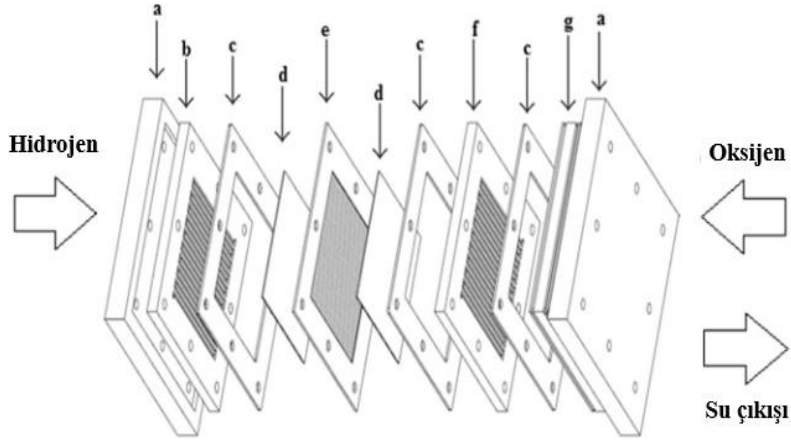
verimlilik) elektrik enerjisine dönüştüren, atık gazlar olmadan ve sessiz çalışan çevre dostu bir elektrokimyasal enerji dönüşüm sistemidir. Yan ürünü olarak ısı ve su üretir (Irshad vd., 2025). Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC'ler), hızlı başlatma, sıfıra yakın karbon emisyonları, uzun hizmet ömrü ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle gelecekteki araçlarda içten yanmalı motorlara göre iyi bir alternatif olma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle hidrojen kullanımı için en umut verici teknolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır (Niu vd., 2025). Net sıfır 2030 yol haritası, dünya çapında 500.000 kamyon ve 10-15 milyon otomobilin hidrojenle çalıştırılmasını öngörmektedir. Bu, binek otomobil pazarının %25'ini, kamyonların %30'unu, otobüslerin %25'ini ve yeni otomobil satışlarının %35'ini temsil etmektedir. 2050 hedefleri arasında 400 milyon yolcu arabası, 5 milyon kamyon ve 15 milyondan fazla otobüs yer almaktadır (Abedin vd. 2025). Pazar büyüklüğü olarak da, yakıt hücreli elektrikli araçların (FCEV) 2021'de 4,98 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmekte ve 2030'a kadar yaklaşık 35,6 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Bu da %53,4'lük bileşik yıllık büyüme oranını yansıtmaktadır. Yakıt hücreli elektrikli araçlar pazarı düşük emisyonlu bir ulaşım çözümü sunmaktadır. Maliyet açısından etkili yakıt hücreli elektrikli araçların geliştirilmesi, petrol bağımlılığımızı azaltacak ve böylece küresel ısınma sorununu hafifletecektir (Tang vd., 2024).

BİPOLAR PLAKA (BP)

PEMFC’ler proton değişim membranı (PEM), katalist tabaka (CT) ve gaz difüzyonu tabakası (GDT) içeren membran elektrot düzeneği (MED) ve bipolar plakadan (BP) oluşmaktadır. Şekil 1. de PEMFC lerin şema kesiti ve Şekil 2 de parçaların dağılmış görüntüsü görülmektedir. BP, çok işlevli parçadır. Elektronlar anottan katoda iletir. Yakıt hücrelerini seri halde bağlanmasını sağlar ve akımı hücreden hücreye taşır. Tüm elektrot alan boyunca tepkimeye giren maddelerin akışı için yol sağlar ve bu maddeleri etkin alanlara eşit olarak dağıtır. Oksidan (yükseltgenen) malzeme ile yakıt gazlarını birbirinden ayırır, tepkime maddelerinin ve soğutucunun sızmasını önler (Hermann vd., 2005).



Şekil 1: PEMFC yapısının kesit şeması (Yeu vd. 2020)



Şekil 2: PEMFC yığınının görünümü (a) sıkıştırma plakası; (b) bipolar plaka; (c) conta; (d) gaz difüzyon tabakası; (e) katalizör ve membran tabakası; (f) bipolar plaka; (g) ek yığın hücreleri (Asri vd. 2017)

BP'ler iyi elektrik ve ısı iletkenliğine, yüksek korozyon dayanımına, mekanik dayanıklılık yanında düşük gaz geçirgenliğine sahip, (gözeneksiz) düşük maliyetli, düşük ağırlıklı olmalıdır (Irshad vd. 2025; Karimi vd 2012).

Yakıt hücresi BP pazarının 2030 yılında, 4,4 milyar dolar (Transparency Market Research Inc., t.y.), 2035 yılında da 6,5 milyar dolar olması tahmin edilmektedir (GlobeNewswire, 2025).

BP'lerin zorlu koşullardaki işlevselliği sebebiyle malzeme seçimi, işleme yöntemleri ve tasarımı için bazı uluslararası hedefleri karşılayacak şekilde olmalıdır. ABD Enerji Bakanlığı (U.S. Department of Energy - DOE), özellikle Hidrojen ve Yakıt Hücreleri Teknolojileri Ofisi (Hydrogen and Fuel

Cell Technologies Office-HFTO) aracılığıyla, PEMFC'lerin araştırılması, geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik ulusal çabalara öncülük etmekte ve bu alandaki hedefleri belirlemektedir. DOE'nin PEMFC teknolojisi için belirlediği hedefler (özellikle maliyet, dayanıklılık ve performans metrikleri), teknolojik ilerlemeye ve pazar olgunluğuna paralel olarak zaman içinde değişime uğramaktadır. DOE'nin 2020 ve 2025 yılı hedeflerin ve değişimi Tablo 1 de gösterilmiştir.

Tablo 1: DOE hedefleri için BP teknik hedefleri

Özellik	Birim	2020 Hedefleri	2025 Hedefleri
Maliyet[a]	$/kWnet	<3	<2
Anot Korozyonu[b]	μA/cm^2	<1 ve aktif pik yok	<1 ve aktif pik yok
Katot Korozyonu[c]	μA/cm^2	<1	<1
Alana özgü direnç[d] (Yüzeylerarası temas direci, ICR)	ohm cm^2	<0,01	<0,01
H_2 geçirgenlik oranı	cm^3·s^{-1}·cm^{-2}	1.3×10^{-14}	2×10^{-6}
Elektrik iletkenliği	S·cm^{-1}	100	>100
Çalışma ömrü	Saat	5000	8000
Ağırlık	Kg/kW	0,4	0,18
Eğilme mukavemeti	MPa	25	>40

Kaynak: Ding vd 2025, Niu vd. 2025

a. Yüksek hacimli üretim için öngörülen maliyetler (yılda 100.000 sistem).

b. pH 3, 0,1 ppm HF, 80°C, pik aktif akım <1x10^{-6} A/cm^2 (0'da potansiyodinamik test. 1 mV/s, -0,4V ila +0,6V (Ag/AgCl)), Ar purge ile havası alınmış.

c. pH 3, 0,1 ppm HF, 80°C'de, pasif akım <5x10^{-8} A/cm^2 (+0,6V'da (Ag/AgCl) >24 saat potansiyostatik test, havalandırılmış çözelti.

d. Wang vd. (2003) uyarınca 200 psi'de (138 N/cm^2) her iki tarafta ölçülen arayüzey temas direncini içerir (alındığı gibi ve potansiyostatik testten sonra).

Metalik malzemeler; yeterli mekanik dayanım, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, kolay işlenebilirlik, BP kalınlığını azaltarak yığın ağırlığını düşürme imkânı ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle BP olarak kullanılabilir (Rashtchi vd., 2024). Bununla birlikte, metaller pH 2-3 aralığında ve yaklaşık 80 ^{o}C sıcaklıkta bir çalışma ortamına maruz kaldıklarında korozyona ve çözünmeye eğilimlidir. Başlangıçta Ar Ge faaliyetlerinde ve diğer uygulamalarda, karbon bazlı BP plakalar, özellikle yüksek yoğunluklu grafit, yaygın olarak kullanılırdı. Geleneksel BP'ler yoğun grafitten yapılır ve gaz kanalları oyulur. Grafit; mükemmel kimyasal kararlılık, iyi iletkenlik, termal iletkenlik, güçlü korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi avantajlara sahiptir. Ancak, grafit BP'lerin yüksek kırılganlık, zayıf mukavemet ve PEMFC çalışırken kolay hasar görme gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, grafit malzeme yakıt ve oksitleyici gazın sızmasına neden olabilecek bir gözenekliliğe sahiptir. BP'nin mukavemet gereksinimlerini sağlamak ve gaz geçirgenliğini azaltmak amacıyla minimum plaka kalınlığı 3–5 mm civarındadır. Bu durum, araç uygulamaları için kullanımlarda birim hacim başına düşen gücün ve birim kütle başına düşen enerji yoğunluğunun

azalmasına neden olur (Liu vd., 2022 ve Karimi vd., 2012). Bu sebepten metalik BP araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Ancak metalik malzemeler asidik ortamda korozyona uğramaktadır. Yüzeyde korozyon tabakası oluştukça elektrik direnci artar ve hücrenin güç çıkışı azalır. Korozyon üzerine yapılan kapsamlı çalışmalar, metal plakaları koruyucu bir tabaka ile kaplayarak veya asidik bir ortamda çalışırken PEMFC'nin özelliklerini iyileştirmek için yüzeyi modifiye ederek bu sorunu çözmüştür (Asri vd. 2017). Literatürde paslanmaz çelik alüminyum, titanyum, bakır, nikel ve magnezyum dahil olmak üzere çeşitli metalik BP malzemeleri araştırılmıştır.

1.Alüminyum BP

Alüminyumun işlenebilirlik, düşük maliyet, düşük yoğunluğu, pasivasyon özelliği sayesinde korozyon direnci yüksek malzeme olması sebebiyle, alüminyum alaşımlarının BP malzemesi olarak kullanılması düşünülmüştür. Diğer metal malzemeler ile kıyaslandığın da çelikten %65 daha hafif, titanyumdan daha az maliyetli ve Mg alaşımlara göre daha kolay işlenebilir (Mawdsley vd., 2013). Ayrıca, paslanmaz çeliğin elektriksel özdirenci, alüminyuma göre 27 kat daha yüksektir (Silva vd., 2020). Daha önce yukarıda bahsedilen, PEMFC çalışma şartlarında Alüminyum BP'ın verimli çalışa- bilmesi için bazı yüzey modifikasyonlara ihtiyaç vardır.

Mawdsley vd. (2013), 6061 ve 3003 Al alaşımı yüzeyine, ıslak püskürme metodu ile çeşitli oranlarda grafit, TiC ve etilen tetrafloroetilen (ETFE) kompozit kaplama oluşturmuşlar, ancak hem alana özgü direnç hem de anodik koşullar için korozyon DOE hedeflerini karşılayamamışlardır. Li vd. (2014), 5052 Al alaşımı yüzeyine manyetik saçtırma metodu kullanarak tek katman TiN, CrN, C ve çok katmanlı olarak, C/TiN ve C/CrN biriktirmişlerdir. ICR testinde C/CrN 4,08 mΩ cm² ile en iyi performansı göstermiştir, elektrokimyasal testlerde anot ve katot korozyonu, sırası ile 0,84 ve 1,55 μA.cm^2 katot korozyonu DOE hedef değerlerinden yüksek çıkmıştır. Fetohi vd. (2017), 6061 Al alaşımı ilk önce dip daldırma metodu ile çinko kaplanmış, ardından elektro kaplama ve akımsız nikel kaplama ile Ni-P ve Ni-Mo-P kaplanmıştır. Ni-P akımsız kaplama ile anot ve katot korozyonu sırası ile 0,0001 mA.cm^2 ve 0,02 mA.cm^2, elektro kaplama ile anot ve katot korozyonu sırası ile 0,0001 mA.cm^2 ve 0,0003 mA.cm^2, Ni-Mo-P akımsız kaplama ile anot ve katot korozyonu sırası ile 0,0001 mA.cm^2 ve 0,0005 mA.cm^2, elektro kaplama ile anot ve katot korozyonu sırası ile 0,00003 mA.cm^2 ve 0,0003 mA.cm^2, ICR testine hedef değerlerini karşılayamamışlardır. Chen vd. (2017), 1060 Al alaşımı yüzeyine dip daldırma metodu ile grafen film kaplanmıştır. Anot ve katot korozyonu sırası ile 0,59 mA.cm^2 ve 0,09 mA.cm^2 dır. ICR testinde hedef değerlerin altında sonuç alınmıştır. Hem korozyon akım yoğunluğunda hem de ICR değerinde hedef değerleri elde etmişlerdir. Gutierrez vd. (2018), 6061 Al alaşımı yüzeyi ilk önce sodyum hidroksit (NaOH) ile dağlanmış ardından çinko (Zn) daldırma

işleminden geçmiş sonrasında akımsız nikel kaplama ile nikel fosfor (Ni-P) katmanı oluşturulmuş, üzerine de manyetik saçtırma metodu ile altın (Au) kaplanmıştır. Elektrokimyasal test sonuçları korozyon dayanımının arttığını gösterse de hedefleri karşılayamamıştır. Silva vd. (2020), 1100 Al alaşımı yüzeyine manyetik saçtırma metodu ile TiN/Ti kaplama uygulamışlardır. Kaplama kabul edilebilir olarak belirlenen eşik değerinin (1,0 $mA.cm^2$) oldukça altında korozyon akım yoğunluğu gösterirken, PEMFC'nin katot bölmesinde kullanılanlara yakın polarizasyon koşulları altında yapılan testlerde anodik akım yoğunluğu bu değere yakın ama üzerinde kalmıştır. Nikitin vd.'in (2024) ZeroAvia, Inc. için havacılıkta kullanılması düşünülen bir yüksek sıcaklık proton değişim membranı (HT-PEM) yakıt hücresi içindeki alüminyum BP için kaplama patenti almışlardır. Bu patente göre, dağlanmış levha üzerine elektroliz biriktirme veya elektrokaplama ile nikel/renyum/fosfor gibi korozyona dayanıklı nikel içeren kaplama yapılır. NiReP, ile üstüne aynı metot ile asil metal veya altın gibi değerli metalden oluşan ince bir kaplama yapılır. En üste tercihen karbon siyahı ve/veya karbon nanotüpleri olmak üzere, elektriksel olarak iletken karbon parçacıkları içeren, korozyona dayanıklı camsı geçiş sıcaklıklığı yüksek polimer (poliviniliden florür, PVDF) kompozit malzeme püskürtme metodu uygulanarak kompozit alüminyum bipolar levha oluşturulur. ZeroAvia, Inc.'ın web sitesine göre (t.y.) dünyanın ilk hidrojen-elektrik yolcu uçağını üretmiş ve Harrington'a (2023) göre ilk test uçuşunda hidrojen-elektrik motoruyla çalışan dünyanın en büyük uçağı rekorunu kırmıştır ve ilk ticari uçuşu yakın zamanda gerçekleşmesi beklenmektedir. Navabpour vd. (2025) 6082 Al alaşımı yüzeyine magnetik saçtırma metodu kullanarak, önce tungsten (W) ve krom (Cr) kaplamış üzerlerine amorf karbon kaplamışlardır. ICR testinde ve katodik korozyonda hedef değerlerin altındadır.

2. Magnezyum BP

Sadece 1,7 g/cm^3 yoğunluğuyla magnezyum, genellikle en hafif yapı metali olarak kabul edilir. BP'ler için malzeme olarak magnezyum seçilirse, PEMFC'lerin ağırlığı, paslanmaz çelik veya titanyum BP'lere kıyasla büyük ölçüde azaltılabilir ve bu da PEMFC'lerin ulaşım veya havacılık alanındaki uygulama alanlarını genişletir (Chen vd., 2024). Ancak, magnezyum alaşımı, -2,37 V'luk bir korozyon potansiyeline sahip en az asal metaldir. PEMFC ortamında korozyona karşı oldukça hassastır. BP'deki çözünmüş metal iyonları membranı ve katalizörü kirletecektir. Ayrıca, korozyon işlemi sırasında yalıtkan korozyon ürününün oluşumu, BP'ler ile gaz difüzyon tabakası (GDL) arasındaki ICR'yi artıracak ve sonuç olarak PEMFC'lerin performansının düşmesine neden olacaktır (Yan vd., 2023). Megnezyum alaşımları BP olarak kullanılmak isteniyorsa kaplama gibi yüzey koruyucu muamele gerektirir (Park vd., 2014).

Park vd. (2014) magnezyum alaşımı (AZ31B) üzerine magnetik saçtırma metodu kullanarak gümüş (Ag) biriktirilmiştir, 2015 DOE teknik

hedeflerine (ICR <20 mΩ-cm^2) ulaştıklarını ve havacılık gibi sektörlerde kullanılabileceğini iddia etmişlerdir. Yan vd. (2021), yüksek saflıkta magnezyum üzerine önce Ag macunu sürmüş, ardından karbon kumaş ve Politetrafloroetilen (PTFE)/Karbon kumaş 0,2 MPa basınç altında yapıştırmışlardır. Son olarak, numuneler 160 °C'de 1 saat boyunca katılaşmaları için bir ısıl işlem fırınına konulmuştur. Çıplak Mg, korozyon akım yoğunluğunu 17,24 μA/$cm^{2'}$den 0,058 μA/$cm^{2'}$ye önemli ölçüde azaltırken, karbon kağıdı ile kaplanmış magnezyum arasındaki arayüz temas direnci (ICR) 100,6 mΩ $cm^{2'}$den 27,28 mΩ $cm^{2'}$ye düşmüştür. Yang vd. (2022) yüksek saflıktaki Mg üzerine önce Ag macunu sürmüş, üzerine Ta kaplanmışlardır. Yaptıkları ICR testi sonucunda 34,03 mΩ cm^2, Ta/Ag kaplı Mg'nin 24 saatlik potansiyostatik polarizasyon testindeki korozyon akım yoğunluğu 0,0033 μA/cm^2 olarak bulunmuşlardır. Yan vd. (2023) yüksek saflıktaki Mg üzerine vakum kullanmadan zahmetli ön işlemler yapmadan bir kaplama yöntemi denemişlerdir. Bu çalışmada, bakır tozu epoksi reçine ile karışımı alttaş üzerinde sürülmüş üzerine ufalanmış grafit kâğıdı serpilerek, 110 ºC de kürlenmiştir. ICR test sonucunu 5,49 mΩ cm^2 olarak ölçülmüştür. Grafit kağıt/Cu kaplamalı Mg'nin ultra hafif PEMFC'ler için umut verici bir aday BP olabileceği önerilmiştir.

3.Titanyum BP

Metalik bipolar levhaların en yaygın olarak araştırılan malzemeleri arasında paslanmaz çelik ve Ti bulunur. Paslanmaz çelikle karşılaştırıldığında, Ti yalnızca aside karşı güçlü bir korozyon direncine sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına da sahiptir (Shi vd. 2020). Titanyum, 4,50 $g.cm^{-3}$'lük düşük yoğunluğu ve 2,34 × 106 Sm^{-1}'lik mükemmel elektriksel iletkenliği nedeniyle yüksek güçlü yığınlar üretebilir (Heo ve Kim 2023). Ancak güçlü bir korozyon direncine sahip olsa da, titanyum yüzeyleri kolayca oksitlenerek düşük iletkenliğe sahip bir oksit filmi oluşturur ve bu da BP ile difüzyon tabakası arasındaki arayüz temas direncini (ICR) artırır. Sonuç olarak, bu durum uzun süreli çalışma sırasında pil performansında belirgin bir bozulmaya yol açar (Bi vd 2021). Korozyondan kaynaklanan temas direncindeki bu artış, titanyum bipolar plakaların yaygın olarak uygulanmasının önündeki temel engel haline gelmiştir. Titanyum bipolar plakalarla bu zorlukları ele almanın etkili bir yöntemi, yüzey kaplama modifikasyonudur (Zang vd 2024).

Wang vd. (2006) gizli tutukları bir metot ile altın (Au) kaplanmış titanyum BP nin performansını incelemişlerdir. Zhang vd. (2011) çoklu ark iyon kaplama ile Ti üzerine TiN biriktirmişler, 0,0086 μAcm^{-2} anodik korozyon akım yoğunluğu elde etmişlerdir. Peng vd. (2019), magnetik saçtırma metodu ile Ti6Al4V alaşımına TiSiN biriktirmişlerdir, 14,7 mΩcm^2 ICR, 0,023 μAcm^{-2} anot ve 0,071 μAcm^{-2} katot korozyon akım yoğunluğu elde etmişlerdir. Shi vd. (2020), çift ışıltılı plazma yüzey işlemiyle Ti yüzeyini TiC ile değiştirmişler, inceleme sonucunda 7,5 mΩcm^2 ICR, 0,55 μAcm^{-2} anot

ve 1,9 μAcm^{-2} katot korozyon akım yoğunluğu elde etmişlerdir. Bi vd. (2021), Ti6Al4V alaşımına, toz daldırma reaksiyon destekli kaplama (PIRAC) yöntemi ile nitrürleme yaparak yüzeyde TiN, TiNxOy oloşmasını sağlamışlardır. İnceleme sonucunda 5,8 $m\Omega cm^2$ ICR ve 0,31 μAcm^{-2} katot korozyon akım yoğunluğu elde etmişlerdir. Tan vd. (2022), yüksek sıcaklıklı ısıl işlemle, Ti BP üzerine Ti_4O_7 biriktirmişler ve 7,61 $m\Omega cm^2$ ICR sonucu elde etmişlerdir. Yan vd. (2022), katodik Arc buharlaştırma metotdu ile TiBP üzerinde AlTiVCrMo yüksek entropili alaşım ve (AlTiVCrMo)Nx yüksek entropili seramik kaplamalar üretmişlerdir. 16,5 $m\Omega cm^2$ ICR ve korozyon akım yoğunluğu 0,06 μAcm^{-2} sonucu elde etmişlerdir. Liu vd. (2024), önce aşit ile dağlanmış Ti üzerine elektro kaplama metodu ile altın kaplama üzerine poliprolün (PPY) kaplanarak, Au/PPY kaplama elde etmişlerdir. İnceleme sonucunda 0,17 μAcm^{-2} korozyon akım yoğunluğu, 1,5 $m\Omega cm^2$ ICR sonucu elde etmişlerdir. Meng vd. (2024), magnetik saçtırma metodu ile Ti BP üzerine Nb, Ti, Ta biriktirmişlerdir. ICR testleri hedeflerini karşılayamamıştır. Korozyon akım yoğunlukları sırası ile 0,02 μAcm^{-2}, 1,41 μAcm^{-2} ve 0,48 μAcm^{-2} çıkmıştır. Zang vd. (2024), sol-gel ile TiBP üzerine, grafen katkılı indiyum kalay oksit (ITO) kaplamışlar ve korozyon akım yoğunluğunu 0,06 μAcm^{-2} olarak bulmuşlardır.

4. Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelikler (PÇ), uygun mekanik mukavemet, yüksek elektrik iletkenlik, imalat kolaylığı, şekillendirilebilirlik ve düşük maliyet gibi özellikleri nedeniyle umut verici aday malzemeler olarak kabul edilmektedir (Rashtchi vd. 2024).

Yüzey modifikasyonuna uğramış paslanmaz çelik BP'lerin kullanılmasının avantajları şunlardır:

(1) PÇ'nin üretim ve işleme teknolojisi olgun ve düşük maliyetlidir.

(2) 0,2 mm kalınlığındaki PÇ yeterli mekanik mukavemete ve kompakt yapıya sahip olabilir ve yığının hacmini azaltabilir.

(3) Krom ve nikel içeren ostenitik PÇ iyi korozyon direncine sahiptir.

Raporlar 304 ve 316L gibi östenitik PÇ'lerin BP'ler için en uygun malzemeler olduğunu ortaya konmuştur (Liu vd. 2022).

PÇ'lerin yüzey modifikasyonu ile ilgili çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; nitrürleme (Mani vd. 2017, Lee vd. 2009, Wang vd 2011), aktif ekran plazma (ASP) (Lin vd. 2014 ve 2015), katot ark buharlaştırma PVD (CAE-PVD) (Rashtchi vd. 2024, Dong-Ho vd. 2023, Lee vd. 2012, Chen vd. 2025, Mani vd., 2021), çoklu ark iyon kaplama (Tian vd. 2011), magnetron sıçratma (Mi vd. 2021, Li vd. 2022, Zhao vd. 2016, Nam vd. 2010, Atapour vd. 2020, Yi vd. 2019), elektron demeti (PAPVD) (Wang vd 2010), atmosferik plazma püskürtme (Gao vd. 2024), plazma odaklama (Omrani vd 2016, Omrani vd, 2012), magnetron sıçratma ve katot ark iyon

kaplama tekniklerinin kombinasyonu (Ma vd. 2024), dönüşümlü voltametre (Joseph vd. 2005), plazma yüzey alaşımlama (Wang vd. 2013), CVD plazma (Fukutsuka vd. 2007, Manso vd. 2020), termal spreyleme (Gago vd. 2013), kimyasal pasifleştirme (Huang vd. 2011), iyon enjeksiyon yöntemi (Feng vd 2010), fiziksel buhar biriktirme (PVD) (Hedayati vd. 2016, Dur vd. 2011, Zhang vd. 2019, Wang vd. 2022), elektro kaplama (Liang vd. 2012, Jiang vd. 2018), sol–gel (Wang vd. 2018), dip daldırma (Taherian vd. 2022, Yang vd. 2017) yöntemleridir.

Paslanmaz çelik BP'ler üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 2.'de özetlenmişlerdir.

Tablo 2: Paslanmaz Çelik BP'ler ile yapılan çalışmalar

BP malzeme	Modifikasyon/ Kaplama	Metot	Korozyon Akım Yoğunlığu ($\mu A\ cm^{-2}$)	Potansiyostatik süre (sa) (0.6 v)	ICR 140 Ncm^2 ($m\Omega.cm^2$)	Kaynaklar
316L	N	Nitrürleme	0,158 (Katot) 0,140 (Anot)	10sa 0,6 V ve -0,1V	14	Mani vd., 2017
446M	N	Nitrürleme	2 (Katot) 3 (Anot)	10sa 0,6 V ve -0,1V	6	Lee vd. 2009
446	N	Nitrürleme	0,7 (Anot)	7,5sa 0,6 V ve -0,1V	18	Wang vd 2011
316	N	ASP			33	Lin vd., 2014
316	N&Ag	ASP			20	Lin vd., 2015
316L	Cr/CrN	CAE	0,9 (Katot)	6sa 0,6 V	10,2	Rashtchi vd, 2024
316L	CrN TiN	CAE	0,3 (Katot) 0,1 (Anot 2,5 (Katot) 1 (Anot	7sa 0,6 V ve -0,1V	23 10	Lee vd. 2012
316L	Cr/CrN	CAE	0,85 (Katot)	2sa 0,6 V ve -0,1V	2,1	Chen vd., 2025
316	TiN/TiAlN	CAE	0,106 (Katot) 0,046 (Anot)	4sa 0,6 V	6	Mani vd., 2021
316L	TiN	MAIP	2,4 (Katot) 0,27 (Anot)	10sa 0,6 V ve -0,1V	30	Tian vd. 2011
316L	Cr-C	MS	1,05 (Anot)	10sa 0,6 V ve -0,1V	1,4	Zhao vd. 2016,
316L	Ti/Ti-katkılı-C	MS	0,28	2sa 0,6 V ve -0,1V	3,47	Li vd. 2022
316L	CrTiN	MS	0,61 (Katot) 0,21 (Anot)	5sa 0,6 V ve -0,1V	5,5	Mi vd. 2021
304	Nb NbN	MS	4,2 (Katot) 0,4 (Anot)	0,5sa 0,64 V ve -0,06V	9 >10	Atapour vd. 2020

	Nb/NbN		27,3 (Katot) 2,5 (Anot) 20,1 (Katot) 3,0 (Anot		>10	
a-C	a-C	MS	0,18 (Katot)	1sa 0,6 V	1,67	Yi vd. 2019
316L	polivinil asetat selüloz (PVAc)/Grafit	Dip daldırma			6,5	Taherian vd. 2022
304	SnO2	Dip daldırma	0,13 (Katot) 0,16 (Anot)	4sa 0,6 V ve -0,1V		Yang vd. 2017
316L	TiN, TiAlN, CrN	Elektron demeti (PAPVD)	31,5 (Katot) 4,07 (Anot) 317 (Katot) 18,6 (Anot) 1,31 (Katot) 1,41 (Anot)	4sa 0,6 V ve -0,1V	>10	Wang vd 2010
316L	Ti3SiC2	Atmosferik plazma püskürtme	0,27	0,5sa 2 V ve 0,7V	6,07	Gao vd. 2024
316L	AlN/TiN	Plazma odaklama	2,8 (Katot)	1sa 0,6 V	>10	Omrani vd 2016
316L	TiN	Plazma odaklama	2,8 (Katot)	1sa 0,6 V	>10	Omrani vd, 2012
316L	TiZrC	CAE+MS	0,75 (Katot)	5sa 0,6 V	1,6	Ma vd. 2024
304	NbC	plazma yüzey alaşımlama	0,051(Katot) 0,058 (Anot)	10sa 0,6 V ve -0,4V	9,04	Wang vd. 2013
316L	Ta	CVD plazma	0,04 (Katot)	27sa 0,6 V ve -0,4V		Manso vd. 2020
316L	Ag	Kimyasal pasifleştirme	0,044 (Katot) 0,023 (Anot)	4sa 0,6 V ve -0,1V		Huang vd. 2011
316L	Ag	İyon enjeksiyonu	2,0 (Katot) 1,1 (Anot)	3sa 0,6 V	78,8	Feng vd 2010
316L	TiN	PVD	0,23 (Katot) 0,43 (Anot)	24sa 0,6 V ve -0,1V	29,5	Hedayati vd. 2016
316L	Ag katkılı C Cr katkılı C	PVD		24sa 0,62 V	1,32 2,10	Zhang vd. 2019

316L	C/Ti	PVD	1,47 (Katot	60sa 0,67 V	2,67	Wang vd. 2022
304	Nb	Elektrokaplama	<1 (Katot) <1 (Anot)	1,5sa 0,6 V ve -0,1V		Liang vd. 2012
304	Polipirol,-Grafen oksit	Elektrokaplama	0,059 (Katot)	10sa 0,6 V		Jiang vd. 2018
316	PPY-GO Nb katkılı TiO2	Sol-gel	0,13 (Katot)	140sa 0,6 V	30	Wang vd. 2018

METALİK PLAKALAR İÇİN ALINAN PATENTLER

Yüzey modifikasyonunu işlemi görmüş metalik BP lerin, ticarileşmesi için son zamanlarda çabalar artmış ve bu yönde çok sayıda patent alınmıştır. Patentlerin çoğunda, patent koruma alını geniş tutmak amacıyla kullanılan BP için sadece metalik olduğu belirtilmiş ve gene pek çoğunda test sonuçları belirtilmemiştir. Bu patenlerin kaplama çeşidi, kaplama yöntemleri ve yenilik iddiaları, Tablo 3'de özetlenmiştir. Bu patentlerde karbon bazlı ve çok katmanlı kaplama kullanımı dikkat çekicidir.

Tablo 3: Yüzey modifikasyonlu metalik BP üzerine varolan patentler

Kaplama Ana Bileşeni	Kaplama Yöntemi	Katman Yapısı ve İşlevleri	Avantajlar ve Yenilikçi Yönler	Kaynaklar
Polipirol(PPy)+TiN + $Ti_3C_2T_x$+LDH+Epoksi	Elektropolimerizasyon + Elektroforetik Biriktirme (EPD)	1. İç Katman (Anotik): PPy+TiN (Koruyucu/İletken) 2. Dış Katman (Katlı): $Ti_3C_2T_x$+LDH+Epoksi (Bariyer/Aktif Korozyon Önleyici)	• Çift Katmanlı Koruma • Aktif Kor. Önleyici (MoO_4^{2-} salınımı) • Mükemmel Elektriksel Kararlılık Yenilik: "Akıllı" çift katman: İç katman anotik koruma (PPy), dış katman bariyer + aktif kor. inhibisyonu (LDH'den MoO_4^{2-} salınımı).	Zhu vd 2024
Cr_2AlC-MAX + Cr_3C_2	Manyetik Sıçratma	1. Alt Katman: Cr_2AlC-MAX Fazı - Mükemmel kor. direnci ve iletkenlik 2. Ara Katman(lar): Gradyan Geçiş Katmanı ($Cr_2AlC \rightarrow Cr_3C_2$) - İç gerilimi azaltır, yapışmayı artırır 3. Üst Katman: Cr_3C_2 - Sert, aşınmaya dayanıklı, iletken	• Mükemmel Yapışma: Arayüz olmaması, kaplamanın taban malzemesine olan yapışma mukavemetini önemli ölçüde artırır. • Üstün Kor. direnci: Gradyan yapı, tek katmanlı kaplamalardaki delikli kusurları önler. Yenilik: Geleneksel kaplamaların aksine, sürekli kompozisyon gradyanı kullanılarak katmanlar arası arayüz ve iç gerilim büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır.	Cui vd., 2024
Cr-Katlıkı MAX M-Cr Alaşım Katmanı	Manyetik Sıçratma	1. M-Cr Alaşım Katmanı 2. M-Cr-A Geçiş Katmanı	• Çok Yönlülük: Tek bir patent, farklı uygulama ihtiyaçları için	Lai ve Zheng, 2024

+ M-Cr-A (Ta, Nb, Al) + M-Cr-A-C		3. M-Cr-A-C Kompozit Katmanı 4. Elektrokimyasal İşlem (Opsiyonel): Kırıkları kapatmak için oksit filmi oluşturur.	birden fazla üstün kaplama mimarisi sunar. Yenilik 1: Kendini iyileştirme yeteneği için Cr katkılı ve kontrollü elektrokim. oksidasyon. Kırık/çatlak oluşumunda, Cr, ortamdaki oksijenle reaksiyona girerek koruyucu bir oksit filmi oluşturur. Yenilik 2: Biriktirme ve iki aşamalı tavlama için optimize edilmiş özelleştirilmiş 3 bölmeli vakum fırını, geleneksel yöntemlere kıyasla verimliliği artırır ve makro çatlakları azaltır.	
Ti + TiN + a-C	Manyetik Sıçratma (Ti, TiN) FCVA (a-C) HIPIMS	1. Ti Tohum Katmanı: Yapışma artırıcı, korozyon direnci 2. TiN Ara Katman: İletkenlik, yapışma, korozyon bariyeri 3. a-C Üst Katman: Korozyon direnci, iletkenlik, aşınma direnci	• Altın kaplamaya ekonomik alternatif • Yüksek yoğunluklu a-C ile üstün iyon bariyeri • İnce kaplama ile düşük temas direnci Yenilik 1: Yüksek yoğunluklu, düşük hidrojen içerikli amorf karbon (a-C) üst katmana sahip çok katmanlı bir kaplama Yenilik 2: a-C katmanının kritik özellikleri korozif PEMFC ortamında üstün performansı	Shi ve Tang 2023

NiReP + Au + Polimer kompozit (PVDF, PPSU, PESU)	- Elektrokaplama (NiReP, Au) - Püskürtme kaplama (polimer) - Laminasyon	1. NiReP Katmanı: Kor. direnci, yapışma 2. Au Katmanı: İletkenlik, kor. önleyici 3. Polimer Kompozit: İletkenlik, yapışma, Tg uyumu	• HT-PEM uyumlu • Hafif metal + polimer ile ağırlık optimizasyonu • Çok katmanlı yapı ile uzun ömür. Yenilik: HT-PEM kullanılmak üzere, hafif metal (Al, Mg, Ti) bir altlık üzerine çok katmanlı bir metal-polimer kompozit kaplama önerir.	Nikitin vd, 2024
Cr-katlıkı MAX (Ti_3AlC_2/Ti_2AlC)	Toz Metalurjisi	1. Cr-katkılı MAX tabakası: - Kor. direnci - Yüksek sıcaklık stabilitesi	• Yüksek termal kararlılık • Sınırlı elektrik iletkenliği Yenilik: Cr katkılı ile MAX faz oksidasyon direnci artırılmış.	Li vd., 2025
NiMoCr + Ti_3SiC_2 + Ni-CNT/Ni-CF	Soğuk Püskürtme	1. NiMoCr alaşım tabakası (Kor.) 2. Ti_3SiC_2 dağılımı (Mekanik) 3. Ni-CNT/CF (İletkenlik)	• Çok bileşenli yapı • Düşük sıcaklık işlemi Yenilik: Soğuk püskürtme ile metal/seramik/karbon kompozit yapı.	Wang vd., 2023
C + CrN + $(Cr,Ti)_2AlC$	Ark iyon buharlaştırma (Cr, CrN) + Manyetik Sıçratma ($(Cr,Ti)_2AlC$)	1. Cr Geçiş Katmanı: Termal uyum, yapışma 2. CrN Bağlantı Katmanı: Kolonar yapı azaltma, yoğunluk artırma	• Ti katkısı ile Cr_2AlC perfor. büyük artış (ICR'de %39-86 azalma) • Gradyan yapı, kaplamanın tokluğunu ve altlık yapışmasını	Zheng vd. 2023

		3. $(Cr,Ti)_2AlC$ Dış Katman: Korozyon direnci, iletkenlik	artırarak uzun hizmet ömrü sağlar. • Kullanılan kaplama yöntemleri endüstriyel ölçekte verimli ve tekrarlanabilir üretime uygundur. Yenilik: dış katman olarak kullanan çok katmanlı bir kaplama (Cr -> CrN -> $(Cr,Ti)_2AlC$). Katkılama oranı ve çok katmanlı gradyan yapı.	
C + CrN + $(Ti,W)_3AlC_2$	- Ark iyon kaplama (Cr, CrN) - Manyetik Sıçratma ($(Ti,W)_3AlC_2$)	1. Cr Geçiş Katmanı: Termal uyum, yapışma 2. CrN Bağlantı Katmanı: Mikroyapı iyileştirme, yoğunluk 3. $(Ti,W)_3AlC_2$ Dış Katman: Korozyon/iletkenlik artışı	• W katkısı ile Ti_3AlC_2 kor. akım yoğunluğunda %49-59 azalma ve temas direncinde %33-44 azalma sağlar. • Gradyan yapı ile düşük iç gerilim ve yüksek yapışma • Yüksek üretim hızı ve tekrarlanabilirlik Yenilik: dış katman olarak kullanan çok katmanlı bir kaplama (Cr -> CrN -> $(Ti,W)_3AlC_2$). Katkılama oranı ve çok katmanlı gradyan yapı.	Zheng vd. 2023
Ti_3SiC_2	Elektroforetik Depozisyon (EPD) + Isıl İşlem	1. Ti_3SiC_2 toz tabakası 2. EPD ile yoğun yüzey: - Düşük porozite	• Hızlı üretim • Kalın kaplama sınırlı Yenilik: EPD ile homojen, düşük poroziteli ve yapışkan kaplama.	Zhang vd., 2024

C + Ti + TiN	Manyetik Sıçratma	1.Karbon katmanı: -İletkenlik, dayanıklılık, yüksek membran mukavemeti 2.Ti ara katman: -Yapışma artırıcı -Korozyon direnci 3.TiN katmanı: -Oksidasyon direnci -Temas direnci azaltma -Metal iyon çözünmesini önleme	• Her yüzey için optimize edilmiş katman • Üstün temas direnci • Uzun süreli dayanıklılık • Oksidasyon kontrolü • Basit imalat prosesi Yenilik: Asimetrik katman tasarımı	Miyazaki vd. 2023
Cr/Ti/Zr + (TiN/CrN/ZrN +(TiC/Ti_3SiC_2 nanokompozit)	Ark iyon buharlaştırma Manyetik Sıçratma (Ti_3SiC_2)	1.Alt katman: - Yapışma tabanı 2.Ara katman: -Korozyon direnci -İletkenlik 3.Dış katman: -Hidrofobiklik -Yüksek iletkenlik -Üstün kor. direnci Geçiş katmanı: -Katmanlar arası uyum	• Üçlü katman sinerjisi • Hidrofobik özellik • Üstün korozyon direnci • Çok yönlü performans • Geliştirilmiş su yönetimi Yenilik: TiC + Ti_3SiC_2 nanokompozit dış katman	Li vd. 2023
Ti_3SiC_2	Reaktif CVD (RCVD)	RCVD Ti_3SiC_2 ince film:	• İnce film homojenliği	Li vd., 2020

		- Yapışma dayanımı	• Yüksek ekipman maliyeti Yenilik: RCVD ile yüksek saflıkta ve mükemmel yapışmaya sahip ince film.	
Ti/Zr + Max (Ti_3SiC_2, Ti_3AlC_2, vb.)	Manyetik Sıçratma Vakum ısıl işlemi	1.Geçiş Katmanı: -Yapışmayı artırma -MAX faz oluşumunu destekleme 2. MAX Faz Kaplama: -Metal iletkenliği + Seramik sertliği ve kor. direnci -Düşük temas direnci -Yüksek mekanik mukavemet	• Metal ve seramik avantajlarının birleşimi • Üstün mekanik özellikler (sertlik, aşınma direnci) • Yüksek sıcaklık kararlılığı • Mükemmel kor. direnci ve iletkenlik dengesi Yenilik: MAX faz kaplamaların bipolar plaka uygulaması	Zhu vd. 2023
ITO: Sn/In/Al oksit + Ti/Cr/W vb) + a-C	Ark iyon buharlaştırma Oksijen iyon bombardımanı ile gözenek kapatma	1.İletken Kaplama (ITO): -Düşük temas direnci -Taban ile kaplama arasında yapışma katmanı 2.Kor. Önleyici Kaplama: -Oksijen iyonu ile gözenek kapatma ("iç gözenek onarımı") -Kor. bariyeri 3.Amorf Karbon Film: -Son koruyucu katman -Kimyasal inertlik	• Oksijen iyon bombardımanı ile "iç gözenek onarımı" teknolojisi • Üstün yapışma ve kor. performansı • Çok katmanlı sinerjik koruma Yenilik: İletken metal oksit (ITO) ara katman kullanımı	Shangguan vd. 2023

Ni + Grafen + a-C	Çok arklı iyon buharlaştırma (Ni) + Önyargılı Plazma Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) (grafen ve amorf karbon)	1.Ni Nano Katman: -Katalitik grafen büyümesi için taban -Yapışma artırıcı -Termal genleşme uyumu 2.Grafen Katmanı: -Üstün iletkenlik ve termal iletkenlik -Nanometre seviyesinde yoğun yapı (gözeneksiz) 3.Amorf Karbon Film: -Grafeni yüksek potansiyel oksidasyondan koruma	• Grafenin üstün iletkenlik ve termal iletkenlik özellikleri • "Çapa etkisi" ile grafen/amorf karbon arayüz yapışması • Yüksek üretim hızı (PECVD) Yenilik: Ni katalizörü üzerinde in-situ grafen büyütme	Shangguan vd. 2021

SONUÇ

PEMFC'lerin verimliliğinin, ticarileştirilmesinin ve rağbet görmesinin önündeki engeller; kararlılık, düşük ağırlık, düşük maliyet ve seri üretime uygunluk gibi kritik teknik gereksinimlerdir. Bu nedenle, PEMFC nin temel bileşeni olan yeni nesil bipolar plaka (BP) materyallerine olan ilgi artmıştır. Titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) gibi hafif metaller üzerine çalışmalar yapılsa da, üstün mekanik ve uygun maliyetleri nedeniyle paslanmaz çelik, özellikle de 316 paslanmaz çelik yoğun ilgi görmektedir. Yapılan çalışmalar, PEMFC ortamında uzun süre işlevselliğini koruyabilen metalik bir BP'nin, yüzey modifikasyonuna, özellikle koruyucu bir tabaka ile kaplaması gerekliği ortak bir görüş olarak ortaya koymuştur. Kaplama yöntemi, altyapı maliyeti ve seri üretime uygunluk gibi kriterler doğrultusunda halen araştırılmakla birlikte, DOE hedeflerini karşılayabilmek için en ümit verici kaplamalar yüksek elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri sebebiyle, karbon bazlıdır. Bu karbon a-C, grafen, karbürler, polimerik malzemeler ve Ti_3SiC_2 ile Ti_3AlC_2 gibi MAX fazları, şeklinde sıralanabilir. Performansı ve dayanıklılığı iyileştirmek amacıyla, her katmanın belirli bir özellik (örneğin, yapışma, iletkenlik, kor. koruyucu bariyer) için tasarlandığı çok katmanlı yapılar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Metalik BP'lerin performansını ve ömrünü artırmak amacıyla, yüksek performanslı kaplamalar ve bu kaplamalara yönelik en uygun biriktirme tekniklerin geliştirilmesi üzerine daha fazla araştırmalara ihtiyaç vardır.

REFERANSLAR

Abedin, T., Pasupuleti, J., Paw, J. K. S., Tak, Y. C., Mahmud, M., Abdullah, M. P., & Nur-E-Alam, M. (2025). Proton exchange membrane fuel cells in electric vehicles: Innovations, challenges, and pathways to sustainability. *Journal of Power Sources*, *640*, 236769. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236769

Asri, N. F., Husaini, T., Sulong, A. B., Majlan, E. H., & Daud, W. R. W. (2016). Coating of stainless steel and titanium bipolar plates for anticorrosion in PEMFC: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(14), 9135–9148. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.241

Atapour, M., Rajaei, V., Trasatti, S., Casaletto, M. P., & Chiarello, G. L. (2020). Thin niobium and Niobium nitride PVD coatings on AISI 304 stainless steel as

bipolar plates for PEMFCs. *Coatings*, *10*(9), 889. https://doi.org/10.3390/coatings10090889

Bi, J., Yang, J., Liu, X., Wang, D., Yang, Z., Liu, G., & Wang, X. (2020). Development and evaluation of nitride coated titanium bipolar plates for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(1), 1144–1154. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.217

Chen, P., Fang, F., Zhang, Z., Zhang, W., & Wang, Y. (2017). Self-assembled graphene film to enable highly conductive and corrosion resistant aluminum bipolar plates in fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(17), 12593–12600. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.214

Chen, Y., Zhu, K., Yan, P., Ying, T., Gao, Y., Liu, Y., Wang, J., Yang, Y., & Zeng, X. (2024). Corrosion-Resistant and conductive A-C/TA/CU-Coated magnesium as bipolar plates for ultralightweight proton exchange membrane fuel cells. *ACS Applied Energy Materials*, *7*(15), 6349–6359. https://doi.org/10.1021/acsaem.4c00815

Cui, X., Li, Y., Hu, J., Xiao, B., & Xu, P. (2024). *Composite gradient protective coating for metal bipolar plate of fuel cell and preparation [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patent Başvurusu No. CN 118497663 A). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Ding, R., Li, Y., Liu, J., Zhan, K., Jiang, X., Wang, Z., Zhao, B., Li, D., & Ji, V. (2024). Recent progress in the preparation and performance of protective coatings on metal bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells-A review. *Applied Materials Today*, *42*, 102556. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102556

Dong-Ho, S., & Seong-Jong, K. (2023). Electrochemical characteristics and damage behaviour of DLC-coated 316L stainless steel for metallic bipolar plates of PEMFCs. *Transactions of the IMF*, *101*(6), 308–319. https://doi.org/10.1080/00202967.2023.2223835

Dur, E., Cora, Ö. N., & Koç, M. (2011). Experimental investigations on the corrosion resistance characteristics of coated metallic bipolar plates for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(12), 7162–7173. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.014

Feng, K., Li, Z., Cai, X., & Chu, P. K. (2010). Silver implanted 316L stainless steel as bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Materials Chemistry and Physics*, *126*(1–2), 6–11. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.11.029

Fetohi, A. E., Hameed, R. A., & El-Khatib, K. (2013). Ni–P and Ni–Mo–P modified aluminium alloy 6061 as bipolar plate material for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, *240*, 589–597. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.085

Fukutsuka, T., Yamaguchi, T., Miyano, S., Matsuo, Y., Sugie, Y., & Ogumi, Z. (2007). Carbon-coated stainless steel as PEFC bipolar plate material. *Journal of Power Sources*, *174*(1), 199–205. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.096

Gago, A. S., Ansar, A. S., Wagner, N., Arnold, J., & Friedrich, K. A. (2013, 2-5 Temmuz). *Titanium coatings deposited by thermal spraying for bipolar plates of PEM electrolysers* [Konferans sunumu]. 4th European PEFC and H2 Forum, Lucerne, Switzerland.

Gao, W., Yang, D., Zhao, Z., Wang, H., Fu, Y., & Huang, N. (2024). Effect of Ti3SiC2 concentration on corrosion resistance and ICR in bipolar plates composite

ceramic coatings. *Surface and Coatings Technology*, *489*, 131126. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131126

Gao, X., Chen, J., Xu, R., Zhen, Z., Zeng, X., Chen, X., & Cui, L. (2023). Research progress and prospect of the materials of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). *International Journal of Hydrogen Energy*, *50*, 711–743. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.005

Gutiérrez, A. G. G., Sebastian, P., Cacho, L. M., Arco, E. B., Campos, J., & Baron, A. (2018). Surface modification of aluminum alloy 6061 for bipolar plate application: adhesion characteristics and corrosion resistance. *International Journal of Electrochemical Science*, *13*(4), 3958–3969. https://doi.org/10.20964/2018.04.122

Heo, H., & Kim, S. (2023). Effects of PVD deposition method on electrochemical properties and interfacial contact resistance of CrN coated titanium as PEMFC bipolar plate. *Transactions of the IMF*, *101*(5), 261–268. https://doi.org/10.1080/00202967.2023.2222510

Hedayati, A., Asghari, S., Alinoori, A. H., Koosha, M., & Vuorinen, E. (2017). Effects of coating thickness on corrosion and contact resistance behavior of TiN coated AISI 316L as bipolar plates for PEMFC. *Iranian Journal of Hydrogen & Fuel Cell*, 3(2), 137–149. https://doi.org/10.22104/ijhfc.2017.393

Hermann, A., Chaudhuri, T., & Spagnol, P. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *30*(12), 1297–1302. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.016

Huang, N., Liang, C., Wang, H., Xu, L., & Xu, H. (2011). Corrosion Behavior of Passivated 316LSS with Ag Coating as PEMFC Bipolar Plate. *International Journal of Corrosion*, *2011*, 1–7. https://doi.org/10.1155/2011/103785

Irshad, H. M., & Shahgaldi, S. (2025). Comprehensive review of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells with a focus on materials, processing methods and characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, *111*, 462–487. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.300

Jiang, L., Syed, J. A., Lu, H., & Meng, X. (2018). In-situ electrodeposition of conductive polypyrrole-graphene oxide composite coating for corrosion protection of 304SS bipolar plates. *Journal of Alloys and Compounds*, *770*, 35–47. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.277

Joseph, S., Mcclure, J., Chianelli, R., Pich, P., & Sebastian, P. (2005). Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, *30*(12), 1339–1344. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.011

Karimi, S., Fraser, N., Roberts, B., & Foulkes, F. R. (2012). A review of Metallic bipolar Plates for proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials and Fabrication Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2012*, 1–22. https://doi.org/10.1155/2012/828070

Lai, X., & Zheng, M. (2024). *Coating and preparation method therefor, bipolar plate, and fuel cell* (WO 2024/169350 A1). World Intellectual Property Organization.

Lee, S., Kim, J., Lee, Y., & Wee, D. (2009). Effects of low-temperature nitridation on the electrical conductivity and corrosion resistance of 446M stainless steel as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(2), 725–730. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.107

Lee, S., Kakati, N., Maiti, J., Jee, S., Kalita, D., & Yoon, Y. (2012). Corrosion and electrical properties of CrN- and TiN-coated 316L stainless steel used as bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Thin Solid Films*, *529*, 374–379. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.09.027

Li, A., Zhu, J., Zhang, D., Zhang, J., & Zhao, H. (2020). *Preparation method of Ti3SiC2 coating on fuel cell composite bipolar plate, 2020 [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patent Başvurusu No. CN 110911705 A). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Li, H., Chen, G., Wu, Z., Wang, Q., Ye, Z., & Liu, Y. (2023). *Fuel cell bipolar plate coating and preparation method and application thereof cell [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patenti No.. CN 115763864 A). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Li, R., Song, X., Xie, Z., Zheng, M., Cai, Y., Liu, Y., Mo, Y., Zhao, Y., Peng, J., & Chen, C. (2025). *Preparation method of Cr-doped MAX phase coating, bipolar plate and fuel cell [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patenti No. CN 116103625 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Li, W., Liu, L., Li, Z., Wang, Y., Li, H., & Lei, J. (2021). Corrosion and conductivity behavior of titanium-doped amorphous carbon film coated SS316L in the environment of PEMFCs. *Materials Chemistry and Physics*, *276*, 125234. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125234

Li, Z., Feng, K., Wang, Z., Cai, X., Yao, C., & Wu, Y. (2014). Investigation of single-layer and multilayer coatings for aluminum bipolar plate in polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(16), 8421–8430. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.136

Liang, C., Cao, C., & Huang, N. (2012). Electrochemical behavior of 304 stainless steel with electrodeposited niobium as PEMFC bipolar plates. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 19(4), 328–332. https://doi.org/10.1007/s12613-012-0559-5

Lin, K., Li, X., Sun, Y., Luo, X., & Dong, H. (2014). Active screen plasma nitriding of 316 stainless steel for the application of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy,* 39(36), 21470–21479. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.102

Lin, K., Li, X., Tian, L., & Dong, H. (2015). Active screen plasma surface co-alloying treatments of 316 stainless steel with nitrogen and silver for fuel cell bipolar plates. *Surface and Coatings Technology*, 283, 122–128. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.038

Liu, G., Hou, F., Peng, S., Wang, X., & Fang, B. (2022). Process and challenges of stainless steel based bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, *29*(5), 1099–1119. https://doi.org/10.1007/s12613-022-2485-5

Liu, Y., Wang, D., Zhang, H., Liu, L., Pei, L., Huang, S., & Wang, X. (2024). Au Nanoparticle–polypyrrole Composite Coatings with Enhanced Conductivity and Corrosion Resistance for Ti-Based Porous Transport Layer Anodes in Proton Exchange Membrane Water Electrolysis. *ACS Applied Nano Materials*, *7*(14), 15996–16006. https://doi.org/10.1021/acsanm.4c01377

Ma, T., Guo, H., Tian, Y., Qi, J., & Yao, N. (2024). TiZrC-Coated 316 l stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *Materials Today Communications*, 111170. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111170

Mani, S. P., Kalaiarasan, M., Ravichandran, K., Rajendran, N., & Meng, Y. (2021). Corrosion resistant and conductive TiN/TiAlN multilayer coating on 316L SS: a promising metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Materials Science*, *56*(17), 10575–10596. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05682-4

Mani, S. P., & Rajendran, N. (2017). Corrosion and interfacial contact resistance behavior of electrochemically nitrided 316L SS bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *Energy*, *133*, 1050–1062. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.086

Manso, A., Marzo, F., Garicano, X., Alegre, C., Lozano, A., & Barreras, F. (2020). Corrosion behavior of tantalum coatings on AISI 316L stainless steel substrate for bipolar plates of PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(40), 20679–20691. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.157

Mawdsley, J. R., Carter, J. D., Wang, X., Niyogi, S., Fan, C. Q., Koc, R., & Osterhout, G. (2012). Composite-coated aluminum bipolar plates for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, *231*, 106–112. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.074

Meng, Q., Yue, X., Shang, L., Liu, X., Wang, F., & Zhang, G. (2024). Corrosion behavior of metallic coatings on titanium bipolar plates of proton exchange membrane water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *63*, 1105–1115. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.242

Mi, B., Chen, Z., Wang, Q., Li, Y., Qin, Z., & Wang, H. (2021). Properties of C-doped CrTiN films on the 316L stainless steel bipolar plate for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(64), 32645–32654. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.109

Miyazaki, D., Hirano, M., Tanino, H., & Kogure, T. (2023). *Fuel cell* (U.S. Patent No. US 11,652,220 B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Nam, N., Han, J., Kim, J., Tai, P., & Yoon, D. (2010). Electrochemical properties of TiNCrN-coated bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell environment. *Thin Solid Films*, *518*(22), 6598–6603. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.03.046

Navabpour, P., Zhang, K., Sanzone, G., Field, S., & Sun, H. (2025). Magnetron-Sputtered amorphous carbon films for aluminium Proton-Exchange-Membrane fuel cell bipolar plates. *Physchem*, *5*(2), 18. https://doi.org/10.3390/physchem5020018

Nikitin, D., Belousov, V., Shubenkov, S., Vasilev, A., Kosarev, I., Riazantsev, A., Melkumyan, B., Putintsev, D., & Panov, S. (2024). *Coatings for aluminum-based bipolar plates* (WO 2024/158541 A1). World Intellectual Property Organization.

Niu, Z., Wang, X., Li, Y., He, Z., Huang, F., Deng, Q., Hu, F., & Zhou, Q. (2025). Review of Conductive polymer coatings for Metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of polymer materials*, *42*(1), 1–10. https://doi.org/10.32604/jpm.2025.060401

Omrani, M., Habibi, M., Amrollahi, R., & Khosravi, A. (2012). Improvement of corrosion and electrical conductivity of 316L stainless steel as bipolar plate by TiN nanoparticle implantation using plasma focus. *International Journal of Hydrogen Energy*, *37*(19), 14676–14686. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.06.048

Omrani, M., Habibi, M., & Birjandi, M. S. M. (2016). Enhanced electrical conductivity of two layers AlN–TiN coating on SS316L as bipolar plate using plasma focus device. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(9), 5028–5036. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.081

Park, T., Oh, J., Kim, K., & Kwon, S. (2014). Evaluation of silver-coated magnesium bipolar plate for lightweight PEM fuel cell stack. International Journal of Green Energy, 141111165052003. https://doi.org/10.1080/15435075.2014.882841

Peng, S., Xu, J., Li, Z., Jiang, S., Munroe, P., Xie, Z., & Lu, H. (2019). A reactive-sputter-deposited TiSiN nanocomposite coating for the protection of metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Ceramics International*, *46*(3), 2743–2757. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.263

Rashtchi, H., Atapour, M., Elmkhah, H., & Rashtchi, H. R. (2024). Nanostructured multilayer Cr/CrN coatings on 316L stainless steel for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates. *Fuel*, *377*, 132761. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132761

Shangguan, P., Wang, H., & Wang, L. (2021). *Metal bipolar plate, preparation method thereof and fuel cell* (Çin Patent No. CN 110783594 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Shangguan, P., Wang, H., & Wang, L. (2023). *Metal bipolar plate, preparation method thereof and fuel cell (*Çin Patent No. CN 109560290 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Shi, J., Zhang, P., Han, Y., Wang, H., Wang, X., Yu, Y., & Sun, J. (2020). Investigation on electrochemical behavior and surface conductivity of titanium carbide modified Ti bipolar plate of PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(16), 10050–10058. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.203

Shi, X., & Tang, Z. (2023). *Carbon coated hydrogen fuel cell bipolar plates* (U.S. Patent No. US 11,855,308 B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Silva, F., Ramirez, O. P., Tunes, M., Edmondson, P., Sagás, J., Fontana, L., De Melo, H., & Schön, C. (2020). Corrosion resistance of functionally graded TiN/Ti coatings for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(58), 33993–34010. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.037

Taherian, R., Mohammadi, M., & Samiei, Z. (2021). Investigation of graphite conductive adhesive coated on SS316L used for bipolar plates of proton-exchange membrane fuel cell. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *36*(10), 1094–1111. https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1962079

Tan, Q., & Wang, Y. (2022). Preparation and properties of conductive Ti4O7 surface coating for Ti bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, *911*, 165098. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165098

Tang, W., Wang, S., Li, S., Yu, S., Yuan, X., Yang, C., & Li, W. (2023). Research progress on coating and coating technology of fuel cell metallic bipolar plate. *Next Materials*, *4*, 100062. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100062

Tian, R., & Sun, J. (2011). Corrosion resistance and interfacial contact resistance of TiN coated 316L bipolar plates for proton exchange membrane fuel

cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(11), 6788–6794. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.021

Wang, H. (2003). Stainless steel as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, *115*(2), 243–251. https://doi.org/10.1016/s0378-7753(03)00023-5

Wang, H., & Turner, J. A. (2011). Electrochemical nitridation of a stainless steel for PEMFC bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(20), 13008–13013. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.045

Wang, H., Cao, G., Zhang, Y., & Wang, J. (2023). *Protective coating for fuel cell connector and method for preparing same [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patenti No. CN 116140613 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Wang, L., Northwood, D., Nie, X., Housden, J., Spain, E., Leyland, A., & Matthews, A. (2010). Corrosion properties and contact resistance of TiN, TiAlN and CrN coatings in simulated proton exchange membrane fuel cell environments. *Journal of Power Sources*, *195*(12), 3814–3821. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.127

Wang, L., Sun, J., Kang, B., Li, S., Ji, S., Wen, Z., & Wang, X. (2013). Electrochemical behaviour and surface conductivity of niobium carbide-modified austenitic stainless steel bipolar plate. *Journal of Power Sources*, *246*, 775–782. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.025

Wang, S., Peng, J., Lui, W., & Zhang, J. (2006). Performance of the gold-plated titanium bipolar plates for the light weight PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, *162*(1), 486–491. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.084

Wang, X., Zhang, M., Shi, D., Zhang, S., Wu, Y., Gong, W., & Fan, H. (2022). Long-term polarization accelerated degradation of nano-thin C/Ti coated SS316L bipolar plates used in polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(14), 8974–8992. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.229

Wang, Y., Zhang, S., Lu, Z., Wang, L., & Li, W. (2018). Preparation and performances of electrically conductive Nb-doped TiO2 coatings for 316 stainless steel bipolar plates of proton-exchange membrane fuel cells. *Corrosion Science*, *142*, 249–257. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.07.034

Yan, P., Cao, S., Ying, T., Yang, Y., Cao, F., & Zeng, X. (2023). Novel Graphite Paper/Cu-Coated Magnesium as Bipolar Plates for Ultra-lightweight Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society, 170*(5), 054510.

Yan, P., Ying, T., Li, Y., Li, D., Cao, F., Zeng, X., & Ding, W. (2020). A novel high corrosion-resistant polytetrafluoroethylene/carbon cloth/Ag coating on magnesium alloys as bipolar plates for light-weight proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, *484*, 229231. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229231

Yan, P., Ying, T., Yang, Y., Cao, F., Li, Y., Wang, J., & Zeng, X. (2022). Investigation of anodized Ta/Ag coating on magnesium bipolar plate for lightweight proton exchange membrane fuel cells. *Corrosion Science*, *197*, 110086. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110086

Yan, W., Zhao, Y., Zhang, Y., Li, Q., Chen, S., Yuan, H., Zhang, Z., Chen, L., Luo, J., Pang, P., He, G., Ying, M., & Liao, B. (2022). Corrosion-resistant and interfacial conductive AlTiVCrMo high-entropy alloy and (AlTiVCrMo)Nx high-entropy ceramics coatings for surface modification of bipolar plates in

proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, *527*, 231217. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231217

Yang, L., Qin, Z., Pan, H., Yun, H., Min, Y., & Xu, Q. (2017). Corrosion protection of 304 stainless steel bipolar plates of PEMFC by coating SNO2 film. *International Journal of Electrochemical Science*, *12*(11), 10946–10957. https://doi.org/10.20964/2017.11.67

Yi, P., Zhang, W., Bi, F., Peng, L., & Lai, X. (2018). Microstructure and properties of a-C films deposited under different argon flow rate on stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, *410–411*, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.054

Zhang, D., Duan, L., Guo, L., Wang, Z., Zhao, J., Tuan, W., & Niihara, K. (2011). TiN-coated titanium as the bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(15), 9155–9161. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.04.123

Zhang, D., Yi, P., Peng, L., Lai, X., & Pu, J. (2019). Amorphous carbon films doped with silver and chromium to achieve ultra-low interfacial electrical resistance and long-term durability in the application of proton exchange membrane fuel cells. *Carbon*, *145*, 333–344. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.01.050

Zhang, Q., Gu, C., Mao, J., Li, A., Cao, Y., Wo, X., Qu, C., Ma, J., Huang, J., & Luo, L. (2024). *Preparation method of Ti3SiC2 ceramic coating on metal bipolar plate and metal bipolar plate [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patenti No. CN 114561680 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Zhang, X., Wang, Z., Wu, R., Jiang, H., & Wang, J. (2024). Preparation and performance of Graphene-Doped indium tin oxide coatings on titanium bipolar plate surface. *Materials Chemistry and Physics*, *327*, 129833. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129833

Zheng, L., Li, X., Dai, Z., He, T., & Wei, S. (2023). *A multilayer gradient coating Cr/CrN/(Cr,Ti)$_2$AlC for proton exchange membrane fuel cell metal bipolar plate and construction method thereof* (Çin Patenti No. CN 116716578 A). Çin Devlet Fikri Mülkiyet Ofisi.

Zheng, L., Zhu, W., Xie, J., Shen, J., Dai, Z., Wang, X., & Li, X. (2023*). A multilayer gradient coating Cr/CrN/(Ti,W)$_3$AlC$_2$ for metal bipolar plate of hydrogen fuel cell and construction method thereof* (Çin Patenti No. CN 116536626 A). Çin Devlet Fikri Mülkiyet Ofisi.

Zhao, Y., Wei, L., Yi, P., & Peng, L. (2015). Influence of Cr-C film composition on electrical and corrosion properties of 316L stainless steel as bipolar plates for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(2), 1142–1150. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.047

Zhu, G., Lu, P., Hu, R., & Tang, J. (2023). Stainless steel metal bipolar plate, preparation method thereof and fuel cell] (Çin Patent No. CN 112909281 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

Zhu, Y., Zhao, Z., Yang, X., Cao, Y., Meng, X., & Wen, S. (2024). *Conductive stable coating for metal bipolar plate and preparation method thereof [İngilizce Çevirisi]* (Çin Patenti No. CN 118073593 B). Çin Ulusal Fikri Mülkiyet İdaresi.

GlobeNewswire. (2025, 9 Nisan). *Fuel Cell Bipolar Plates Market Size, Share, Trends, Dynamics, Forecast, & Growth Analysis: 2024-2035*. https://www.globenewswire.com/news-

release/2025/04/09/3058212/0/en/Fuel-Cell-Bipolar-Plates-Market-is-Forecasted-to-Reach-US-6-5-Billion-in-2035-Says-Stratview-Research.html.

Harrington, T. (2023, 20 Ocak). *ZeroAvia conducts landmark first test flight of a hydrogen-electric powered 19-seat commercial aircraft*. GreenAir News. https://www.greenairnews.com/?p=3798

Transparency Market Research Inc. (t.y.). *Fuel cell bipolar plate market*. https://www.transparencymarketresearch.com/fuel-cell-bipolar-plate-market.html. Erişim tarihi: 26 Nisan 2025.

ZeroAvia. (t.y.). [Yolcu uçağı üretimi ve hidrojen-elektrik teknolojileri hakkında ana sayfa bilgileri]. https://zeroavia.com/. Erişim tarihi: 29 Eylül 2025.

Killerin Fiziksel, Kimyasal ve Yapısal Özelliklerinin Farklı Karakterizasyon Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi

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

Kil mineralleri tarım, petrol sondajı ve inşaat endüstrisi petrol endüstrisi için çok önemlidir ve rezervuar içindeki hemen hemen her türlü jeolojik sorun hakkında yararlı bilgiler sağlar. Kil mineralleri, özel özellikleri (katyon değişim kapasitesi, şişme, sorpsiyon gibi) nedeniyle rezervuar jeolojisi için büyük önem taşır. Bu mineraller, petrol ve gaz rezervuarlarının oluşumunda, hidrokarbonların birikiminde ve göçünde ve son zamanlarda yeraltında CO_2 depolamada ve hidrokarbon üretimi sırasında geçirgenliğin kontrolünde önemli bir rol oynamaktadırlar.

Kil minerallerinin (kaolinitler, illitler, montmorillonitler ve kloritler) ve mikaların (muskovitler, glaukonitler) yapısı ve içeriği, kayaların ve tüm kaya kütlesinin davranış ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Geleneksel analitik yöntemlerle gerçek kaya örneklerinde kil minerallerinin kesin olarak tanımlanması oldukça karmaşıktır. Bu çalışmada, kilin mikro yapısı, morfolojisi, kimyasal, yapısal ve termal özellikleri X-Ray Floresans Analizi (XRF), X-ray difraksiyon analizi (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX), Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve termal analiz (TGA) ve BET Ölçüm teknikleri kullanılarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Killer, Karakterizasyon, XRF, XRD, FTIR, SEM, TEM, TGA, BET.

GİRİŞ

Kil mineralleri çok küçük tane boyutuna sahiptirler (0,002 mm'nin altında). Kil minerallerinin yapısını anlamak, tek tek mineraller, kristal olmayan kapanımlar hakkında gerekli bilgileri elde etmek ve organik maddelerin varlığını tespit etmek için çok önemlidir. Killerin karakterizasyonu, kalitatif ve kantitatif analiz için enstrümantal teknikler kullanılarak gerçekleştirilir (Dai vd., 2020; Frost vd., 2002:2849; Ming, 2004:349; Adeyemo vd., 2015:1; Alkan vd., 2005:51; Bergaya vd., 2006:1; Patel vd., 2006:133).

Yapı ve fiziksel özellikler arasında kurulan ilişkiler, istenen özelliklere sahip ürün özelliklerini kontrol etmek için önemli olacaktır. Doğal killer, X-Ray Floresans (XRF), X-Ray Difraksiyon (XRD), Fourier Dönüşümü Kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Transmisyon ve Taramalı elektron mikroskobu (TEM, SEM), termal analiz (TG/DTA) ve Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi ile karakterize edilmiştir. Kil minerallerinin yüksek yüzey alanı, kil parçacıklarının küçük boyutu ve plaka benzeri yapısı sayesinde elde edilir. Kil minerallerinde, plakalar negatif elektrik yükü taşır ve bu yük, Na, K veya Ca gibi pozitif iyonlardan (katyonlar) oluşan ve plakayı çevreleyen tabaka tarafından dengelenir. Kil, alternatif katyonlar içeren bir

çözelti ile birleştirildiğinde, bu iyonların kil parçacıklarını çevreleyen tabakadaki mevcut katyonların yerini aldığı bir değişim meydana gelebilir. Bu, killere önemli bir iyon değişim kapasitesi kazandırır. Kil örnekleri, malzemelerin kimyasal bileşimi açısından XRF ile karakterize edilmiştir. XRD ölçümleri, kilin amorf veya kristal fazını ve kalitatif mineralojisini araştırmak için gerçekleştirilir ve bu, kil minerallerinin karakterizasyonu için yarı kantitatif değerlendirmelerin temelini oluşturur. FTIR spektroskopisi, kil minerallerinin kızılötesi radyasyonu emmesinin, atom kütlesine ve bu minerallerin yapılarındaki atomlar arası bağların uzunluğu, gücü ve kuvvet sabitlerine büyük ölçüde bağlı olduğunu anlamak için kullanılır. Ayrıca, birim hücrenin genel simetrisi ve birim hücre içindeki her atomun yerel site simetrisi kısıtlamaları tarafından da kontrol edilir. Kızılötesi radyasyonun absorplanması, kristal düzenin derecesi ve mineral parçacıklarının boyutu ve şekli tarafından da güçlü bir şekilde etkilenir. Kilin yüzey mikro yapılarını çözmek için SEM ve TEM görüntüleri alınır. Malzemelerin termal bozunması ve stabilitesi, farklı ısıtma hızlarında termogravimetrik analiz (TG/DTA) ve türev termogravimetrik analiz ile elde edilmiştir. Spesifik yüzey alanı ve gözenek boyutu dağılım analizinin belirlenmesi için BET ölçümleri kullanılmıştır.

KİLLERİN X-IŞINI FLORESAN (XRF) ANALİZİ

Numunelerin toplam kimyasal bileşimini belirlemek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Islak kimyasal yöntemler, malzemenin (esas olarak silikatlar) eritilerek çözülmesi ve plazma spektroskopisi (ICP-AES, ICP-MS) veya atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) gibi teknikler kullanılarak çözeltideki konsantrasyonların belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Diğer bir olasılık ise X-ışını floresan spektroskopisi (XRF) kullanmaktır. XRF'nin tespit limitleri ıslak kimyasal yöntemler kadar iyi değildir, ancak avantajı, tüm elementlerin aynı hazırlıktan aynı anda belirlenmesi olmasıdır.

X-ışını floresans (XRF) spektroskopisi, kayaların, sedimanların ve toprak materyali örneklerinin jeokimyasal bileşimini rutin olarak tahmin etmek için en yaygın kullanılan ve en iyi bilinen yöntemlerden biridir (Ling vd., 2017:303; Tolosana-Delgado ve McKinley, 2016:263; Weltje ve Tjallingii, 2008:423; Young vd., 2016:77). XRF spektrometrisi, uzun yıllardır milyon başına parça (ppm) düzeyinde bir dizi ana ve iz elementin jeokimyasal konsantrasyonlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, jeolojik, arkeolojik ve endüstriyel numunelerin başarılı bir şekilde incelenmesinde de

kullanılmaktadır (Young vd., 2016:77). Bu tekniğin yaygın olarak kullanılmasının bir nedeni, X-ışını radyasyonu yoluyla katı numuneleri analiz etme kabiliyetidir (Weltje ve Tjallingii, 2008:423). Dünya'nın birçok katı maddesinin jeokimyası, ana kayaç, iklimsel-çevresel koşullar ve maddeyle olası antropojenik etkileşimlerin bir ürünü olarak kabul edilmektedir (Jalali ve Jalali, 2016:49). Bu nedenle, XRF'nin birçok toprak malzemesinin (cam diskler, toz peletler veya toplu toz numuneler) ana oksit/element bileşimini belirleme yeteneği, onu birçok laboratuvar ortamında kullanışlı hale getirmiştir (Young vd., 2016:77). XRF, Dünya'nın mineral ve kimyasal bileşimlerinin jeokimyasal araştırmasında standart bir yöntem olmaya devam etmektedir.

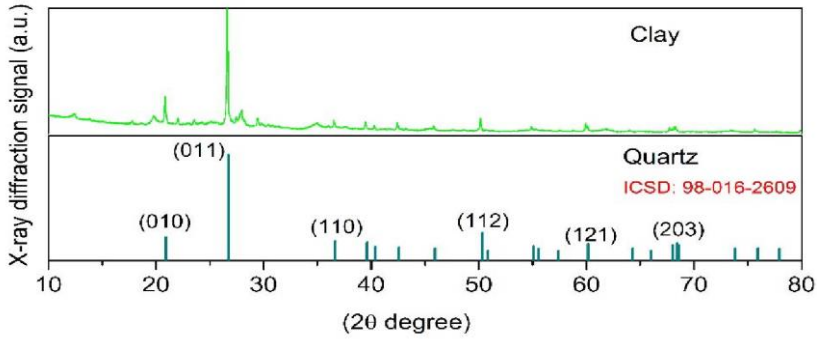
XRF spektrometrisi, çoğu Dünya element bileşimlerinin göreceli varyasyonlarını hızlı bir şekilde yüksek çözünürlükte değerlendirebilme yeteneği nedeniyle özellikle değerlidir (Löwemark vd., 2011:1250). XRF spektrometrisi, X-ışınları atomun yüksek enerjiye sahip foton veya hızlandırılmış elektron ile uyarılması sonucu atomdan koparılan bir elektronun, atom yörüngesinde bıraktığı boşluğun dış yörüngedeki elektronun boş seviyeye geçişi ile işlem tamamlanır (Weltje ve Tjallingii, 2008:423). Bu teknik, çeşitli ortam ve koşullardan elde edilen birçok malzemenin incelenmesinde kullanılmaktadır (Chalmers ve Bustin, 2017:93; Löwemark vd., 2011:1250; Oyedotun, 2016:432; Özkul vd., 2017:31; Rivera vd., 2016:254; Sabaou vd., 2009:158). XRF'nin geniş kullanım alanı, alternatif yöntemlere göre muhtemelen daha yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlaması (Weltje ve Tjallingii, 2008:423) ve ppm aralığındaki birçok elementin tespit sınırlarını belirleyebilmesinden kaynaklanmaktadır (Löwemark vd., 2011:1250).

XRF prosedürü, birbiriyle bağlantılı süreçleri içerir (Sakurai vd., 2004:277; Weltje ve Tjallingii, 2008:423). XRF cihazından gelen X ışınları, bir atomun elektronunu iç yörüngesinden çıkarır. Bu, atomun uyarılmasına ve yüksek enerjili radyasyonun (fotonlar, protonlar, elektronlar vb.) üretilmesine neden olur. Üçüncü süreç, karakterize edilmiş yayılan çizgilerin algılanması ve entegrasyonunu içerir ve bu da değişen yoğunluk seviyeleri sağlar. Bu sürecin son aşaması, algılanan çizgi yoğunluklarının element konsantrasyonlarına dönüştürülmesidir. Yer malzemeleri (örneğin doğal kayalar), ışığın davranışını birçok karmaşık şekilde etkileyen, oldukça değişken bileşim ve yapılara sahip çeşitli elemental minerallerden oluşur. Bu elementlerin tanımlanması, belirli koşullar altında bu bileşimlerin karakteristik yayılan radyasyonu kullanılarak X-ışını yöntemleri (örneğin XRF) ile hayati öneme sahiptir. XRF laboratuvar analizleri ve yerinde saha ölçümleri için enstrümantasyon alanında, jeokimyasal analiz ve araştırma yetenekleri nedeniyle çeşitli ilerlemeler kaydedilmiştir (Margui vd., 2016:1; Weltje ve Tjallingii, 2008:423; Young vd., 2016:77; Margui vd., 2022). Kilde bulunan minerallerin kimyasal bileşimlerini öğrenmek için XRF karakterizasyonu yapılmıştır. Kil, alümina ve silika oksidin XRF analizinden

elde edilen veriler, diğer minerallerin eser miktarlarda bulunurken, büyük miktarlarda mevcut olduğunu göstermektedir. Bu, kilin kimyasal analizini doğrulamaktadır.

KİLLERİN X-IŞINI KIRINIMI (XRD)

Kil minerallerinin en karakteristik özelliği bazal yansımalarıdır (tip *001*). Plakalı kil mineral tanelerinin agrega yüzeyine paralel olduğu preparatların difraktogramlarında sadece 001 pikleri görülür. Kuvars, feldispatlar ve diğer tabakalı olmayan minerallerin varlığı tercih edilen yönelimi bozar ve bu nedenle daha az tabakalı olmayan mineral içeren kil fraksiyonu (< 2 µm) veya daha ince fraksiyon (< 1 µm veya < 0,2 µm) kullanılmalıdır. Bununla birlikte, smektitler diğer kil minerallerinden daha ince tanelidir ve < 0,2 µm fraksiyonu muhtemelen sadece smektitler içerir.



Şekil 1: Kilin X-ışını difraksiyon (XRD) deseni (Keskin, 2023:1)

Kil numunesinin kristal yapısını belirlemek için yapılan XRD analizi, standart kuvars deseniyle önemli bir uyum olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, (011) yönelimlerinin yoğunluğu, diğer önemli yönelimlerle birlikte maksimum düzeyde uyum sergilemiştir. Kuvars, doğada bulunan tüm minerallerde bol miktarda bulunur ve alüminyum silikat grubunun bir üyesi olan kilin, XRD difraksiyon deseninde kuvars ile uyum göstermesi beklenir (Karakaya, 2006; Ayalew, 2023).

KİLLERİN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)

Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM), hammaddelerin ve hammaddelerden sentezlenen killerin morfolojisini incelemek için kullanılabilir. Killerin mikromorfolojileri, hızlı ve tahribatsız bir teknikle yüzey özellikleri, parçacık boyutu ve parçacık dağılımı hakkında bilgi verir (Ural, 2021:197). Kil numunelerinin SEM görüntülerinden elde edilen morfolojik karakterizasyon, farklı büyütme oranlarında çekilmiştir. Genellikle tabakalı yapılar mevcuttur ve bu tabakalı yapılar içinde keskin kenarlı kırık yapılar görülmektedir. Kaba taneli mineraller, morfolojileri gözlemlenerek ve EDX yardımıyla kimyasal bileşimleri hakkında bilgi edinilerek tanımlanabilir.

Yapısal karakterizasyon, Enerji Dağıtıcı X-Işını (SEM-EDX) analizi ile Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. SEM mikrografları ve EDX spektroskopilerine ek olarak, incelenen parametrelerin üretilen numunelerin element dağılımı üzerindeki etkisini incelemek ve böylece elementlerin oranları aracılığıyla matrisin bir değerlendirmesini elde etmek için element haritalamalar yapılmıştır. Element haritalaması, genel olarak elementlerin homojen bir dağılımının gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Gözlemler, elde edilen sonuçlar ve numunelerin mikrografları ile uyumlu olarak değerlendirilmektedir. Karışımların SEM mikrografları ve EDX spektroskopileri; incelenen numunelerin mikrografları, kil bileşenleri arasında tatmin edici bir kompaktlık derecesi ve iyi bir mikro yapısal bağlanma olup olmadığını göstermektedir. (Liu vd., 2011:97; Ashrul Asbollah vd., 2022:6617; Ural, 2021:197).

KİLLERİN TRANSMİSYON ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM) ANALİZİ

Transmisyon elektron mikroskobu, tekli kil mineral tanelerinin gözlemlenmesi için kullanılabilir. Çözünürlük yeterince iyi olduğu durumda, katmanların istiflenmesi, alanların kalınlığı ve katmanlar arası yapının doğası gözlemlenebilir. Tabaka katmanlarının kalınlığını gözlemleyebilmek için, tabakaların preparat yüzeyine neredeyse dik olacak şekilde preparasyon yapılmalıdır. İnce bir süspansiyon hazırlayıp karbon kaplı metal ızgara üzerine damlatmak geleneksel yöntemdir ve kil tabakalarının sadece "yukarıdan" gözlemlenmesine izin verir. TEM cihazı EDS ve elektron difraksiyonu ile donatılmışsa, tekil tanelerin kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi

elde edilebilir (Inoue vd., 1987:111; Drief vd., 2002:746; Bentayeb vd., 2003:211; Dudek vd., 2002:562).

KİLLERİN FOURİER DÖNÜŞÜMLÜ KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ (FTIR)

Killerin hidrasyon özellikleri, tabakalar arası katyonlar ve nem içeriği hakkında titreşim spektroskopik araştırmaları yararlı bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca, şişmeden kaynaklanan kristal simetrisi değişikliklerinden kaynaklanan Si-O titreşimlerindeki değişiklikleri incelemek için yararlı bir araçtır. FTIR spektroskopisi, analiz edilen malzemenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi sağlayan çok hassas bir tekniktir ve killerin incelenmesinde kullanılır. Spektrumda bulunan absorpsiyon bantları, her bir bağ türüyle ilgilidir ve kil minerallerinin tanımlanması için gereklidir. Bantın bölünmesi, farklı absorpsiyon frekansları nedeniyle birden fazla hidroksil bağı türünün varlığını gösterir.

Kilin benzersiz özelliklerini ortaya çıkaran, farklı oranlarda Mg, K, Ca, Fe gibi iyonların varlığı ve tabii ki moleküler yapısıdır. Doğal kil numunesinin FTIR karakterizasyonu yapılarak, mevcut organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel grupların belirlenmesi amaçlanmıştır. Orta dalga boyu kızılötesi (MIR; 400~4000 cm^{-1}) bölgesine dayalı olarak elde edilen geçirgenlik spektrumunda illit, kalsit, kaolinit ve tridimit varlığı gözlemlenmiştir (Keskin, 2023:1; Jozanikohan ve Abarghooei, 2022:2093). Literatüre uygun olarak, killerin kızılötesi transmisyon bant atama pikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Kilin kızılötesi transmisyon bant atamaları.

Titreşim Tipi	**Bölge**	**Pikin Özelliği**
Yüzey yapısal hidroksil gruplarının gerilme bantları	3750-3000 cm^{-1}	Geniş Bant
Serbest veya izole hidroksil grupları	3720 cm^{-1}	Zayıf Bant
Hidrojen bağları oluşturmuş hidroksil grupları	3660 cm^{-1}	Bant
Adsorbe edilmiş suyun hidroksil grubları	3520 ± 200 cm^{-1}	Bant
Si–H	2050-2550 cm^{-1} ve 1010-700 cm^{-1}	Bant
Si–O gerilme	1250-800 cm^{-1}	Pik
Hidroksil bükülme titreşimleri ve fiziksel olarak adsorbe edilmiş su	1650 cm^{-1}	Pik
Al–O–Al grupları	900-850 cm^{-1}	Bant
Serbest silikat grupları	795 cm^{-1}	Pik
Si–O–Al titreşimleri	790-750 cm^{-1}	Bant
Al–O titreşimleri	630 cm^{-1}	Pik
Si–O titreşimleri	1400 cm^{-1} ve 525 cm^{-1}	Pik
Si–O–Al iskelet titreşimleri	540-420 cm^{-1}	Bant
Mg_3OH'nin OH gerilme titreşimleri	3718 – 3680 cm^{-1}	Bant
Si–OH grubunun OH gerilme titreşimleri	3719 cm^{-1}	Pik
Zeolitik suyu temsil eden ve oktahedral tabakada magnezyumla koordine olan bağlı su	3520-1400 cm^{-1}	Pik
Bağlı suyun varlığı	1625 cm^{-1} ve 530 cm^{-1}	Bant
Si–O–Si gruplarının tetrahedral tabakada içindeki Si–O gerilme titreşimleri	1020 cm^{-1}	Keskin Bant
Simetrik ve asimetrik NH_2 bantları	3278 ve 3380 cm^{-1}	Geniş Pik
Si-CH_3 grubu	1275-1260 cm^{-1} ve 880-760 cm^{-1}	Geniş Bant
C-H	2900-3200 cm^{-1}	Geniş Bant
Si-Cl	1400-1450 cm^{-1}	Pik

Kaynak: Ullah vd., 2014:135; Ramasamy vd., 2009:1295; Tekin, 2004:35

KİLLERİN TERMOGRAVİMETRİK ANALİZİ

Uluslararası Termal Analiz ve Kalorimetri Konfederasyonu (ICTAC), termal analizi (TA), bir numunenin sıcaklık programına tabi tutulmasıyla zaman içindeki fiziksel veya kimyasal özelliklerindeki değişiklikleri izleyen bir grup teknik olarak tanımlamaktadır. Termogravimetrik analizörler (TGA), numune kütlesini, zamanı ve sıcaklığı izler ve kaydeder. Sıcaklık programı ısıtma, soğutma, izotermal tutma veya bunların bir kombinasyonunu içerebilir (Vyazovkin vd., 2011:1). Analizör, sıcaklık programlayıcı ve kontrolörlü bir fırın içindeki numune kabına bağlı hassas bir mikro terazi olan termo-teraziden oluşur. Terazi, kapalı bir fırında numunenin kütlesini ölçmektedir (Prime vd., 2009:241).

TGA, kütle değişimini izleyerek malzemelerin sıcaklıkla birlikte geçirdiği fiziksel ve kimyasal değişiklikleri karakterize eder. TGA'nın temel teorisi gerçekte basit görünse de, birçok uygulaması vardır; ısı ve kütle transferi gibi birçok reaksiyon, süreç ve olayı incelemek için ilk adım olabilir.

Termal analiz genellikle iki farklı deneysel tekniği kapsar:

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

TGA'nın temel prensibi, bir numunenin kütlesini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçmektir. Prensip olarak, bu basit ölçüm, katı hal kimyası ve malzeme biliminde önemli ve güçlü bir araçtır. Bu yöntem, kristalizasyon suyunu belirlemek, malzemelerin bozulmasını takip etmek, reaksiyon kinetiğini incelemek, oksidasyon ve indirgemeyi incelemek ve stokiyometrik formülü ve analizinin prensiplerini anlamak için kullanılabilir.

Kil mineralleri ve kayaların incelenmesi için termal yöntemlerin uygulanması, termal analizin kendisi kadar uzun bir geçmişe sahiptir. Termal analiz, minerallerin incelenmesinde, özellikle tanımlama, kantitatif analiz ve su varlığı konusunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bora, 2000:169). Kil minerallerinin temel termal reaksiyonları ve bunların meydana geldiği yaklaşık sıcaklık aralıkları genellikle aşağıdaki kategorilerde ele alınır:

• *400°C'nin altındaki düşük sıcaklık:* katmanlar arasında adsorbe su ve moleküler su kaybı

• *400 – 750 °C arası orta sıcaklık:* dehidroksilasyon ve yarı kararlı dehidroksilasyon fazlarının oluşumu

• *750°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklık*: yeniden kristalleşme ve yeni fazların oluşumu.

Termal analiz kullanmanın bir sorunu, kil minerallerinin genellikle karışımlar halinde bulunması ve bu nedenle termal reaksiyonların karışımların reaksiyonları olmasıdır. Bu karmaşıklıklar göz önüne alındığında, öncelikle "iyi bilinen" kimyasal ve yapısal bileşime sahip tek mineral fazlar için optimum koşulları dikkate almak mantıklıdır. Daha fazla bilgi ile, bu tür karışık sistemlerin daha karmaşık davranışlarını dikkate almak daha kolaydır (Tabak vd., 2005:311). Davranış sistemi, sadece başlangıç mineral bileşimine

değil, aynı zamanda farklı sıcaklıklarda oluşan ürünlere, kinetik ve reaksiyon mekanizmasına ve fazlar arasındaki kristal-kimyasal ilişkilere de bağlıdır. Ortaya çıkan TG/DTA eğrileri, özellikle pik sıcaklıkları, sadece karışık bileşenlerin sayısı ve karakteri ile değil, aynı zamanda numunenin kütlesi ve parçacık boyutu ile ısıtma hızından da etkilenir (Yermiyahu vd., 2003:431).

KİLLERİN BET ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin yüzey alanı ve gözenek yapısı analizi BET yöntemi ile karakterize edilmiştir. Katalitik uygulamalarda ve ağır metal adsorpsiyonunda, fotokatalizörlerin ve adsorbanların performansı genellikle belirli yapısal özelliklerle (örneğin gözenek hacmi ve yüzey alanı) ilerler. Killer, genellikle yüksek gözenek hacmi ve geniş yüzey alanından oluşan iyi bilinen malzemelerdir. Bunların ağır metal adsorpsiyonuna önemli ölçüde katkıda bulunduğu bulunmuştur.

BET gaz adsorpsiyon teorisi, yüksek özgül yüzeyli malzemelerin yüzey alanının ölçülmesinin temelini oluşturur (Brunauer vd., 1938) ve dikkat çekici bir şekilde, BET yöntemi, iri taneli numuneden daha ince taneli numune için daha yüksek özgül yüzey alanı verir. BET yöntemiyle, N_2 adsorpsiyonundaki sınırlama nedeniyle sadece dış yüzey ölçülebilir (Song ve Sandí, 2001:119). BET yöntemi genellikle dış yüzey alanlarını ölçmek için kullanılabilir. Yüzey alanı, BET denklemi kullanılarak azot izotermlerinden hesaplanmıştır. Adsorpsiyon izotermesinin şekli, adsorpsiyon süreci ve adsorbat için kullanılabilir yüzey alanının boyutu hakkında niteliksel bilgi sağlayabilir. Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) sınıflandırmasına göre, izotermlerin türü I ve IV tiplerinin bir bileşimi eğilimindedir. Düşük bağıl basınçlarda, adsorpsiyon-desorpsiyon izotermlerinde hızlı bir artış gözlemlenir, bunu daha yüksek bağıl basınçlarda neredeyse yatay bir plato izler, bu da yüksek derecede mikro gözenekli malzemeleri gösterir. Histerezis döngüsünün olmaması, mezogözenekliliğin olmadığını gösterir ve killerin çoğunlukla mikro gözenekler içerdiğini ve mezogözeneklerin sadece küçük bir kısmını oluşturduğunu gösterir. Herhangi bir gözenekli katının dokusal karakterizasyonu için, yüzey alanı kavramı tam bir görsel resim vermez. Malzemenin tam olarak karakterize edilmesi için gözenek boyutu ve gözenek boyutu dağılımları gereklidir. Gözenekli bir malzemenin yapısal heterojenliği genellikle gözenek boyutu dağılımı açısından karakterize edilir. Bu gözenek boyutu dağılımı, katı bir iç yapının modelini temsil eder. Gözenek boyutu dağılımı, gözenekli malzemenin hem kinetik hem de denge özellikleriyle

yakından ilgilidir ve belki de karakterizasyon için en önemli hususdur (Lastoskie vd., 1993:4786; Önal ve Sarıkaya, 2007:14).

SONUÇLAR

Kil mineralleri ve killerden sentezlenen türevleri, çevresel iyileştirme sorunlarına değerli çözümler sunabilir. Bu çözümler, kil minerallerinin ülkemizde kolayca ulaşılabilir ve bol miktarda bulunan hammaddeler olması, üretim maliyetlerinin düşük olması ve mevcut endüstriyel atık su arıtma tesislerinin ihtiyaçlarını karşılaması ile ilgilidir. Katalizörler ve adsorbanlar gibi birçok endüstriyel ürün, oda sıcaklığında killerden sentezlenebilir ve bu da düşük veya sıfır sera gazı emisyonu salınımına neden olur. Bu, kili daha temiz üretim ve yeşil teknolojiler için uygun bir malzeme haline getirmiş ve ayrıca inşaat, yüzey mühendisliği ve sağlık gibi ilgili endüstrilerde "yeşil teknoloji" fırsatları sunmuştur.

Killerin oluşumlarını, kimyasal bileşimlerini, safsızlık içeriklerini, jeolojik geçmişlerini ve kil yüzeyinin karakterizasyonunu belirleyebilmek için analiz teknikleri de uygulanmıştır. Temel kil mineral örnekleri ve ilgili mineraller, X-Ray Floresans *(*XRF), X-Ray Difraksiyon (XRD), Fourier Dönüşümü Kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Transmisyon ve Taramalı elektron mikroskobu (TEM, SEM), termal analiz (TG/DTA) ve Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi ile incelenmiştir. Killerin kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri arasında kurulan ilişkiler, killerin ve killer kullanılarak sentezlenecek ürünlerin özelliklerinin belirlenmesinde önemli olacaktır.

REFERANSLAR

Adeyemo, A.A., Adeoye, I.O. and Bello, O.S., (2015). Adsorption of dyes using different types of clay: a review. Applied Water Science. 20, 1-26.

Alkan, M., Demirbaş, Ö., ve Doğan, M. (2005). Electrokinetic properties of kaolinite in mono-and multivalent electrolyte solutions. *Microporous and Mesoporous Materials*, *83*(1-3), 51-59.

Ashrul Asbollah, M., Sahid, M. S. M., Padmosoedarso, K. M., Mahadi, A. H., Kusrini, E., Hobley, J., ve Usman, A. (2022). Individual and competitive adsorption of negatively charged acid blue 25 and acid red 1 onto raw Indonesian kaolin clay. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(5), 6617-6630.

Ayalew, A. A. (2023). Physiochemical Characterization of Ethiopian Mined Kaolin Clay through Beneficiation Process. Advances in Materials Science and Engineering, 2023.

Bentayeb, A., Amouric, M., Olives, J., Dekayir, A., ve Nadiri, A. (2003). XRD and HRTEM characterization of pyrophyllite from Morocco and its possible applications. *Applied clay science*, *22*(5), 211-221.

Bergaya, F., Theng, B. K. G., ve Lagaly, G. (2006). Handbook of clay science, Elsevier Publications. *Amsterdam, The Netherlands.[Google Scholar]*.

Bora, M., Ganguli, J. N., ve Dutta, D. K. (2000). Thermal and spectroscopic studies on the decomposition of [Ni {di (2-aminoethyl) amine} 2]-and [Ni (2, 2′: 6′, 2″-terpyridine) 2]-Montmorillonite intercalated composites. *Thermochimica Acta*, *346*(1-2), 169-175.

Brunauer, S., Emmett, P. H., ve Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American chemical society, 60(2), 309-319.

Chalmers, G. R., ve Bustin, R. M. (2017). A multidisciplinary approach in determining the maceral (kerogen type) and mineralogical composition of Upper Cretaceous Eagle Ford Formation: Impact on pore development and pore size distribution. *International Journal of Coal Geology*, *171*, 93-110.

Dai, S., Bechtel, A., Eble, C. F., Flores, R. M., French, D., Graham, I. T., ... ve O'Keefe, J. M. (2020). Recognition of peat depositional environments in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, *219*, 103383.

Drief, A., Martinez-Ruiz, F., Nieto, F., ve Sanchez, N. V. (2002). Transmission electron microscopy evidence for experimental illitization of smectite in K-enriched seawater solution at 50 C and basic pH. *Clays and Clay Minerals*, *50*(6), 746-756.

Dudek, T., Srodon, J., Eberl, D. D., Elsass, F., ve Uhlik, P. (2002). Thickness distribution of illite crystals in shales. I: X-ray diffraction vs. high-resolution transmission electron microscopy measurements. *Clays and Clay Minerals*, *50*(5), 562-577.

Frost, R. L., Mako, E., Kristof, J., ve Kloprogge, J. T. (2002). Modification of kaolinite surfaces through mechanochemical treatment—a mid-IR and near-IR spectroscopic study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *58*(13), 2849-2859.

Inoue, A., Kohyama, N., Kitagawa, R., ve Watanabe, T. (1987). Chemical and morphological evidence for the conversion of smectite to illite. *Clays and Clay Minerals*, *35*, 111-120.

Jalali, M., ve Jalali, M. (2016). Geochemistry and background concentration of major ions in spring waters in a highmountain area of the Hamedan (Iran). Journal of Geochemical Exploration, 165, 49–61.

Jozanikohan, G., ve Abarghooei, M. N. (2022). The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis for the clay mineralogy studies in a clastic reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, *12*(8), 2093-2106.

Karakaya, M. 2006. Kil minerallerinin özellikleri ve tanımlama yöntemleri. Bizim Büro Basımevi, 656s, Ankara.

Keskin, İ. Ç. (2023). The Structural Characterızatıon, Investıgatıon Vıa Thermo And X-Ray Stımulated Lumınescence Propertıes Of Saros Gulf Clay Sample. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, *2*(36), 1-12.

Lastoskie, C., Gubbins, K. E., ve Quirke, N. (1993). Pore size distribution analysis of microporous carbons: a density functional theory approach. *The journal of physical chemistry*, *97*(18), 4786-4796.

Ling, Y.-Y., Zhang, J.-J., Liu, K., Ge, M.-H., Wang, M., ve Wang, J.-M. (2017). Geochemistry, geochronology, and tectonic setting of Early Cretaceous volcanic rocks in the northern segment of the Tan-Lu Fault region, northeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 144, 303–322.

Liu, C., Shi, B., Zhou, J., ve Tang, C. (2011). Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials. *Applied Clay Science*, *54*(1), 97-106.

Löwemark, L., Chen, H.-F., Yang, T.-N., Kylander, M., Yu, E.-F., Hsu, Y.-W., … Jarvis, S. (2011). Normalizing XRFscanner data: A cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes. Journal of Asian Earth Sciences, 40, 1250–1256.

Marguí, E., Queralt, I., ve Van Grieken, R. (2016). Sample preparation for X-ray fluorescence analysis. Encyclopedia of Analytical Chemistry, 1–25.

Marguí, E., Queralt, I., Andrey, D., ve Perring, L. (2022). Analytical potential of total reflection X-ray fluorescence (TXRF) instrumentation for simple determination of major and trace elements in milk powder samples. *Food chemistry*, *383*, 132590.

Ming, H. (2004). Modification of kaolinite by controlled hydrothermal deuteration–a DRIFT spectroscopic study. *Clay Minerals*, *39*(3), 349-362.

Oyedotun, T.D.T. (2016). Historical mining signatures: Geochemical and mineralogical evaluation of sediments in three coastal-estuarine systems. Journal of Coastal Zone Management, 19, 432.

Önal, M., ve Sarıkaya, Y. (2007). Preparation and characterization of acid-activated bentonite powders. *Powder Technology*, *172*(1), 14-18.

Özkul, C., Çiftçi, E., Tokel, S., ve Savaş, M. (2017). Boron as an exploration tool for terrestrial borate deposits: A soil geochemical study in Neogene Emet-Hisarcık basin where the world largest borate deposits occur (Kütahya-western Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, *173*, 31-51.

Patel, H. A., Somani, R. S., Bajaj, H. C., ve Jasra, R. V. (2006). Nanoclays for polymer nanocomposites, paints, inks, greases and cosmetics formulations, drug delivery vehicle and waste water treatment. *Bulletin of Materials Science*, *29*, 133-145.

Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., ve Riga, A. (2009). Thermogravimetric analysis (TGA). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*, 241-317.

Ramasamy, V., Rajkumar, P., ve Ponnusamy, V. (2009). Depth wise analysis of recently excavated Vellar river sediments through FTIR and XRD studies. *Indian journal of physics*, *83*, 1295-1308.

Rivera, M.B., Giráldez, M.I., ve Fernádez-Caliani, J.C. (2016). Assessing the environmental availability of heavy metals in geochemically contaminated

soils of the Sierra de Aracena Natural Park (SW Spain). Is there a health risk? Science of the Total Environment, 560–561, 254–265.

Sabaou, N., Ait-Salem, H., ve Zazoun, R.S. (2009). Chemostratigraphy, tectonic setting, and provenance of the Cambro-Ordovician clastic deposits of the subsurface Algerian Sahara. Journal of African Earth Sciences, 55, 158–174.

Sakurai, K., Tsuji, K., Cesareo, R., Brunetti, A., Castellano, A., Rosales Medina, M. A., Kawai, J. (2004). Special configurations. *X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances*, 277-433.

Song, K., ve Sandí, G. (2001). Characterization of montmorillonite surfaces after modification by organosilane. *Clays and clay minerals*, *49*(2), 119-125.

Tabak, A., Afsin, B., Aygun, S. F., ve Icbudak, H. (2005). Phenanthroline Cu (II)-bentonite composite characterization. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *81*(2), 311-314.

Tekin, G. (2004). Perlit ve sepiyolit'in amonyumheptamolibdat ile modifikasyonu ve elektrokinetik özellikleri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *6*(2), 35-49.

Tolosana-Delgado, R., ve McKinley, J. (2016). Exploring the joint compositional variability of major components and trace elements in the Tellus soil geochemistry survey (Northern Ireland). Applied Geochemistry, 75, 263–276.

Ullah, R., Deb, B. K., ve Mollah, M. Y. A. (2014). Synthesis and characterization of silica coated iron-oxide composites of different ratios. *Int J Compos Mater*, *4*(2), 135-145.

Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences*, *13*(1), 197-218.

Vyazovkin, S., Burnham, A. K., Criado, J. M., Pérez-Maqueda, L. A., Popescu, C., ve Sbirrazzuoli, N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica acta*, *520*(1-2), 1-19.

Weltje, G.J., ve Tjallingii, R. (2008). Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. Earth Planet Science Letters, 274(3–4), 423–438.

Yermiyahu, Z., Landau, A., Zaban, A., Lapides, I., ve Yariv, S. (2003). Monoionic montmorillonites treated with Congo-Red. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *72*, 431-441.

Young, K. E., Evans, C. A., Hodges, K. V., Bleacher, J. E., ve Graff, T. G. (2016). A review of the handheld X-ray fluorescence spectrometer as a tool for field geologic investigations on Earth and in planetary surface exploration. *Applied Geochemistry*, *72*, 77-87.

XRF, FTIR, XRD, Termal Analiz ve Yüzey Alanı Ölçümleri İle Bentonitlerin Karakterizasyonu

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

Kil teknolojisi, günümüzde kullanılan malzemelere kıyasla kilin üstün özellikleri sayesinde çeşitli alanlarda ürünlerin başarılı bir şekilde uygulanması nedeniyle ilgi çekicidir. Killer birçok endüstriyel uygulamada hammadde olarak kullanıldığından, ileri düzeyde karakterizasyonu gereklidir. Çeşitli killerin kimyasal bileşimini belirlemek için X-ışını floresan (XRF) analizleri yapılır ve böylece killerin kimyasal bileşimleri ve karşılaştırmaları görülebilir. Bir malzemenin XRF analizi ve farklı oksit içeriği hakkındaki bilgiler tek başına, malzemenin maruz kalacağı reaksiyonlara karşı tepkisini tahmin etmek için kullanılamaz. Bunu yapmak için, XRD deseni ile kil ve atık killerde bulunan alüminosilikat fazlarının davranışı arasındaki ilişki dikkate alınmalı ve incelenmelidir.

Killerin mikro yapısı, parçacık boyutu, morfolojisi ve zeta potansiyelinin etkileri açıklığa kavuşturulmalıdır. Bu nedenle, Al–Si kaynağının fiziksel özelliklerinin kil bazlı malzemelerin ürün kinetiği üzerindeki etkileri daha ayrıntılı olarak araştırılmalıdır. Killerin kalsinasyonu ve kalsinasyon koşullarının kil ürünlerinin mekanik davranışına etkileri hakkında çok az yayın yapılmıştır. Optimize edilmiş kalsinasyon koşulları, atmosferik nem ve kalsinasyon sıcaklığı ile kil minerallerinde bulunan su moleküllerindeki değişiklikler açıklanmalıdır. Böylece, daha yüksek kaliteli, daha saf killer ve kil ürünleri elde etmek için birçok yeni süreç geliştirilebilir.

Bu çalışmada, bentonitlerin mikro yapısı, morfolojisi, kimyasal, yapısal ve termal özellikleri, X-ışını floresan spektrometresi (XRF), Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, X-ışını difraksiyon kırınımı (XRD), termal analiz yöntemleri ve yüzey alanı ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bentonit, XRF, FTIR, XRD, Termal Analiz, Yüzey Alanı Ölçümleri.

GİRİŞ

Bentonit, esas olarak smektit grubuna ait bir kil minerali olan montmorillonit adı verilen hidratlı magnezyum-kalsiyum alüminyum silikattan oluşur. Volkanik külün yerinde devitrifikasyonu ile oluşan, çok ince parçacıklardan oluşan yüksek kolloidal ve plastik kil türüdür (Parker vd., 1998:32). Montmorillonit terimi, hem ilgili kil mineralleri grubu hem de bu grubun belirli bir üyesi için kullanılır (Bates ve Jackson, 1987:65). Smektit, Na, Ca, Mg, Fe ve Li-Al silikatlardan oluşan bu gruba verilen mineral adıdır. Smektit grubunda en yaygın olarak kullanılan mineral isimleri Na-montmorillonit, Ca-montmorillonit, saponit (Mg), nontronit (Fe) ve hektorit (Li) dir (Murray, 1999:39).

Reşadiye (Türkiye) bentonitlerinin element bileşimleri $[Al_{1.47}Fe_{0.29}Mg_{0.23}][Al_{0.076}Si_{3.29}]O_{10}(OH)_2$ şeklindedir. Reşadiye bentonitlerinin katyon değişim kapasitesi (CEC) değerleri, metilen mavisi adsorpsiyonu ile sırasıyla 92 ve 76 meq/100 g kil olarak belirlenmiştir. Reşadiye bentonitinin BET özgül yüzey alanı değerleri 28,2 m^2g^{-1} dır (Tabak vd., 2007:5). Organobentonitler, Pospisil ve arkadaşları tarafından kullanılan prosedüre benzer bir prosedür uygulanarak hazırlanabilirler (Pospisil vd., 2001:127). Yüzey modifikasyonu için kullanılan organik katyon, cetyl pyridinium chloride (CPC) dür. Damıtılmış sudaki %3,0 kütlece Na-bentonit içeren süspansiyonlar, su/izopropil alkol (1:1) karışımındaki CPC çözeltisi ile muamele edildi. Bu organobentonitler, santrifüjleme yoluyla su/izopropil alkol karışımından ayrılmış ve çift damıtılmış su ile iyice yıkanmış, ardından dondurularak kurutulmuş ve 200 μm boyutuna öğütülmüştür (Çaglar vd., 2009:242).

2:1 tabaka bağlarına sahip bir dioktahedral kil olan montmorillonit, 70 ila 130 meq/100 g arasında değişen yüksek bir katyon değişim kapasitesine (CEC) sahiptir. Bunun çoğu, ana katyonlarının, Si^{4+} ve Al^{3+} katyonlarının izomorfik ikamesinden kaynaklanmaktadır, ancak daha az bir kısmı tabakaların kenarındaki yüklerden kaynaklanmaktadır (Yu vd., 2000:36; Pütün, 2010:2761). Katyon ikameleri esas olarak oktahedral tabakalarda gerçekleşir ve kil minerallerinin fiziko kimyasal özelliklerinde büyük bir değişiklik yaratabilir (Juang vd., 2002; Lee vd., 2005; Chen vd., 1998; Alemdar vd., 2000; Starodoubtsev vd., 2003). İyon değişimi veya yüzey kompleksleşmesi yoluyla metal iyonlarının endüstriyel atık sulardan uzaklaştırılması için düşük maliyetli adsorbanlardandır. Etkili katalizör malzemeleri olarak geleneksel killerin ve modifiye edilmiş killerin kullanımı, hem uygulamalar hem de doğal süreçlerin anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır (Imai vd., 2003:162; He vd., 2005:287; Tabak vd., 2007:377; Pospisil vd., 2001:127; Mermut ve Lagaly, 2001:393).

X-IŞINI FLORESAN SPEKTROMETRESİ (XRF)

Kil örneklerinin kimyasal bileşimlerini belirlemek amacıyla bileşim analizi yapılmıştır. Killerde önemli miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 bulunmaktadır. Bentonitin kimyasal bileşimini belirlemek için X-ışını floresan analizi (XRF) yapılmıştır. Bentonit numunelerinde en bol bulunan oksitler SiO_2 ve Al_2O_3 dir. Analizler, Al_2O_3/SiO_2 oranlarının, kil numunelerinin montmorillonit

minerali içerdiğini gösterdiğini ortaya koymuştur. Aktivasyon işleminden sonra, bentonitin bileşiminin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. İşlem görmüş bentonitte Al_2O_3, MgO, CaO ve K_2O içerikleri azalırken, SiO_2 içeriği artmıştır. İşlem görmüş numunenin alümina konsantrasyonundaki azalma, asidik/alkalin (bazik) koşullar altında hidroliz nedeniyle oktahedral tabakadan Al^{3+} iyonlarının sızmasına bağlanabilir (Kumar vd., 2013:61). Benzer şekilde, diğer metal oksitlerin (Fe_2O_3 ve MgO) içeriklerinde görülen azalmalar, oktahedral tabakadan yapıdaki değişim pozisyonuna iyon göçünün ve ardından HCl ve NaCl ile aktivasyondan sonra bunların uzaklaştırılmasının bir sonucu olabilir (Maged vd., 2020:32980; Usman vd., 2012:1).

Bentonitin XRF verileri, sodyum hidroksit baz anhidritinin, Na_2O, kil numunesinden daha zengin olduğunu göstermektedir. Bu, plastik atıkların değerlendirilmesinde katalizör olarak kullanılmak için yararlı bir işarettir ve piroliz sürecini iyileştirme eğilimi yüksektir. Nikel (II) oksit de izlenmiştir, bu da bentonitin piroliz sürecinde önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymaktadır, ancak Li ve arkadaşları, biyokütle bileşenlerinin ağırlık kaybının düşük sıcaklık aralığında meydana geldiğini ve indirgeme inaktivasyon enerjisinde azalma gözlemlendiğini araştırmışlardır (Li vd., 2008:16; Wu vd., 2017:2039; Guan vd., 2002:31; Yu vd., 2000:36; Pütün, 2010:2761).

FOURİER DÖNÜŞÜMÜ KIZILÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ (FTIR)

Bentonitin FTIR spektrumunda, Al-Al-OH gerilme frekansı 3620 cm^{-1} de, bükülme frekansı ise 915 cm^{-1} de gözlemlenmiştir. Bu, dioktahedral smektitin karakteristik özelliği olarak kabul edilebilir. 3460 ve 1640 cm^{-1} frekanslarındaki bantlar hidrasyon suyunun OH gerilme ve bükülme frekanslarıdır. 1100 ile 1020 cm^{-1} frekansları arasındaki yoğun geniş bantlar Si-O gerilme frekanslarına aittir. Tetrahedral bükülme modları, Si-O-Al için 530 cm^{-1}, Si-O-Mg için 470 cm^{-1} ve Si-O-Si için 428 cm^{-1} değerlerindedir. 470 cm^{-1} deki bandın yoğunluğu normalde dioktahedral smektit için gözlemlenenden daha yüksektir. Bu durum, numunede bir miktar illit bulunmasından kaynaklanıyor olabilir.

OH uzamaları, Si–O titreşimleri ve işlenmemiş (doğal) Reşadiye bentonitinin bükülme pikleri sırasıyla 3600–3400, 1100–900 ve 750–400 cm^{-1} aralıklarındadır. Kalsit ve dolomitin belirgin CO_3 uzamaları ve OH-bağlı Fe^{3+} ve Al^{3+} 'nin bükülme modu sırasıyla 1430–1382 ve 888 cm^{-1} aralıklarında gözlemlenmiştir (Yariv, 2004:225). H-bağlı OH uzaması ve Al-sütunlu

bentonitlerin (Wyoming ve Reşadiye) bükülme modlarının yoğunluklarında önemli bir azalma vardır.

Aynı spektrumlarda ayrıca 1045 cm^{-1} 'de Si–O–Si gerilmesinin, 524 ve 465 cm^{-1} 'de Si–O–Al ve Si–O–Si bükülme modlarının 1052, 530 ve 470 cm^{-1} değişimleri ve 798 cm^{-1} deki serbest silika pikinin genişlemesi gösterilmektedir. Bu değişiklikler, interkalasyonlu alüminyum oxo (okso) katyonların kalsinasyon işlemi sırasında Si–OH–Al köprüleri ile ilişkili protonik bölgelerin oluşmasından kaynaklanmaktadır (Hassan ve Abdel-Khalek, 1998:99; Juang vd., 2002:234). Al–OH bükülme modunun yoğunluğundaki hafif azalma, tabaka arası polimerik katyonun kısmi dehidroksilasyonunun başlangıcına atfedilebilir (Hutson vd., 1999:447; Gil vd., 2005:119). Aynı OH/Al oranına sahip numunelerin 500–700 °C sıcaklık aralığında kalsinasyonunun, sütunların sinterlenmesi ve bentonitin kendi iç yapısının sıcaklık kaynaklı ayrışması nedeniyle OH gerilme ve bükülme modları dahil tüm piklerin yoğunluğunu azalttığı açıktır (Tabak vd., 2005:311; Jaboyedoff vd., 2001:156).

OH gerilme ve bükülme titreşimlerinin yoğunluklarındaki azalma ve ayrıca 5 cm^{-1} ile daha düşük frekansa kayma ve işlenmemiş bentonit ile karşılaştırıldığında organobentonitin bükülme pik noktasının keskinliği bu durumu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, organobentonitin (Reşadiye) Al–OH gerilme pik noktasının yoğunluğundaki azalma, OH grubu ile Na^+ katyonunun organik katyon ikamesi arasındaki elektrostatik etkileşimler açısından yorumlanabilir. Değiştirilebilir katyonların katyonik yarıçapı, yükü ve hidrasyon enerjilerindeki farklılıklar, oktahedral tabakadaki hidroksil grubu titreşimlerini etkiler ve bu da bu sonucun bir başka kanıtı olarak kabul edilebilir (Moreno vd, 1999:174). Organobentonitin (Reşadiye) dış kil bileşenlerinin bu etkileşime katkısı da göz ardı edilemez.

Bentonit örnekleri, *i*) negatif yüklü kil plaketleri ve katyonlar arasındaki çekim nedeniyle uzun menzilli elektrostatik etkileşimler, *ii*) silikat tabakasında örtüşen bağlanmayan sp^2 silikat tabakasındaki oksijenin bağlanmayan π orbitalleri ile organik katyonun aromatik halkasının bağlanmayan π orbitalleri (Ahmet ve Beytullah, 2001:673) ve *iii*) oksijen düzlemleri ile organik katyonlar ve organik katyonların kendileri arasındaki van der Waals kuvvetleri yoluyla etkileşime girerler. Bentonit numunelerinin yüzey özellikleri, inorganik katyonların organik katyonlarla değiştirilmesi sonucu inorganik katyonların güçlü hidrasyonu ile ilişkili hidrofilik bir yapıya dönüşür.

Organobentonitin (Wyoming) yüzey alanındaki azalma, işlenmemiş bentonitlere (Wyoming ve Reşadiye) kıyasla, organobentonitin yüzey alanındaki azalmadan nispeten daha yüksektir ve bu durum, tabakalar arası boşluğa eklenen organik katyon miktarıyla ilişkili olabilir. Organobentonitlerin yüzey alanlarındaki farklılıklar, diğer spektrofotometrik verileri ve CEC değerlerini desteklemektedir. Tüm organobentonitlerin yüzey alanındaki azalma, ara tabaka boşluğuna gömülü organik katyon türlerinin

makro gözenekli bir yapı oluşturarak mikro gözenek açıklıklarını tıkamasıyla açıklanabilir (Tabak vd., 2005:311).

Bentonit numunelerinin 3620 cm^{-1} deki yapısal OH bandı 3640 cm^{-1} e kayabilir (Çağlar vd., 2009:242). 2930 ve 2855 cm^{-1} frekanslarındaki bantlar, metil ve metilen gruplarının C-H gerilmesine atfedilmiştir. 3280 cm^{-1}'deki bant NH^{+4} 'nin gerilme moduna atfedilebilir. Diğer yandan, 1470 cm^{-1} 'deki bant NH^{+4}'nin bükülme titreşiminden veya metil ve metilen gruplarının deformasyon bantlarından kaynaklanmaktadır. Bunlar birbirleriyle de çakışabilirler. CH_3 ve CH_2 bantlarının frekansı, su mevcut olsun ya da olmasın, makul ölçüde sabit kaldığından, bu gruplar ile su arasında ve bunlar ile yüzey oksijenleri arasındaki hidrojen bağı önemli değildir.

Yapısal OH titreşimleri ve Si–O gerilmeleri ile OH bükülme modları, ham Ünye bentonitinin FTIR spektrumunda sırasıyla 3700–3200 ve 1300–440 cm^{-1} bölgelerinde bulunmuştur (Hunger, 1997:345; Tsiao vd., 1998:45). Sırasıyla Al–Al–OH ve Al–Mg–OH uzamalarından kaynaklanan 3624 ve 3614 cm^{-1} 'de gözlemlenen karakteristik OH uzama titreşimleri, bentonitin Al bakımından zengin oktahedral merkezleri ve magnezyumun alüminyum ile kısmi ikamesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, H-bağlı suyun OH gerilmesine ait 3400 cm^{-1} frekansındaki tümsek, Fe atomlarına göre Mg atomlarının oktahedral ikamesinin daha yüksek olduğunu göstermektedir (Tabak vd., 2005:311; Balcı ve Gökçay, 2002:46). 1730 ve 1370 cm^{-1} 'deki özellikler sırasıyla dolomitin kombinasyon modu ve karbonat gerilme piklerine karşılık gelir. Kuvars ve silikanın Si–O gerilme pikleri 789 cm^{-1} 'de çakışır ve dolomitin titreşimi 696 cm^{-1}'de silikanın Si O gerilmesiyle üst üste gelir. Katyon değişimi yapılmış numunelerdeki değişikliklerin çoğu 3700–3000 cm^{-1} bölgesinde gözlemlenmiştir, çünkü spektrumun geri kalan kısmı ham bentonit ile neredeyse aynıdır. Tüm katyon değişimi yapılmış numuneler katyonlara koordine olan OH grubu ile ilişkili olarak 3610 cm^{-1} civarında orta yoğunlukta bir pike sahiptir. Al–Al–OH gerilme modu ve (katyon-OH) H-bağlı, sırasıyla 3614 ve 3400 cm^{-1} de ortaya çıkmıştır. (katyon-OH) H-bağlı bant, değiştirilen katyonun türüne bağlı olarak 5–20 cm^{-1} kadar hafifçe aşağı doğru kaymıştır.

3500–3000 cm^{-1} aralığında çok geniş bir tümsek, farklı özelliklerden oluşmaktadır (Afşin vd., 2000:985). H_2O–H_2O, H bağlarında yer alan OH grupları, 3400 cm^{-1} civarında titreşimlere neden olurken, 3200 ile 3400 cm^{-1} arasındaki omuz, H_2O bükülme titreşiminin bir üst seviyesine atfedilir. Al^{3+} gibi güçlü polarize edici katyonlara koordine olan H_2O molekülleri, koordinasyonun dış kürelerindeki su türlerine daha güçlü H-bağları oluşturduğundan, muhtemelen M^{2+}–OH titreşiminden kaynaklanan 3200 cm^{-1} altındaki titreşimler yoğunlaşmıştır (Wang vd., 2004:27; Tsiao vd., 1998:45).

Önemli görünen şey, farklı türde katyon değişimi uygulandığında 3610 ve 3400–3000 cm^{-1} değerlerindeki piklerin oranıdır. Ünye bentonitinde katyonlar Ca ile değiştirildiğinde, Ca'nın değiştirilen katyonlardan daha fazla su koordine etmesi gerçeğiyle tutarlı olarak hidrasyon pik yoğunluğu azalır

(Figueras vd., 1989:91; Prokešová, 2003:165). Ancak, özellikle Pb-bentonitte, 3392 ve 3200 cm^{-1} 'de ortaya çıkan, yeni eklenen katyona özgü yeni özelliklere (katyon-OH), H-stabilize türler olarak atıfta bulunuyoruz (Mallouk vd., 1998:209). H_2O bükülme modu tüm katyon değiştirilmiş bentonit numunelerinin ATR spektrumlarında 990 cm^{-1} civarında Si– O –Si gerilme modlarına bağlı en yoğun piklerle birlikte 1630 cm^{-1} civarında gözlemlenir. (Al–Al–OH) ve (Mg–Al–OH) deformasyon pikleri, ham kil için sırasıyla 915 ve 840 cm^{-1} de, Na ve Ca bentonitlerinde ise biraz daha yüksek dalga sayılarında bulunur. Yukarıdaki pik noktalarına dayanarak, Al atomlarının, önemli miktarda Mg atomu içeren ham bentonitin oktahedral merkezlerinde baskın olduğu sonucuna varılabilir. Si–O–Al nedeniyle 514 cm^{-1} de ve Si-O-Si nedeniyle 467 cm^{-1} de, Si–O–Si nedeniyle tüm numunelerde sadece küçük değişiklikler vardır. Bu, yaklaşık 1630 cm^{-1} deki H_2 O-bükülme modu için de geçerlidir; bu mod, tüm spektrumlarda muhtemelen yapı ve hidrasyon kabuğu içindeki koordinasyon farkından kaynaklanan bir omuzdan oluşur (Mosser vd., 1997:789; Neaman vd., 2003:153; Kloprogge vd., 2006:640). Bu nedenle, su molekülü tercihen tabakalar arası katyonlara (Kraepiel vd., 1999:43) ve tabakalar arası boşluklarda hapsolmuş kalıntı suya koordine olduğundan, metal katyonlarının tabakalar arası su türlerine karşı farklı bağlanma yeteneklerine dayalı olarak OH titreşim bölgesinde gözlemlenen farklılıklar hakkında bazı bilgiler edinmek mümkündür.

X-IŞINI DİFRAKSİYON KARAKTERİZASYONU (XRD)

Bentonitin XRD paterni, 2θ değeri 8,806 ve I=%56 olan d(001)=10,03 Å bazal yansımaya sahip bir miktar illit içerdiğini göstermektedir. Montmorillonit d (001) bazal yansıma çizgileri, 2θ=6,585, d=13,41 Å'da gözlemlenmiştir.

(001) bazal pik, su ile işlemden sonra Wyoming bentoniti için 14,60 Å ve Reşadiye bentoniti için 14,15 Å genişlemiştir. Reşadiye bentonitinin d(001) bazal mesafesinin Wyoming bentonitine kıyasla daha yüksek genişlemesi, tabaka yükü ve değiştirilebilir katyonun boyutu ve yükü sonucunda Ca-montmorillonitten daha fazla genişleyen Na-montmorilloniti temsil etmektedir. NaCl ile doyurulmuş bentonitlerde, bu değerler Wyoming ve Reşadiye bentonitleri için sırasıyla 12,70 ve 12,20 Å olarak belirlenmiştir. Na-

bentonitler suya maruz kaldığında, Reşadiye'nin d001 değeri 14,52 Å'ya ulaşmış, ancak Wyoming bentonitinde Ca-montmorillonitten Na-montmorillonite tam dönüşüm gerçekleşmemesi ve jel oluşumu nedeniyle bu değer biraz değişmiştir. Bununla birlikte, bentonit (Wyoming) için kil bileşeni hariç kuvars (Q) ve bentonit (Reşadiye) için illit (I), α-kristobalit (α-Cr), kuvars, kalsit (C) ve dolomit (D) kaynaklı pikler hala bentonitlerin ve organobentonitlerin XRD modellerinde gözlemlenmiştir (Galindo-Rosales ve Rubio-Hernández, 2006). Bentonitin tabakalar arası metalik katyonlarının büyük organik katyonlarla değiştirilmesi, doğal bentonitlere göre bazal aralığın artmasına neden olmuştur. SiO_2–Al_2O_3–SiO_2 tabakasının kalınlığının yaklaşık 9,0 Å olduğu tahmin edilmektedir ve bu değer, modifiye bentonitlerin d001 değerlerinden çıkarılmıştır. Modifiye bentonitlerin d_{001} değerlerine bakıldığında, cetyl pyridinium (CP) katyonlarının Reşadiye için psödo trimoleküler, Wyoming için ise parafin kompleksi olarak tabakalar arası aralıkta yönlendirilmiş olabileceği öne sürülebilir (Chen vd., 1998). Organik katyonlar düz, yani kil plakalarına paralel veya kil tabakalarına dik olarak yatmış olsaydı ve kil ve/veya organik katyonlarla herhangi bir etkileşime girmemiş olsaydı, C–C, C–H ve C–N bağ uzunlukları dikkate alındığında, genişleme gözlemlenen değerden daha farklı olurdu (He vd., 2005:287; Reis ve Ardisson, 2003:33; Gyftopoulou vd., 2005:205).

Daha düşük CEC ve daha fazla miktarda dış kil bileşeni içeren bentonit (Reşadiye), aynı OH/Al oranında daha düşük bir tabakalar arası sütun yoğunluğuna sahip olacaktır. Dış bileşenler, sütun türleri ile 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda su evriminin bir sonucu olarak kırık uç katmanlar tarafından oluşturulan oksi hidroksit parçacıkları gibi ara ürünler arasındaki etkileşimi zayıflatır ve böylece, mezoporöz (mezogözenekli) dokunun tamamen ayrışmasından önce termal kararsızlık ortaya çıkarmıştır (Balcı ve Gökçay, 2002:46; Yariv, 2004:225). Sütunlaşma sürecinin başlangıcında, negatif yüklü kil tabakası ile katyonik polimerik türler arasında sadece elektrostatik etkileşimler meydana gelir ve ardından bu türlerin 400–600 °C aralığında kalsinasyonu, Lewis asit merkezleri olarak işlev görebilen koordinatif olarak doymamış Al atomlarının oluşumuna yol açmaktadır (Salerno vd., 2001:101; Chipera ve Bish, 2001:398). Al sütunlu bentonitlerin XRD spektrumlarında iyi tanımlanmış Q ve α-Cr yansımalarının yoğunluğunun artması, bu durumu doğrulamaktadır (Juang vd., 2002:234).

Sütunlu bentonitlerin, işlenmemiş bentonitlere göre daha yüksek yüzey alanları, tabakalar arası boşluklarda oluşan mikro gözeneklere atfedilebilir. Bu durumda daha düşük yüzey alanları, sütunların düzenli dağılımına ulaşmak için OH/Al oranının yetersiz olduğunu gösterir. OH/Al oranının 2,0'dan 2,2'ye değiştirilmesi, Al sütunlu bentonitin (Wyoming) yüzey alanını çok fazla etkilemezken, Al sütunlu bentonitin (Reşadiye) yüzey alanını %50 oranında artırmıştır, bu da kilin sütunlar arası boşluklarında önemli sayıda mikro gözeneklerin varlığını göstermektedir. Bu belirgin sonuç, OH/Al oranı ne kadar yüksekse, CEC değeri ve kilin dış bileşenlerine bağlı olarak sütun

yoğunluğunun da o kadar yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Al-sütunlu bentonitin (Wyoming) yüzey alanı, mikro gözenekli ağın kristalliliğinin kısmi kaybı nedeniyle 400–600 °C sıcaklık aralığında %20 azalmıştır (Hassan ve Abdel-Khalek, 1998:99; Srodon vd., 2001:514; Taguchi ve Schüth, 2005:1). Ancak Al sütunlu bentonitin (Reşadiye) (OH/Al oranı: 2,2) yüzey alanı, daha az heterojen bir yüzeyi yansıtan %7 gibi açıkça daha düşük bir değerle sınırlı kalmıştır. Bu kısmi sütunlaşma, polimerize katyonik türlerin sınırlı difüzyonu ile açıklanabilir (Juang vd., 2002:234; Heller-Kallai ve Mosser 1995:738). 600 °C'ye kadar ısıtma ile hazırlanan, kararlı mikro gözenekli yapı ve ara katman galeri aralığında homojen olarak dağılmış sütunlar, silika çerçevesine dahil edilen fazla alüminyum öncüllerinin dehidroksillenmiş formlara, yani çok küçük Al_2O_3 benzeri parçacıklara dönüşümünü destekler (Chipera ve Bish 2001:398; Jaboyedoff vd., 2001:156; Prokešová vd., 2003:165). Bu birimler, kompozit malzemenin sütunlar arası açıklığını engelleyebilir ve bu da, tabakalar arası boşluklarda farklı boyutlardaki ek konuk moleküllerini barındırmaya yarar (Mallouk vd., 1998:209; Mosser vd., 1997:789).

d_{001} , d_{003} , $d_{020–110}$, $d_{130–200}$ ve d_{060} difraksiyonları 5,76, 17,60, 19,84, 34,80 ve 61,84 (2θ) değerlerinde, sırasıyla 15,33, 5,03, 4,47, 2,58 ve 1,50 Å mesafelerde görülmektedir (Tabak vd., 2007). Kil olmayan bileşenlerden (kuvars (Q) ve dolomit (D)) kaynaklanan pikler, 20,88 ve 26,81 (2θ) değerlerinde, d100 ve d101 değerleri sırasıyla 4,25 ve 3,32 Å olarak ve 23,43 ve 29,83 (2θ) değerlerinde, d_{102} ve d_{104} değerleri sırasıyla 3,79 ve 2,99 Å'dadır. Ham Ünye bentonitinin d_{001} pik noktasının yoğunluğu ile kil içermeyen bileşenlerin kırılma yoğunluklarının karşılaştırılması sonucunda, bentonitin ana bileşeninin montmorillonit olduğu ve kuvars ve dolomit fraksiyonlarının küçük olduğu sonucuna varılabilir. Ham bentonitin yüksek Mg ve Ca içeriği, dolomitin iskelet Mg ve tabaka arası Ca katyonlarına önemli miktarda Mg^{2+} ve Ca^{2+} katkısı olduğunu gösterirken, ham Ünye bentonitinin d_{001} mesafesinin Na-montmorillonitinkinden (12,04 Å) daha yüksek olması ve bazal aralık değerlerinin 14,45–15,40 Å aralığında değişmesi, kalsiyum açısından zengin bentonit numunesinin varlığıyla açıklanabilir (Chipera ve Bish, 2001:398). Bununla birlikte, XRD deseninde 9,98 Å'da d_{001} tepe noktasının bulunmaması ve ham Ünye bentonitinin FTIR spektrumunda karakteristik illit titreşimlerinin olmaması, düşük sodyum içeriğine rağmen yapıda illit bulunmadığını göstermektedir (Jaboyedoff vd., 2001:156). Smektitlerin türünü belirlemek için kullanılan önemli bir özellik olan d_{060} zirvesi, ham Ünye bentonitinin XRD deseninde 1,50 Å'da bulunur ve bu da bentonit numunesinin Al bakımından zengin 2:1 dioktahedral montmorillonit olduğunu ortaya koyar (Srodon vd., 2001:514). Ayrıca, numunenin yüksek yoğunluklu $d_{020–110}$ özelliklerine bakıldığında, Ünye bentonitinin oktahedral merkezlerinde Al'ın yüksek oranda mevcut olduğu sonucuna varılabilir (Mermut ve Lagaly, 2001:393).

Ham bentonitin 5,76 (2θ) değerinde 15,33 Å olan d_{001} zirvesi, 6,16 (2θ) değerine (mesafe: 14,34 Å) kayar ve d_{003} 5,03 Å'lık tepe noktası 17,60 (2θ)

değerinde 18,31 (2θ) değerinde 4,84 Å mesafe ile görünür. Ayrıca, 24,73 (2θ) değerinde 3,60 Å'lık d_{004} pik noktası görülür ve montmorillonitin d_{020} , $d_{130–200}$ ve d_{060} pik noktaları sırasıyla 4,47, 2,61 ve 1,50 Å mesafelerle 19,84, 34,22 ve 61,91 (2θ) değerlerinde gözlemlenir. Ayrıca, kuvarsın pikleri 20,97 ve 27,20 (2 θ) değerlerinde, sırasıyla 4,23 ve 3,28 Å mesafelerde, dolomitin pikleri ise 23,44 ve 29,85 (2θ) değerlerinde, sırasıyla 3,79 ve 2,99 Å mesafelerde konumlanmaktadır. Cu-bentonitin d001 pik değeri oldukça zayıftır ve d020 pik değeri ile neredeyse eşdeğer yoğunlukta yeni bir pik, 6,58 (2θ) konumunda ve 13,38 Å d değeri ile ortaya çıkmaktadır. Bu yoğunluk azalması nedeniyle, kuvars ve dolomit bileşenlerinin pik değerleri 30 ila 70 (2θ) aralığında belirgin hale gelmektedir. Nikel katyonlarının eklenmesi, ham bentonitin d001 mesafesini etkilemiyor gibi görünmektedir ve montmorillonitin kırınım pikleri 17,92, 19,76, 34,80 ve 61,76 (2θ) değerlerinde ortaya çıkarken, kuvars ve dolomitin difraksiyon tepe noktaları sırasıyla 20,80 ve 26,63 (2θ) ile 23,38 ve 29,64 (2θ) değerlerinde görülmektedir. Co-bentonitin d001 pik değeri 6,08 (2θ) konumunda, 14,53 Å mesafede bulunurken, d_{003} ,$d_{020–110}$,$d_{130–200}$ ve d_{060} difraksiyonları sırasıyla 18,16, 19,92, 35,52 ve 61,92 (2θ) değerlerinde, 4,88, 4,45, 2,53 ve 1,50 Å mesafelerinde gözlemlenir. Kuvars ve dolomit bileşenlerinin pikleri sırasıyla 21,04, 23,60 (2θ) ve 26,96, 29,92 (2θ) değerlerinde tespit edilmiştir. Zn-bentonitin d_{001} pik değeri 5,99 (2θ) ve 14,72 Å mesafede gözlemlenirken, bentonitin diğer difraksiyon pikleri 18,08, 19,77, 34,88 ve 61,70 (2θ) değerlerinde konumlanmaktadır. Kuvars ve dolomitin kırınım pikleri sırasıyla 20,89, 26,88 (2θ) ve 23,37, 29,76 (2θ) değerlerinde yer almaktadır. d_{001} zirvesi, Al^{3+} katyonu kilin ara tabakasına eklendiğinde 5,92 (2θ) konumunda 14,91 Å mesafeyle yoğunlaşmış bir özellik olarak gözlemlenir ve 4,86, 4,49, 2,58 ve 1,50 Å mesafeleri sırasıyla d_{003}, $d_{020–110}$, $d_{130–200}$ ve d_{060} difraksiyonlarına karşılık gelmektedir. Ayrıca, kuvars pikleri 20,96 ve 26,73(2θ) değerlerinde, dolomit pikleri ise 23,38 ve 29,83(2θ) değerlerinde görülmektedir. Fe-bentonit için, (020) kırınım pik noktasından daha zayıf olan montmorillonitin d001 tepe noktası nedeniyle kil içermeyen bileşenlerin tepe noktaları belirgin hale gelir ve 6,62 (2θ) konumunda 13,10 Å mesafede gözlemlenir. Minimum d_{001} değeri, burada incelenen tüm katyon değişimi örnekleri arasında Fe-bentonit için benzersizdir. Katyon değişim süreçlerinin çizdiği ana (001) pik noktasının konumu ve yoğunluğundaki değişiklikler ve farklılıklar, diğer kırınım pik noktalarının ve kil dışı pik noktalarının göreceli yoğunluklarını etkilemiştir. Bu sonuç, demir iyonlarının küçük bir kısmının altıgen boşluklardan oktahedral boşluklara nüfuz ettiğini göstermektedir (He vd., 2001) ve bentonitin ara tabakasına yerleştirilen katyon miktarı ile koordineli su ve katyonlar ile ara tabaka yüzey düzlemleri arasındaki elektrostatik çekim arasındaki oranla bağlantılı olmalıdır.

TERMAL ANALİZ

Tabak ve arkadaşları işlenmemiş bentonitlerin (Wyoming ve Reşadiye) ve farklı OH/Al oranlarına sahip Al-bentonit kompozitlerin termal analiz (DTA/TG) profillerini ve ilgili kütle kayıplarını bildirmiştir (Tabak vd., 2007:377),. İşlenmemiş bentonitlerin endotermik pikleri, 200 °C'ye kadar nem ve tabakalar arası suyun değişimine atfedilir ve yapısal OH grupları 550–750 °C aralığında uzaklaştırılır. İşlenmemiş bentonitin (Wyoming) endotermik pik, 126 °C'de merkezlenir ve 193 °C'ye kadar uzanan hizalaması, Reşadiye bentonitinde Na^+ katyonlarından daha güçlü olan, su molekülleri ile tabakalar arası boşluktaki Ca^{2+} katyonları arasındaki hidrojen bağlarını temsil eder; bu durum, katyonun artan polarizasyon gücü ile açıklanabilir. 210–550 °C sıcaklık aralığında işlenmemiş bentonitlerin (Wyoming ve Reşadiye) kütle kayıpları arasındaki belirgin farklar, Reşadiye bentonitindeki dolomit, α-kristobalit, kuvars, kalsit ve illit gibi dış kil bileşenlerinin varlığına atfedilebilir. 150–700 °C aralığında sürekli kütle kaybı, tabakalar arası polimerik türlerin ve ana kilin birleşik dehidrasyonu ve dehidroksilasyonu ile açıklanabilir (Wagner vd., 1994:231; Jaboyedoff vd., 2001:156). Polimerik Al-sütunlu bentonitlerin dehidrasyon ve dehidroksilasyon maksimumları, başlangıç malzemelerine kıyasla sırasıyla daha yüksek ve daha düşük sıcaklıklara kaymaktadır. 300–360 ve 500–630 °C sıcaklık aralıklarında gözlemlenen pik şekillerinin ve konumlarının değişimi, sütun yoğunluğuna paralel görünmektedir; sütun yoğunluğundaki azalma, sırasıyla alümina kümelerine benzeyen ayrışmış türlerin termal stabilitesi ve kovalent Si–O–Al bağlarının oluşumu tarafından etkilenmektedir (Churchman, 2002:177; Mermut ve Lagaly, 2001:393). Wyoming bentonitinden daha düşük olan Al-bentonit kompozitinin (Reşadiye) dehidrasyon ve dehidroksilasyon sıcaklıkları, hidroksi katyonlarının dehidroksilasyona uğraması için 500 °C'lik bir kalsinasyon sıcaklığının gerekli olduğunu kanıtlamaktadır (Tabak vd., 2005:311; Yamagishi vd., 2003:192). Al-sütunlu bentonit (Reşadiye) (OH/Al = 2,0) ile işlenmemiş Reşadiye bentoniti arasındaki toplam kütle kaybı farkı ihmal edilebilir düzeydedir, ancak bu miktar Wyoming bentonitinden makul ölçüde daha yüksektir. Bununla birlikte, Reşadiye bentonitinin toplam kütle kaybı, OH/Al oranı 2,2'de maksimum değere ulaşır. Bu nedenle, yüksek termal stabiliteye yol açan her iki Al-sütunlu bentonit için optimum OH/Al molar oranının 2,2 olduğu öne sürülebilir.

CP-bentonit (Wyoming) için termal analiz verileri, 20–190 ve 200–700ºC sıcaklık aralıklarında sırasıyla %2,17 ve %33,41 kütle kaybı göstermiştir. Bu, sırasıyla suyun ve CP katyonunun ayrışmasına ve kilin yapısal OH'sının uzaklaştırılmasına karşılık gelirken, bentonitin kütle kaybı 20–193ºC'de %5,15 ve 566–739ºC'de %3,25 olarak ölçülmüştür. Bu, sırasıyla nem ve tabaka arası suyun ve yapısal OH gruplarının termal evrimine karşılık gelir. 200–700°C aralığındaki ekzotermik DTA pikleri, oksidasyon yoluyla

Wyoming bentonitinin tabakalar arası CP katyonunun aşamalı olarak uzaklaştırılmasına atfedilmiştir.

Wyoming bentonitinin DTA eğrisinde 20–193 ºC aralığında görülen iki endotermik pik, tabaka arası katyonlara ve yüzey nemine koordine olan farklı su türlerinin salınımını göstermektedir. Özellikle, 126 ºC'deki ikinci tepe noktası, 193ºC'ye kadar olan ayrışmayla birlikte, su molekülleri ile Reşadiye bentonitinin Na^+ katyonundan daha yüksek polarizasyon gücüne sahip olan değiştirilebilir Ca^{2+} katyonu arasında daha güçlü hidrojen bağı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Na-bentonitlerin (Wyoming ve Reşadiye) termal analiz eğrileri, kil dışı bileşenleri hariç (burada gösterilmemiştir) neredeyse eşittir. CP ve Reşadiye bentonit ile Wyoming bentonitinin termal analiz eğrilerindeki farklılıklar (200–700 ºC), Reşadiye bentonitindeki Na-montmorillonit ana bileşeninin yanında dolomit, α-kristobalit, kuvars, kalsit gibi safsızlıkların varlığından kaynaklanmaktadır. CP-bentonit (Reşadiye) ile CP-bentonit (Wyoming) arasında 200–700 °C aralığında tüm organik katyonların, yapısal OH ve kil bileşenlerinin ayrışmasına bağlı olarak görülen daha düşük kütle kayıpları, CEC değeri ile ilişkili olabilir. Bu fark, Wyoming bentonitinin galeri boşluğunda daha fazla organik katyon bulunduğunu kanıtlayan her bir organo-bentonitin termal stabilitesi ve d001 değeri ile paralel görünmektedir.

Ayrıca, yukarıdaki sıcaklık aralığında tüm CP ile modifiye edilmiş bentonitlerin ekzotermik DTA pikleri, siyah kalıntının yüksek sıcaklıkta oksidasyonundan kaynaklanan yüksek miktarda organik H_2O ve CO_2 türlerinin desorpsiyonuna neden olan organik katyonun kademeli ayrışmasını göstermektedir (Kahr ve Madsen, 1995). Dahası, 700ºC'ye kadar interlameller boşluktaki organik katyonun termal stabilitesi, kil tabakalarının oksijen düzlemleri ile katyonun aromatik halkası arasında π etkileşimlerinin varlığını ve alümino-silikat tabakalarının koruyucu etkisini göstermektedir (Chipera ve Bish, 2001:398; Jaboyedoff vd., 2001:156). CP-bentonitin (Wyoming) ekstratermal stabilitesi, Reşadiye bentonitine kıyasla bu organo-kilin yüksek CEC'sine bağlı olarak elde edilebilen ilk ayrışma ürününün (siyah kalıntı) yüksek stabilitesini kanıtlamaktadır.

Ham bentonitin TG eğrisinde, 25–220 °C sıcaklık aralığında toplam %11,2 kütle kaybı ile iki dehidrasyon aşaması göze çarpmaktadır. İlk aşamada 25–130 °C'de %8,1 kütle kaybı ile adsorbe edilen suyun uzaklaştırılması, 99 °C'de merkezlenen endotermik bir DTA pikine ve 130–220 °C aralığında 166 °C'de endotermik bir özellik ortaya çıkar ve bu, %3,1'lik kütle kaybıyla birlikte, tabaka arası katyonlara koordine olan su türlerinin ortadan kaldırılmasına karşılık gelir. 300–720 °C aralığında %4,3 kütle kaybıyla ilişkili 658 °C'deki endotermik pik ve 509 °C'deki omuz, amorf smektitlerin dehidroksilasyonundan kaynaklanmaktadır (Hassan ve Abdel-Khalek, 1998:99; Hunger, 1997:345). 910 °C'de bentonitin klasik faz geçiş pik noktasını gizleyen 886 °C'deki endotermik maksimum, dolomit safsızlığının ayrışmasını temsil eder. Na-bentonitin dehidrasyonu, 30–290 °C sıcaklık

aralığında %8,9 kütle kaybıyla tek aşamalı bir süreç olarak gerçekleşir ve 64 °C'de endotermik bir maksimum oluşturur, oysa aynı süreç ham bentonit için iki aşamada gerçekleşir. Dehidroksilasyon süreci, 290–830 °C aralığında iki endotermik DTA zirvesi ile sonuçlanır; 638 °C'de güçlü bir zirve ve 585 °C'de %4,3 kütle kaybı ile bir omuz.

Pb-bentonitin DTA eğrisinde 69 ve 626 °C'de görülen endotermik maksimumlar, sırasıyla nem ve hidroksil türlerinin uzaklaştırılmasına karşılık gelir. Uzaklaştırılan su miktarı (%10,0) Na-bentonitin uzaklaştırdığı su miktarından daha fazladır ve daha yüksek bir sıcaklıkta gözlemlenirken, hidroksil türleri daha düşük bir sıcaklıkta ortaya çıkar. Cu-bentonitten adsorbe edilmiş ve katyon koordineli su türlerinin gelişimi, 30–300 °C aralığında, 78 °C'de endotermik bir pik ve 160 °C'de bir omuz ile temsil edilir ve kütle kaybı %10,7'dir. Birçok araştırmacı, 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda Cu türlerinin altıgen boşluklara göç ettiği (He vd., 2001:347) ve 200 °C'nin üzerinde ise sekiz yüzlü tabakalara nüfuz ederek tabakanın yükünü doyurduğu konusunda hemfikirdir (Stadler ve Schindler, 1993:288; Mosser vd., 1997:789; Kloprogge vd., 2006:640). 300–870 °C aralığında %4,4'lük toplam kütle kaybının eşlik ettiği 369, 577 ve 630 ºC'deki üç endotermik pik noktası, Cu-bentonitin dehidroksilasyon sürecini ifade eder (Tabak vd., 2005:311; Hunger, 1997:345). 900 °C'nin üzerinde, montmorillonitte kristobalit ve mullit oluşumuna neden olan önemli yapısal değişiklikler meydana gelir (Brigatti vd., 2006:19; Juang vd., 2002:234; Neaman vd., 2003:153). Ni-bentonitten 30–370 °C sıcaklık aralığında %12,6 kütle kaybı ile adsorbe ve koordine su türlerinin uzaklaştırılması, 69 °C'de bir DTA zirvesi ve 140 °C'de bir omuz oluşturur. Ayrıca, 611 °C'deki endotermik maksimum ve 509 °C'deki omuz, dehidroksilasyon sürecine atfedilir.

Ni-bentonitin minimum dehidroksilasyon sıcaklığı örneği olduğu açıkça görülmektedir. Cu-bentonite benzer şekilde, su ve hidroksil türleri Co-bentonitten sırasıyla iki ve üç aşamada desorbe olur. Adsorbe edilen su türleri 75°C'de desorbe olur; koordine su türleri 144 °C'de salınır ve son dehidroksilasyon aşaması 364 °C'de bir pik, 550 °C'de bir omuz ve yaklaşık 26 °C'de sığ bir endoterm ile birlikte gerçekleşir. 30–290 ve 290–850 °C sıcaklık aralıklarında tespit edilen %12,4 ve %4,2'lik kütle kayıpları, sırasıyla 62 ve 618 °C'lik endotermik maksimumlarla, Zn-bentonitten sırasıyla nem ve hidroksil türlerinin uzaklaştırılmasına karşılık gelir. 30–250 ve 250–840 °C aralıklarında belirlenen kütle kayıpları, sırasıyla 82 ve 332, 580 ve 627 °C'de merkezlenen piklerle birlikte, sırasıyla 3 aşamalı bir dehidroksilasyon süreci olarak demir katyonları etrafındaki yapısal su ve hidrasyon kabuklarının ortadan kaldırılmasına atfedilir (Schindler vd., 1987:219; Undabeytia vd., 2002:2677). Değiştirilen katyonun türünün, bentonit numunelerinin dehidrasyon ve dehidroksilasyon kapasiteleri açısından termal davranışını önemli ölçüde etkilediği açıkça görülmektedir.

YÜZEY ALANI ÖLÇÜMLERİ

Ca-bentonitin, Na-bentonite kıyasla daha yüksek yüzey alanı, Ca-bentonit numunesinin küçük ve orta boy mezoporlar (20–400 Å) aralığında önemli miktarda hapsolmuş gözeneklere sahip olabileceğini göstermektedir (Lee vd., 1999:172) ve bu durumda numunelerin dokusal özelliklerinin belirlenmesinde iyon değerliğinin daha önemli olması beklenmektedir. Pb-, Cu-, Ni-, Co- ve Al-bentonit örneklerinin yüzey alanları, Fe- ve Zn-örneklerine göre temel katmanların istiflenme düzeyinde birbiriyle ilişkilidir, çünkü düzlemsel bölgelerle reaksiyon yoluyla adsorpsiyon ve bunun sonucunda dış küre komplekslerinin oluşumu muhtemeldir (Auboiroux vd., 1998:546). Ünye bentonitine demir ve çinko katyonlarının eklenmesi, orta ve büyük mezoporların (>100 Å) sayısını azaltır ve bu nedenle, değişim süreci, ham bentonit numunesine göre Fe ve Zn bentonitlerinin yüzey alanlarında önemli bir artışa neden olur. Hem Zn hem de Fe bentonit numunelerinde hapsolmuş gözeneklerin miktarı, Pb, Cu, Ni, Co ve Al ile değiştirilmiş olanlara göre daha düşüktür ve bu durum mikro gözeneklerin (iyon yarıçapı) ortaya çıkmasıyla açıklanabilir. Yukarıdaki sonuçlar, değiştirilen iyonların bentonitin yüzey özelliklerini, kil içindeki değiştirilen iyonun boyutu ve tabakalar arası düzeniyle ilişkili görünen bir şekilde etkilediğini göstermektedir (Slade vd., 1985:51). Bu nedenle, katyon değişimi geçirmiş Ünye bentonitlerinin yüzey alanındaki artışın sırası, metal iyonlarının kimyasal özelliklerinden ziyade kil minerallerinin özellikleri tarafından belirlendiği sonucuna varılabilir (Bailey vd., 1999:2469; Vengris vd., 2001:183).

SONUÇLAR

Kil teknolojisi, günümüzde kullanılan malzemelere kıyasla kilin üstün özellikleri sayesinde çeşitli alanlarda ürünlerin başarılı bir şekilde uygulanması nedeniyle ilgi çekicidir. Killer birçok endüstriyel uygulamada hammadde olarak kullanıldığından, ileri düzeyde karakterizasyonu gereklidir. Çeşitli killerin kimyasal bileşimini belirlemek için X-ışını floresan (XRF) analizleri yapılır ve böylece killerin kimyasal bileşimleri ve karşılaştırmaları görülebilir. Bir malzemenin XRF analizi ve farklı oksit içeriği hakkındaki bilgiler tek başına, malzemenin maruz kalacağı reaksiyonlara karşı tepkisini tahmin etmek için kullanılamaz. Bunu yapmak için, XRD deseni ile kil ve atık

killerde bulunan alüminosilikat fazlarının davranışı arasındaki ilişki dikkate alınmalı ve incelenmelidir.

Killerin mikro yapısı, parçacık boyutu, morfolojisi ve zeta potansiyelinin etkileri açıklığa kavuşturulmalıdır. Bu nedenle, Al–Si kaynağının fiziksel özelliklerinin kil bazlı malzemelerin ürün kinetiği üzerindeki etkileri daha ayrıntılı olarak araştırılmalıdır. Killerin kalsinasyonu ve kalsinasyon koşullarının kil ürünlerinin mekanik davranışına etkileri hakkında çok az yayın yapılmıştır. Optimize edilmiş kalsinasyon koşulları, atmosferik nem ve kalsinasyon sıcaklığı ile kil minerallerinde bulunan su moleküllerindeki değişiklikler açıklanmalıdır. Böylece, daha yüksek kaliteli, daha saf killer ve kil ürünleri elde etmek için birçok yeni süreç geliştirilebilir.

Bentonit killerinin kimyasal analizi, kil numunelerimizin mineral tuzları, silika ve alüminyum açısından zengin olduğunu göstermektedir. Asit ve tuzla bentonitin ön işlenmesi, birkaç yapısal değişiklik getirir ve SiO_2 (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} ve özellikle birkaç katyonun sızmasına yol açar, vb.), ayrıca SEM analizi ile ortaya çıkan dokusal morfolojik değişiklikle ilgili bentonitin yoğunluğunda belirgin bir azalma sağlamıştır. Bentonit, gözenek çapı 20 A^{o} 'dan az olduğu halde (yani mikro gözenekli bir malzeme olduğu halde) yüksek bir yüzey alanına sahiptir.

Hem XRD deseni hem de FTIR spektrumu, ham bentonit numunesinin Al bakımından zengin bir dioktahedral montmorillonit olduğunu kanıtlamaktadır. Katyon değişimi yapılmış bentonitlerin d001 mesafeleri 13,10–15,33 Å aralığındadır. Farklı katyon değişimi yapılmış bentonitlerin yüzey özellikleri arasında önemli farklılıklar görülmüştür. Ham ve katyon değişimi yapılmış Ünye bentonit numunelerinin termal analiz (DTA/TG) verilerinden genel olarak, adsorbe edilmiş ve katyon koordineli su türleri ile ilişkili düşük sıcaklıklardaki belirgin dehidrasyon aşamalarının, 700 °C civarında sona eren orta sıcaklıklarda dehidroksilasyonun ardından faz geçişinin gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, dış kil bileşenleri ve safsızlıklar da nispeten yüksek sıcaklıklarda termal bozunmaya maruz kalabilir. Genel olarak, katyon değişimi yapılmış bentonitlerin yüzey alanlarının ham bentonitin yüzey alanından daha küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Fe-bentonit ve özellikle Zn-bentonitin ham bentonite kıyasla yüzey alanındaki artış önemlidir ve numunelerin yüzey özelliklerindeki değişiklikler, ara tabakadaki katyonların düzeniyle yakından ilgilidir. Yüzey alanının önemli bir yüzdesi Pb-, Cu-, Ni-, Co- ve Al-bentonit numunelerindeki mezoporlarla ilişkilidir, oysa Fe^{3+} ve Zn^{2+} katyonları çok sayıda mikropor oluşturur ve böylece tabakalar arası boşlukların büzülmesine neden olur. Bu çalışmanın sonuçları, kirlenmiş atık sulardan metal iyonlarının uzaklaştırılması için bentonit kilinin potansiyelini tahmin etmek açısından yararlı olabilir. Bu tür çalışmaların sonuçları, kil minerallerinin yüzey özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinmek ve doğal sistemlerde katyon değişimi geçirmiş kil minerallerinin davranışını anlamak için de yararlı olabilir.

Sodyum bentonit, diğer killerle karşılaştırıldığında %2,2 daha az ateşleme kaybına sahiptir, bu nedenle piroliz işlemi için katalizör olarak bentonit kullanımının avantajlı yönleri vardır, çünkü bu şekilde termal özellikler uygun olmalıdır. Kil ve bentonit kili arasında elde edilen silikat bileşimlerinin yakınlığı, kilin bentonit yakınında silikat seviyelerine sahip olduğunu gösterirken, K_2O, Fe_2O_3, TiO_2, MgO, Na_2O, CaO, P_2O_5ve Cr_2O_3 gibi diğer yaygın safsızlıklar da gözlenebilir. CaO'nun zengin varlığı, sodyum bentonitin kil üzerinde kalite davranışını artırır. 3445,87 cm^{-1} ve 3620,59 cm^{-1} bant konumları, FT-IR spektrumları ile bentonit numunesi için katı maddeden Si-O-H titreşimlerinin yanı sıra kil yüzeyinde adsorplanan suyun H-O-H titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Güçlü ve geniş FT-IR spektrumları, 3458,93 cm^{-1} bantlarının güçlü görünümünün kil yüzeyinde fiziksel olarak adsorplanan büyük miktarda suya atfedilebileceğini göstermektedir. Yarım maksimum değerdeki tam genişlik (FWHM), 5,71A ve 7,61A^o değerlerindeki iki absorpsiyon pikinde aynıdır ve bentonit kil örneği için incelenmiştir. XRD, kil ve bentonit kil örneklerinin maksimum ortalama kristalit boyutlarının sırasıyla 24,91 ve 25,09 absorpsiyon piklerinde olduğunu ortaya koymaktadır. Karakterizasyon, plastik atıkların geri dönüşüm yöntemleri için önemli bir katalizör olarak ticari olarak temin edilebilen killerin etkisini açıklamaktadır.

REFERANSLAR

Afşin, B., Gökdere, M., ve Tınkılıç, N. (2000). Stability of hydroxy-formate species at a Pb (110) surface. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, *55*(7), 985-990.

Ahmet, T., ve Beytullah, A. (2001). Firmly adsorbed ammonia and pyridine species at activated kaolinite surfaces. *Adsorption Science ve Technology*, *19*(8), 673-679.

Akçay, G., ve Yurdakoc, M. K. (1999). Nonyl-and dodecylamines intercalated bentonite and illite from Turkey. *Turkish Journal of Chemistry*, *23*(1), 105-114.

Alemdar, A., Atıcı, O., ve Güngör, N. (2000). The influence of cationic surfactants on rheological properties of bentonite–water systems. *Materials Letters*, *43*(1-2), 57-61.

Auboiroux, M., Melou, F., Bergaya, F., ve Touray, J. C. (1998). Hard and soft acid-base model applied to bivalent cation selectivity on a 2: 1 clay mineral. *Clays and clay minerals*, *46*(5), 546-555.

Bailey, S. E., Olin, T. J., Bricka, R. M., ve Adrian, D. D. (1999). A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. *Water research*, *33*(11), 2469-2479.

Balcı, S., ve Gökçay, E. (2002). Effects of drying methods and calcination temperatures on the physical properties of iron intercalated clays. *Materials chemistry and physics*, *76*(1), 46-51.

Bates, R.L., Jackson, J.A. (Eds.) (1987), Glossary of Geology, third ed., American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 788, pp. 65, 123, 262, 432.

Brigatti, M. F., Galan, E., ve Theng, B. K. G. (2006). Structures and mineralogy of clay minerals, in: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), Handbook of Clay Science, Developments in Clay Science, vol. 1, Elsevier, Amsterdam, 2006, pp. 19–86.

Chen, G., Han, B., ve Yan, H. (1998). Interaction of cationic surfactants with iron and sodium montmorillonite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, *201*(2), 158-163.

Chipera, S. J., ve Bish, D. L. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: powder X-ray diffraction analyses. *Clays and Clay Minerals*, *49*(5), 398-409.

Churchman, G. J. (2002). Formation of complexes between bentonite and different cationic polyelectrolytes and their use as sorbents for non-ionic and anionic pollutants. *Applied Clay Science*, *21*(3-4), 177-189.

Çağlar, B., Afsin, B., Tabak, A., ve Eren, E. (2009). Characterization of the cation-exchanged bentonites by XRPD, ATR, DTA/TG analyses and BET measurement. *Chemical engineering journal*, *149*(1-3), 242-248.

Figueras, F., Mattrod-Bashi, A., Fetter, G., Thrierr, A., ve Zanchetta, J. V. (1989). Preparation and thermal properties of Zr-intercalated clays. *Journal of Catalysis*, *119*(1), 91-96.

Galindo-Rosales, F. J., ve Rubio-Hernández, F. J. (2006). Structural breakdown and build-up in bentonite dispersions. *Applied Clay Science*, *33*(2), 109-115.

Gil, A., Vicente, M. A., ve Korili, S. A. (2005). Effect of the Si/Al ratio on the structure and surface properties of silica-alumina-pillared clays. *Journal of Catalysis*, *229*(1), 119-126.

Guan, R., Li, W., ve Li, B. (2002). Effects of Ca-based additives on pyrolysis of Datong coal. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao (Journal of China University of Mining and Technology)*, *31*.

Gyftopoulou, M. E., Millan, M., Bridgwater, A. V., Dugwell, D., Kandiyoti, R., ve Hriljac, J. A. (2005). Pillared clays as catalysts for hydrocracking of heavy liquid fuels. *Applied Catalysis A: General*, *282* (1-2), 205-214.

Hassan, M. S., ve Abdel-Khalek, N. A. (1998). Beneficiation and applications of an Egyptian bentonite. *Applied Clay Science*, *13*(2), 99-115.

He, H. P., Guo, J. G., Xie, X. D., ve Peng, J. L. (2001). Location and migration of cations in Cu^{2+}-adsorbed montmorillonite. *Environment International*, *26*(5-6), 347-352.

He, H., Ding, Z., Zhu, J., Yuan, P., Xi, Y., Yang, D., ve Frost, R. L. (2005). Thermal characterization of surfactant-modified montmorillonites. *Clays and clay minerals*, *53*(3), 287-293.

Heller-Kallai, L., ve Mosser, C. (1995). Migration of Cu ions in Cu montmorillonite heated with and without alkali halides. *Clays and Clay Minerals*, *43*(6), 738-743.

Hunger, M. (1997). Bronsted acid sites in zeolites characterized by multinuclear solid-state nmr spectroscopy. *Catalysis Reviews*, *39*(4), 345-393.

Hutson, N. D., Hoekstra, M. J., ve Yang, R. T. (1999). Control of microporosity of Al_2O_3-pillared clays: effect of pH, calcination temperature and clay cation exchange capacity. *Microporous and Mesoporous Materials*, *28*(3), 447-459.

Imai, Y., Nishimura, S., Inukai, Y., ve Tateyama, H. (2003). Differences in quasicrystals of smectite-cationic surfactant complexes due to head group structure. *Clays and clay minerals*, *51*(2), 162-167.

Jaboyedoff, M., Bussy, F., Kübler, B., ve Thelin, P. (2001). Illite "crystallinity" revisited. *Clays and clay minerals*, *49*(2), 156-167.

Juang, R. S., Lin, S. H., ve Tsao, K. H. (2002). Mechanism of sorption of phenols from aqueous solutions onto surfactant-modified montmorillonite. *Journal of colloid and interface science*, *254*(2), 234-241.

Kahr, G., ve Madsen, F. T. (1995). Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. *Applied clay science*, *9*(5), 327-336.

Kloprogge, J. T., Mahmutagic, E., ve Frost, R. L. (2006). Mid-infrared and infrared emission spectroscopy of Cu-exchanged montmorillonite. *Journal of colloid and interface science*, *296*(2), 640-646.

Kraepiel, A. M., Keller, K., ve Morel, F. M. (1999). A model for metal adsorption on montmorillonite. *Journal of colloid and interface science*, *210*(1), 43-54.

Kumar, S., Panda, A. K., ve Singh, R. K. (2013). Preparation and characterization of acid and alkaline treated kaolin clay. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering ve Catalysis*, *8*(1), 61-69.

Lee, J. F., Lee, C. K., ve Juang, L. C. (1999). Size effects of exchange cation on the pore structure and surface fractality of montmorillonite. *Journal of colloid and interface science*, *217*(1), 172-176.

Lee, S. Y., Cho, W. J., Kim, K. J., Ahn, J. H., ve Lee, M. (2005). Interaction between cationic surfactants and montmorillonites under nonequilibrium condition. *Journal of colloid and interface science*, *284*(2), 667-673.

Li, J., Yan, R., Xiao, B., Liang, D. T., ve Lee, D. H. (2008). Preparation of nano-NiO particles and evaluation of their catalytic activity in pyrolyzing biomass components. *Energy ve Fuels*, *22*(1), 16-23.

Maged, A., Kharbish, S., Ismael, I. S., ve Bhatnagar, A. (2020). Characterization of activated bentonite clay mineral and the mechanisms underlying its sorption for ciprofloxacin from aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 32980-32997.

Mallouk, T. E., ve Gavin, J. A. (1998). Molecular recognition in lamellar solids and thin films. *Accounts of Chemical Research*, *31*(5), 209-217.

Mermut, A. R., ve Lagaly, G. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: layer-charge determination and characteristics of those minerals containing 2: 1 layers. *Clays and clay minerals*, *49*(5), 393-397.

Moreno, S., Kou, R. S., Molina, R., ve Poncelet, G. (1999). Al-, Al, Zr-, and Zr-pillared montmorillonites and saponites: Preparation, characterization, and catalytic activity in heptane hydroconversion. *Journal of catalysis*, *182*(1), 174-185.

Mosser, C., Michot, L. J., Vlllieras, F., ve Romeo, M. (1997). Migration of cations in copper (II)-exchanged montmorillonite and laponite upon heating. *Clays and Clay Minerals*, *45*(6), 789-802.

Murray, H. H. (1999). Applied clay mineralogy today and tomorrow. *Clay minerals*, *34*(1), 39-49.

Neaman, A., Pelletier, M., ve Villieras, F. (2003). The effects of exchanged cation, compression, heating and hydration on textural properties of bulk bentonite and its corresponding purified montmorillonite. *Applied Clay Science*, *22*(4), 153-168.

Parker, S.P., (1988) McGraw-Hill Encyclopedia of the Geological Sciences, second ed., McGraw-Hill Press, 1988, pp. 32–33, 69–72, 400–401.

Pospísil, M., Capková, P., Merínská, D., Malác, Z., ve Simoník, J. (2001). Structure Analysis of Montmorillonite Intercalated with Cetylpyridinium and Cetyltrimethylammonium: Molecular Simulations and XRD Analysis. *Journal of colloid and interface science*, *236*(1), 127-131.

Prokešová, P., Mintova, S., Čejka, J., ve Bein, T. (2003). Preparation of nanosized micro/mesoporous composites via simultaneous synthesis of Beta/MCM-48 phases. *Microporous and Mesoporous Materials*, *64*(1-3), 165-174.

Pütün, E. (2010). Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst. *Energy*, *35*(7), 2761-2766.

Reis, A. S., ve Ardisson, J. D. (2003). Exchangeable ion and thermal treatment effects on basal spacings of Al-hydroxy pillared montmorillonites. *Clays and clay minerals*, *51*(1), 33-40.

Salerno, P., Asenjo, M. B., ve Mendioroz, S. (2001). Influence of preparation method on thermal stability and acidity of Al–PILCs. *Thermochimica Acta*, *379*(1-2), 101-109.

Schindler, P. W., Liechti, P., ve Westall, J. C. (1987). Adsorption of copper, cadmium and lead from aqueous solution to the kaolinite/water interface. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, *35*(3), 219-230.

Slade, P. G., Stone, P. A., ve Radoslovich, E. W. (1985). Interlayer structures of the two-layer hydrates of Na-and Ca-vermiculites. *Clays and clay minerals*, *33*(1), 51-61.

Srodon, J., Drits, V. A., McCarty, D. K., Hsieh, J. C., ve Eberl, D. D. (2001). Quantitative X-ray diffraction analysis of clay-bearing rocks from random preparations. *Clays and Clay Minerals*, *49*(6), 514-528.

Stadler, M., ve Schindler, P. W. (1993). Modeling of H+ and Cu2+ adsorption on calcium-montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, *41*(3), 288-296.

Starodoubtsev, S. G., Ryabova, A. A., Khokhlov, A. R., Allegra, G., Famulari, A., ve Meille, S. V. (2003). Smectic arrangement of bentonite platelets incorporated in gels of poly (acrylamide) induced by interaction with cationic surfactants. *Langmuir*, *19*(26), 10739-10746.

Tabak, A., Afsin, B., Aygun, S. F., ve Icbudak, H. (2005). Phenanthroline Cu (II)-bentonite composite characterization. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *81*, 311-314.

Tabak, A., Afsin, B., Aygun, S. F., ve Koksal, E. (2007). Structural characteristics of organo-modified bentonites of different origin. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, *87(2)*, 377-382.

Tabak, A., Afsin, B., Çaglar, B., ve Koksal, E. (2007). Characterization and pillaring of a Turkish bentonite (Reşadiye). *Journal of Colloid and Interface Science*, *313*(1), 5-11.

Taguchi, A., ve Schüth, F. (2005). Ordered mesoporous materials in catalysis. *Microporous and mesoporous materials*, *77*(1), 1-45.

Tsiao, C. J., Carrado, K. A., ve Botto, R. E. (1998). Investigation of the microporous structure of clays and pillared clays by 129Xe NMR. *Microporous and mesoporous materials*, *21*(1-3), 45-51.

Undabeytia, T., Nir, S., Rytwo, G., Serban, C., Morillo, E., ve Maqueda, C. (2002). Modeling adsorption− desorption processes of Cu on edge and planar sites of montmorillonite. *Environmental science ve technology*, *36*(12), 2677-2683.

Usman, M. A., Ekwueme, V. I., Alaje, T. O., ve Mohammed, A. O. (2012). Characterization, acid activation, and bleaching performance of Ibeshe clay, Lagos, Nigeria. *International Scholarly Research Notices*, *2012*(1), 658508.

Vengris, T., Binkien, R., ve Sveikauskait, A. (2001). Nickel, copper and zinc removal from waste water by a modified clay sorbent. *Applied Clay Science*, *18*(3-4), 183-190.

Wagner, J., Chen, H., Brownawell, B. J., ve Westall, J. C. (1994). Use of cationic surfactants to modify soil surfaces to promote sorption and retard migration of hydrophobic organic compounds. *Environmental science ve technology*, *28*(2), 231-237.

Wang, C. C., Juang, L. C., Lee, C. K., Hsu, T. C., Lee, J. F., ve Chao, H. P. (2004). Effects of exchanged surfactant cations on the pore structure and adsorption characteristics of montmorillonite. *Journal of colloid and interface science*, *280*(1), 27-35.

Wu, D., Zhang, S., Zheng, Q., Zhao, X., Liu, W., ve Xue, X. (2017). The Influence of CaO on the Pyrolysis Behavior and Kinetic Characteristics of Low Rank Coal. *Energy Procedia*, *105*, 2039-2046.

Yamagishi, T., Takahashi, R., Nagatani, D., Konishi, G., ve Nakamoto, Y. (2003). Solution properties of substituted o-cresol resins. *Japanese Journal Of Polymer Science And Technology*, *60*(4), 192-198.

Yu, Z. T., Peng, L. L., ve Yang, W. (2000). Study on coal mild gasification with Cao catalyst [J]. *Journal of Fuel Chemistry Technology*, *28*(1), 36-39.

Yariv, S. (2004). The role of charcoal on DTA curves of organo-clay complexes: an overview. *Applied Clay Science*, *24*(3-4), 225-236.

Çalışma Ortamı Güvenliğinin Sağlanmasında Mühendislik Tasarımı ve Önleyici Stratejiler

Fatih ULUKAYA[1]

Mustafa TATLICAN[2]

[1] Öğr. Gör. Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Simav Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikleri Bölümü.
fatih.ulukaya@ksbu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9258-668X
[2] Öğr. Gör.; Tarsus Üniversitesi Rektörlük Uygulamalı Birim, İş Sağlığı ve Güvenliği Ofisi Koordinatörlüğü.
mustafatatlican@tarsus.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3563-476X

ÖZET

Çalışma ortamı güvenliği, çalışan sağlığının korunması, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesi açısından hem çalışan refahı hem de işletme verimliliği için kritik öneme sahip küresel bir konudur. İş kazalarının ve meslek hastalıklarının önemli bir kısmının önlenebilir olması, iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarında proaktif yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu noktada mühendislik bakış açısı, risklerin oluşmadan kontrol altına alınmasına katkı sağlayarak güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasında temel bir rol üstlenmektedir. Modern güvenlik yönetimi anlayışı, yalnızca kişisel koruyucu donanım veya çalışan eğitimi gibi davranışsal önlemlerle sınırlı değildir. Bunun yerine tehlikelerin kaynağında ortadan kaldırılmasını amaçlayan mühendislik temelli çözümler ön plana çıkmaktadır. İş süreçlerinin, üretim sistemlerinin, makine ve ekipmanların güvenlik odaklı tasarlanması, iş kazalarının azaltılmasında etkili bir yöntemdir. Risk değerlendirme süreçlerinde kullanılan sistematik analiz teknikleri, olası tehlikelerin erken aşamada tespit edilmesine ve önleyici tedbirlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Günümüz endüstrisinde dijitalleşme ve otomasyonun artması ile birlikte sensör tabanlı güvenlik sistemleri, robotik uygulamalar ve yapay zekâ destekli risk izleme teknolojileri mühendislik temelli güvenlik stratejilerini daha da güçlendirmektedir. Bu bölümde mühendislik yaklaşımının iş sağlığı ve güvenliği alanındaki önemi açıklanacak, önleyici stratejilerin geliştirilmesi ve uygulanmasında mühendislik disiplinlerinin katkıları ele alınacaktır.

Anahtar Kelimeler: Çalışma Ortamı Güvenliği, İş Güvenliği, İş Güvenliği Mühendisliği, Önleyici Stratejiler.

GİRİŞ

Çalışma ortamı güvenliği, çalışanların sağlığının korunması ve iş kazalarının önlenmesi açısından küresel ölçekte önem taşıyan bir olgudur. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO, 2021) göre iş kazaları ve meslek hastalıkları her yıl milyonlarca çalışanın yaşam kalitesini olumsuz etkilemekte ve ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO, 2023) verilerine göre her gün yaklaşık 7.500 kişi işle ilişkili nedenlerle hayatını kaybetmektedir. Bu durum iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarının yalnızca örgütsel değil aynı zamanda mühendislik perspektifinden de ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

İş sağlığı ve güvenliği yönetiminde önleyici yaklaşım temel ilke olarak kabul edilmekte olup, bu yaklaşımın hayata geçirilmesinde mühendislik tasarımı ve teknik kontrol yöntemleri kritik rol oynamaktadır (Manuele, 2014). Geleneksel olarak İSG uygulamalarında kişisel koruyucu donanım ve eğitim

gibi davranışsal yöntemler ön planda yer alırken, modern güvenlik anlayışı, risklerin kaynakta yok edilmesini veya mühendislik kontrolüyle azaltılmasını esas almaktadır (Bird & Germain, 1996; OSHA, 2020). Bu anlayış, **"**Güvenlik Tasarımla Başlar (Safety by Design)**"** ilkesine dayanan mühendislik yaklaşımı ile uyumludur.

Mühendislik tasarımı, iş süreçlerinin, makinelerin, üretim hatlarının ve çalışma ortamlarının güvenlik odaklı planlanmasını kapsar (Kletz, 2001). Özellikle risk değerlendirme süreçlerinde HAZOP**,** FMEA **ve** FTA gibi sistematik analiz tekniklerinin kullanılması, endüstriyel tehlikelerin erken tespit edilmesine ve önleyici çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Stamatis, 2003). Bu nedenle mühendislik disiplini, yalnızca üretim verimliliğine değil aynı zamanda iş güvenliğinin sistematik olarak tasarlanmasına katkı sağlamaktadır (Lees, 2012).

Modern iş ortamlarında özellikle Endüstri 4.0 uygulamaları**,** robotik otomasyon, sensör tabanlı güvenlik sistemleri ve yapay zekâ destekli risk izleme teknolojileri gibi mühendislik çözümleri iş güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Badri, Boudreau-Trudel & Souissi, 2018). Bununla birlikte mühendislik temelli iş sağlığı ve güvenliği stratejilerinin etkin olabilmesi için disiplinler arası bir yaklaşım gerekmektedir. Endüstri mühendisliği, makine mühendisliği, inşaat mühendisliği, kimya mühendisliği ve ergonomi bilimi; güvenli çalışma ortamlarının tasarımında önemli katkılar sunmaktadır (Bridger, 2008).

Bu bölümde, çalışma ortamı güvenliğinin sağlanmasında mühendislik tasarımının rolü, önleyici stratejilerin uygulama alanları, risk değerlendirme yöntemlerinin mühendislik perspektifinden ele alınışı ve teknolojik gelişmelerin güvenlik tasarımına etkisi literatür temelli olarak incelenecektir. Bölümün amacı, mühendislik temelli İSG yaklaşımının temel prensiplerini ortaya koymak ve iş sağlığı ve güvenliği yönetimine **proaktif ve** bilimsel bir bakış açısı kazandırmaktır.

ÇALIŞMA ORTAMININ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ

Çalışanların iş ortamında karşılaştığı fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal riskler, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kavramının dünya genelinde ele alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Çalışma ortamı koşulları, çalışan performansı, iş verimliliği ve çalışan sağlığı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir (Alli, 2008). Bu nedenle iş sağlığı ve güvenliğinin temel hedeflerinden biri, çalışanlara sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktır (International Labour Organization [ILO], 2023).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) iş sağlığını, yalnızca hastalık veya sakatlık durumunun olmayışı değil, aynı zamanda çalışanların bedensel, ruhsal ve sosyal yönden tam bir iyilik halinde bulunması olarak tanımlamaktadır (WHO, 2021). Bu tanım, çalışma ortamının sadece fiziksel risklerden arındırılmasını değil aynı zamanda ergonomik ve psikososyal açıdan destekleyici şekilde tasarlanmasını da gerekli kılmaktadır (Schulte et al., 2015).

Bilimsel araştırmalar, sağlıksız çalışma ortamlarının iş kazaları ve meslek hastalıklarının temel nedenleri arasında yer aldığını ortaya koymaktadır (Hämäläinen, Takala & Kiat, 2017). Örneğin, yetersiz havalandırma, gürültü, titreşim, tehlikeli kimyasal maddeler, uygunsuz iş ekipmanları ve ergonomik olmayan iş istasyonları hem kısa hem uzun vadede çalışan sağlığını tehdit etmektedir (Goetsch, 2019). Ayrıca, çalışma ortamında bulunan psikososyal riskler (iş stresi, mobbing, aşırı iş yükü vb.) çalışan sağlığını ve işletme verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Cooper & Quick, 2017).

İSG açısından güvenli bir çalışma ortamı oluşturmak yalnızca çalışanların sağlığını korumakla kalmaz; aynı zamanda iş verimliliği, üretim kalitesi ve işletme sürdürülebilirliği açısından da kritik önem taşır (Burton, 2010). İş kazaları ve meslek hastalıkları nedeniyle ortaya çıkan iş gücü kaybı, sağlık giderleri ve tazminat maliyetleri işletmeler için ciddi ekonomik sonuçlara yol açmaktadır (Leigh, 2011). Bu bağlamda güvenli iş ortamı oluşturmak, aslında bir yasal yükümlülüğün ötesinde stratejik bir yönetim anlayışı olarak değerlendirilmelidir (European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA], 2019).

Sonuç olarak, çalışma ortamının İSG açısından önemi yalnızca çalışan güvenliğiyle sınırlı değildir; aynı zamanda işletmelerin sürdürülebilirliği, üretim kalitesi, çalışan motivasyonu ve toplumsal refah üzerinde de belirleyici bir role sahiptir. Bu nedenle iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında güvenli çalışma ortamlarının mühendislik tasarımı, risk önleme stratejileri ve bilimsel temelli yönetim sistemleri ile desteklenmesi gerekmektedir.

1.Mühendislik Perspektifinden İş Sağlığı ve Güvenliği

İş sağlığı ve güvenliği (İSG), günümüzde yalnızca hukuki bir zorunluluk veya işletmelerin sosyal sorumluluğu olarak değil, aynı zamanda mühendislik biliminin önemli bir uygulama alanı olarak kabul edilmektedir. Mühendislik yaklaşımı, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının "tesadüfi olaylar" olmadığını, aksine önceden analiz edilebilir, tahmin edilebilir ve kontrol edilebilir sistem hataları olduğunu öne sürer (Reason, 1997). Bu nedenle mühendislik temelli İSG yaklaşımı, reaktif değil proaktif güvenlik anlayışını esas alır (Manuele, 2014).

Mühendislik bilimi, çalışma ortamlarındaki riskleri tasarım aşamasında yok etmeyi veya en aza indirmeyi amaçlayan sistematik yöntemler sunar. Bu yaklaşım, literatürde "Güvenlik Odaklı Tasarım" (Safety by Design) veya "Önleyici Mühendislik" olarak tanımlanmaktadır (Kletz, 2001). Özellikle endüstriyel tesislerde kullanılan risk analiz yöntemleri olan Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (HAZOP), Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA) ve Hata Ağacı Analizi (FTA) gibi mühendislik teknikleri, risklerin bilimsel temelli değerlendirilmesinde önemli bir yer tutmaktadır (Stamatis, 2003; Lees, 2012).

İş kazalarının büyük çoğunluğu, tasarım hataları, ekipman uygunsuzluğu, sistem eksiklikleri veya süreç kontrolündeki yetersizlik gibi mühendislik ile ilişkili faktörlerden kaynaklanmaktadır (Hale & Hovden, 1998). Bu nedenle İSG faaliyetlerine mühendislik perspektifiyle yaklaşmak, güvenlik performansını artırmanın en etkili yoludur. İş ekipmanlarının güvenli tasarımı, makine koruyucularının etkinliği, otomasyon sistemlerinde güvenlik sensörlerinin entegrasyonu ve acil durum tasarımları gibi uygulamalar, mühendislik disiplinlerinin İSG'ye katkısının temel örnekleridir (Goetsch, 2019).

Ayrıca mühendislik tabanlı İSG yaklaşımı yalnızca fiziksel güvenlik ile sınırlı değildir; ergonomi ve insan faktörleri mühendisliği ile de yakından ilişkilidir. İnsan-makine etkileşiminin güvenli tasarlanması, iş kazalarının azaltılmasında önemli bir strateji olarak kabul edilmektedir (Wickens, Lee, Liu & Becker, 2004). Bununla birlikte Endüstri 4.0 teknolojileri, iş güvenliğinde yeni mühendislik çözümleri sunmuş, özellikle yapay zekâ, sensör tabanlı izleme sistemleri ve dijital ikiz teknolojileri sayesinde dinamik risk yönetimi mümkün hale gelmiştir (Badri, Boudreau-Trudel & Souissi, 2018).

Sonuç olarak mühendislik perspektifi, iş sağlığı ve güvenliğini destekleyen bilimsel, analitik ve sistematik bir yaklaşım sunar. Risklerin kontrolünde teknik önlemleri ön plana çıkarması, İSG'nin geleceğinde mühendisliğin vazgeçilmez olduğunu göstermektedir.

2.Önleyici Yaklaşımın Temel İlkeleri

İş sağlığı ve güvenliği yönetiminde önleyici yaklaşım, iş kazaları ve meslek hastalıklarının gerçekleşmesini beklemek yerine, bu olayların kaynağında engellenmesini esas alır. Uluslararası Çalışma Örgütü'ne (ILO, 2023) göre iş

sağlığı ve güvenliği uygulamalarında önleme (prevention), koruma (protection) ve kontrol (control) aşamalarından oluşan risk yönetimi döngüsünün merkezinde yer alır. Geleneksel olarak İSG faaliyetleri çoğunlukla reaktif yöntemlere dayanırken, çağdaş mühendislik temelli güvenlik yaklaşımları proaktif önleme ilkesini temel almaktadır (Hale & Hovden, 1998).

Önleyici yaklaşım, temelde Tehlikelerin Kaynakta Yok Edilmesi ilkesine dayanır. Uluslararası literatürde bu ilkeler "Kontrol Önlemleri Hiyerarşisi" ile tanımlanır ve sırasıyla eliminasyon, ikame, mühendislik kontrolleri, idari kontroller ve kişisel koruyucu donanımlar olarak ifade edilir (OSHA, 2020). Bu yaklaşım mühendislik perspektifini temel alır çünkü risklerin ortadan kaldırılmasında en etkili stratejilerin tasarım ve teknik çözüm içerikleri olduğu kabul edilir (Manuele, 2014).

Önleyici yaklaşımın temel ilkeleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

Proaktiflik İlkesi

Riskler ortaya çıkmadan önce tehlikelerin tahmin edilmesi ve önlem alınması esas alınır. Reason'ın (1997) geliştirdiği İsviçre Peyniri Modeli, kazaların ihmal sonucunda değil sistem zafiyetlerinin birikimiyle oluştuğunu vurgular ve tehlikelerin önceden engellenmesi gerektiğini belirtir.

Sistematiklik ve Süreklilik İlkesi

Önleme faaliyetleri planlama, uygulama, kontrol ve önlem alma (PUKÖ) döngüsüne dayanır (ISO 45001, 2018). Bu ilkeler İSG'nin süreklilik arz eden bir yönetim sistemi olduğunu ortaya koyar.

Kaynakta Kontrol İlkesi

Riskler mümkün olduğunca kaynakta yok edilmeli veya azaltılmalıdır (Kletz, 2001). Örneğin gürültülü bir makinenin yalnızca kulaklıkla değil, makine tasarımı değiştirilerek daha güvenli hale getirilmesi hedeflenir.

Bilimsel Risk Değerlendirme İlkesi

Önleyici yaklaşım veriye dayalı karar verme mekanizmalarına dayanır. HAZOP, FMEA ve Hata Ağacı Analizi gibi mühendislik teknikleri bu ilkenin temel araçlarıdır (Stamatis, 2003).

İnsan Faktörü ve Ergonomi İlkesi

İş güvenliği yalnızca makine güvenliğiyle sağlanamaz; insan davranışları ve ergonomik tasarım da dikkate alınmalıdır (Wickens et al., 2004). Bu nedenle önleyici yaklaşım insan-makine etkileşimini optimize etmeyi de içerir.

Güvenlik Kültürü İlkesi

Önleme bir kurum davranışı olmalıdır. Güvenlik kültürü çalışan katılımı, liderlik desteği ve sistemsel iletişim gerektirir (Cooper, 2000).

Bu ilkeler iş sağlığı ve güvenliğinde modern mühendislik yaklaşımı ile uyumlu olup, etkili bir önleme stratejisinin temelini oluşturmaktadır. Böylece güvenlik, iş süreçlerinin bir sonucu değil tasarlanmış bir sistem çıktısı haline gelir.

MÜHENDİSLİK TASARIMININ İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNDEKİ ROLÜ

İş sağlığı ve güvenliği (İSG), yalnızca yasal zorunluluklarla sınırlı olmayan, aynı zamanda mühendislik ve sistem tasarımı ilkeleri ile yakından ilişkili disiplinler arası bir alandır. Uluslararası Çalışma Örgütü'ne göre iş kazalarının %80'den fazlası uygun mühendislik kontrolleri ve güvenlik odaklı tasarımla önlenebilir niteliktedir (ILO, 2018). Bu bağlamda mühendislik tasarımı, güvenliğin iş sistemlerine entegrasyonunda kritik rol oynamaktadır. Tasarım sürecine güvenlik gereksinimlerinin dâhil edilmesi, risklerin oluşmadan önce ortadan kaldırılmasını sağlayarak proaktif bir güvenlik yaklaşımını desteklemektedir (Manuele, 2014).

1. Güvenlik Odaklı Tasarım (Safety by Design) Yaklaşımı

Güvenlik Odaklı Tasarım (Safety by Design), güvenliğin ürün ve süreç tasarımının başlangıç aşamalarından itibaren dikkate alınmasını savunan mühendislik yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, riskleri kaynağında yok etmeyi önceliklendiren hiyerarşik risk kontrol modeline dayanır (OSHA, 2016). Güvenlik doğrudan tasarım aşamasına yerleştirildiğinde, daha sonra uygulanacak idari kontroller veya kişisel koruyucu donanım kullanımına olan bağımlılık önemli ölçüde azalır (Hughes & Ferrett, 2013). ISO 12100 standardı da makinelerin emniyetli tasarımını zorunlu kılarak tasarımdan kaynaklanan tehlikelerin ortadan kaldırılmasını temel prensip olarak önermektedir (ISO, 2010).

Güvenlik Odaklı Tasarım'ın temel stratejileri arasında gereksiz tehlikelerin elimine edilmesi, güvenlik faktörleri ile tasarımın güçlendirilmesi ve hata toleranslı sistemler geliştirilmesi bulunmaktadır (Manuele, 2014). Bu yönüyle yaklaşım, sürdürülebilir güvenliğin önemli bir unsuru olarak kabul edilmektedir.

2. Sistem Güvenliği Mühendisliği (System Safety Engineering)

Sistem Güvenliği Mühendisliği, karmaşık sosyo-teknik sistemlerde güvenlik risklerini analiz eden ve yöneten sistematik bir mühendislik disiplinidir. Tarihsel olarak havacılık ve savunma sanayinde ortaya çıkmış olsa da (Roland & Moriarty, 1990), günümüzde endüstri mühendisliği, üretim sistemleri ve iş güvenliği alanlarında da yaygın olarak uygulanmaktadır.

Bu yaklaşım, potansiyel sistem arızalarını ve sonuçlarını tanımlamak için analitik tekniklerden yararlanır. Örneğin Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA), hata olasılıklarını değerlendirmek için kullanılırken; Hata Ağacı Analizi (FTA), kök neden değerlendirmesi için kullanılmaktadır (Stamatis, 2003). Sistem güvenliği mühendisliği, güvenlik planlamasında sistem yaklaşımını temel alır ve insan faktörünü de kapsam içine alarak bütünleşik bir güvenlik stratejisi oluşturur (Leveson, 2012). Bu sayede mühendislik sistemlerindeki risklerin dinamik doğasına uygun bütünsel bir çözüm geliştirilir.

3. İş Süreçlerinin ve İş Akışlarının Güvenlik Açısından Tasarımı

İş sağlığı ve güvenliği yalnızca fiziksel makine tasarımı ile sınırlı değildir; aynı zamanda iş süreçlerinin güvenlik odaklı yeniden yapılandırılmasını da kapsar. Güvensiz süreç tasarımı, iş kazalarının temel nedenlerinden biridir (Reason, 1997). Bu nedenle iş akışlarının tasarımında tehlike analizi, ergonomik düzenleme ve iş yükü yönetimi kritik önem taşır (Bridger, 2018).

Özellikle yalın üretim ve Poka-Yoke (hata önleme) gibi mühendislik teknikleri, iş süreçlerinin güvenli hale getirilmesinde etkili araçlardır (Shingo, 1986). Kritik kontrol noktalarının belirlenmesi, yüksek riskli operasyonların otomasyona aktarılması ve hata yapma olasılığını azaltacak süreç düzenlemeleri, süreç güvenliği tasarımının temel unsurlarıdır. Ayrıca iş organizasyonunun güvenlik açısından değerlendirilmesi, iş ekipmanları arasındaki etkileşimlerin risk odaklı planlanmasını da gerektirir (Hollnagel, 2014).

4. İnsan-Makine-Arayüz (HMI) Güvenliği Tasarımı

İnsan faktörü, iş kazalarının %70'inden fazlasında belirleyici faktördür; ancak bu "insan hatası" kavramı çoğu durumda tasarımsal eksikliklerden kaynaklanmaktadır (Reason, 2000). İnsan-Makine-Arayüzü (Human-Machine Interface – HMI) tasarımı bu nedenle kritik bir mühendislik alanıdır. Kullanıcı dostu ve sezgisel arayüz tasarımı, hem iş verimliliğini artırmakta hem de operatör hatalarından kaynaklanan iş kazalarını azaltmaktadır (Wickens et al., 2015).

HMI güvenlik tasarımında kontrol paneli düzeni, alarm sistemlerinin ergonomisi, görsel kodlama, renk ve sesli uyarı sistemleri ve erişilebilirlik ilkeleri önem taşır (ISO 9241, 2017). Ayrıca endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılan SCADA ve PLC tabanlı kontrol ekranlarının operatör dostu tasarımı, güvenlik açısından kritik olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzde yapay zekâ destekli operatör destek sistemleri ve artırılmış gerçeklik tabanlı bakım teknolojileri HMI güvenliği için yeni bir boyut kazandırmaktadır (Endsley, 2018).

RİSK YÖNETİMİ VE MÜHENDİSLİK KONTROL HİYERARŞİSİ

Risk yönetimi, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında tehlikelerin sistematik biçimde tanımlanması, değerlendirilmesi ve kontrol altına alınmasını kapsayan temel bir süreçtir. Etkin risk yönetimi, yalnızca risklerin tespit edilmesiyle sınırlı kalmayıp riskleri kabul edilebilir seviyeye indirmeyi amaçlayan mühendislik kontrollü stratejiler gerektirir (Manuele, 2014). Günümüzde kabul gören yaklaşım, Kontrol Hiyerarşisi modelidir ve bu modelde risklerin kaynağında elimine edilmesi birinci öncelik olarak belirlenmiştir (OSHA, 2016).

1. Tehlikelerin Tanımlanması ve Kaynakta Kontrol İlkesi

Tehlikelerin tanımlanması, risk yönetimi süreçlerinin ilk aşamasıdır ve tehlike kaynaklarının sistematik analizini içerir (Reason, 1997). Kaynakta kontrol ilkesi, risklerin oluşmadan önce eliminasyon veya ikame yoluyla ortadan kaldırılmasını savunan mühendislik yaklaşımına dayanır. ISO 45001 standardı, risk kontrolünde ilk adımın tehlikeyi tamamen yok etmek olduğunu açıkça belirtir (ISO, 2018). Örneğin, toksik bir solventin üretim sürecinden çıkarılarak daha az zararlı bir kimyasal ile ikame edilmesi bu stratejiye örnek olarak verilebilir (Khan & Abbasi, 1998). Kaynakta kontrol yaklaşımı, hem sürdürülebilir güvenlik hem de maliyet etkinliği açısından en uygun yöntem olarak kabul edilmektedir (Hughes & Ferrett, 2013).

2. Risk Değerlendirme Yöntemleri (HAZOP, FMEA, FTA vb.)

Risk değerlendirme, potansiyel tehlikelerin analiz edilmesi ve bu tehlikelerin doğurabileceği sonuçların şiddeti ile olasılığının değerlendirilmesini içerir. Bu süreçte çeşitli analitik yöntemler kullanılmaktadır:

- **HAZOP (Hazard and Operability Study):** Kimyasal ve proses endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, sistem parametrelerindeki sapmaları analiz ederek potansiyel tehlikeleri belirler (Kletz, 1999).

- **FMEA (Failure Mode and Effects Analysis):** Olası hata türlerini ve bunların sistem üzerindeki etkilerini değerlendirerek öncelik sırası belirler (Stamatis, 2003).
- **FTA (Fault Tree Analysis):** Sistem arızalarının kök nedenlerini mantıksal analiz yoluyla ortaya koyar (Vesely et al., 1981).

Bu yöntemler, mühendislik tabanlı güvenlik planlamasında karar destek aracı olarak görev yapar ve proaktif risk yönetimi anlayışına katkı sunar (Leveson, 2012).

3. Mühendislik Kontrollerinin Kişisel Koruyucu Donanımlara Üstünlüğü

Risk kontrol hiyerarşisine göre mühendislik kontrolleri, kişisel koruyucu donanımlardan (KKD) daha etkilidir (NIOSH, 2015). KKD, riskleri ortadan kaldırmaz yalnızca bireysel koruma sağlar ve insan hatasına açık olması nedeniyle en zayıf kontrol önlemidir (Reason, 2000). Buna karşılık mühendislik kontrolleri, sistem tasarımı yoluyla riskleri minimize eder. Örneğin, gürültüye maruz kalmayı azaltmak için makine izolasyonu, kulaklık kullanımından daha etkili bir yöntemdir (Bridger, 2018). Benzer şekilde, yer seviyesindeki tehlikeli kimyasal sızıntılar için ikincil bariyer sistemlerinin kurulması, yalnızca kimyasal eldiven kullanımından çok daha güvenilir bir kontrol sağlar (OSHA, 2016).

4. Makine ve Ekipman Güvenliği Tasarımı

Makine güvenliği, iş kazalarının önlenmesinde kritik öneme sahiptir. AB Makine Direktifi ve ISO 12100 standardı, makine tasarımında güvenliğin zorunlu olması gerektiğini belirtmektedir (ISO, 2010). Güvenli makine tasarımı şu mühendislik ilkelerine dayanır:

- Tehlikelerin mekanik koruyucularla izole edilmesi
- Acil durdurma sistemlerinin uygulanması
- Otomatik kilitleme ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi
- Fail-safe tasarım ilkelerinin uygulanması (Roland & Moriarty, 1990)

Ayrıca modern endüstriyel güvenlikte makine koruma sistemlerine sensörler, ışık perdeleri ve otomatik kapanma mekanizmaları gibi teknolojik çözümler de entegre edilmektedir (HSE, 2015).

ÖNLEYİCİ MÜHENDİSLİK STRATEJİLERİ

Önleyici mühendislik stratejileri, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında risklerin oluşmadan önce kontrol altına alınmasını hedefleyen sistematik ve planlı teknik uygulamalardır. Bu yaklaşım, sadece mevzuata uyum sağlamayı değil, aynı zamanda iş kazalarının ve meslek hastalıklarının mühendislik temelli yöntemlerle kalıcı olarak azaltılmasını amaçlamaktadır (Manuele, 2014). Proaktif güvenlik yönetimi, güvenlik entegrasyonlu tasarım ve proses güvenliği gibi kavramlar bu stratejilerin temelini oluşturmaktadır. Proaktif güvenlik yaklaşımları, risklerin olay sonrası değil, olay gerçekleşmeden önce analiz edilmesine dayanır. Bu anlayışta olay kök neden analizleri, ramak kala bildirimleri, güvenlik gözlemleri ve istatistiksel süreç kontrolü gibi yöntemler uygulanır (Hollnagel, 2018). Proaktif yaklaşımlar, reaktif güvenlik kültürünün aksine mühendislik süreçlerine güvenliği entegre ederek sistematik bir risk yönetimi sağlar (Reason, 1997). Mühendislik tasarımı iş kazalarının önlenmesinde kritik rol oynar. İş ekipmanı ve çalışma ortamlarının güvenlik kriterlerine uygun şekilde tasarlanması, kontrolsüz enerjiye maruz kalmayı azaltır ve tehlikeli durumları ortadan kaldırır (OSHA, 2020). Örneğin, makine tasarımında güvenlik mesafeleri, acil durdurma sistemleri ve koruyucu muhafazaların entegrasyonu mühendislik önlemlerinin temelini oluşturur (ISO 12100, 2010). Bu yaklaşıma göre güvenlik, tasarım sürecinin bir çıktısı değil, tasarımın doğal bir bileşeni olarak ele alınmalıdır. Güvenlik entegrasyonlu otomasyon sistemleri, özellikle yüksek riskli endüstrilerde mühendislik tabanlı risk azaltma stratejilerinin merkezinde yer almaktadır. Güvenlik PLC'leri, ışık perdeleri, kilitleme/etiketleme (LOTO) sistemleri ve sensör tabanlı güvenlik çözümleri makine ve süreç risklerini minimize etmekte yaygın olarak kullanılmaktadır (IEC 61508, 2010). Bu tür otomasyon çözümleri, insan hatası olasılığını azaltmakta ve operasyonların güvenli sınırlar içinde sürdürülmesini sağlamaktadır (Dhillon, 2015). Proses güvenliği ise özellikle kimya, petrol ve gaz gibi tehlikeli maddelerle çalışan endüstrilerde kritik öneme sahiptir. Proses güvenliği, büyük endüstriyel kazaları önlemeye yönelik mühendislik uygulamalarını içerir ve HAZOP (Hazard and Operability Study), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ve LOPA (Layer of Protection Analysis) gibi risk değerlendirme tekniklerine dayanır (Center for Chemical Process Safety [CCPS], 2018). Tehlikeli kimyasalların yönetiminde ekipman güvenilirliği, basınç tahliye sistemleri, sızıntı önleme önlemleri ve acil durum kapatma sistemleri gibi mühendislik çözümleri uygulanır (Khan & Amyotte, 2015). Sonuç olarak, önleyici mühendislik stratejileri, güvenliğin süreçlere entegre edilmesini, insan-makine etkileşiminin güvenli hale getirilmesini ve risklerin doğrudan kaynağında kontrol edilmesini hedefleyen bilimsel prensiplere dayalı yaklaşımlardır. Bu stratejilerin etkili uygulanması, güçlü bir güvenlik kültürü ve sistematik risk yönetim süreçleriyle desteklendiğinde sürdürülebilir iş güvenliği performansı sağlar.

TEKNOLOJİK GELİŞMELER VE AKILLI MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI

Günümüzde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları, teknolojik ilerlemeler ve dijital dönüşüm sürecinin etkisiyle önemli bir değişim yaşamaktadır. Endüstri 4.0, yapay zekâ, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve siber-fiziksel sistemler gibi yenilikçi mühendislik uygulamaları, risklerin daha etkin şekilde yönetilmesine olanak tanıyan proaktif güvenlik yaklaşımlarını mümkün kılmaktadır (Kamble, Gunasekaran & Gawankar, 2018).

1. Endüstri 4.0 ve İş Sağlığı Güvenliği Entegrasyonu

Endüstri 4.0 yaklaşımı; otonom sistemler, dijital ikiz (digital twin), büyük veri ve otomasyon bileşenlerine dayalı yeni bir üretim paradigması sunmaktadır. Bunun İSG alanına entegrasyonu, iş kazalarının öngörülebilirliğini artırmakta ve risklerin dijital yöntemlerle izlenmesine olanak tanımaktadır (Schwab, 2017). Dijital ikiz teknolojisi sayesinde tehlikeli operasyonlar sanal ortamda simüle edilerek risk değerlendirme süreçlerinin doğruluğu artırılmakta ve güvenli mühendislik tasarımı desteklenmektedir (Fuller et al., 2020).

2. Sensör ve Veri Tabanlı Risk İzleme Sistemleri

Nesnelerin interneti (IoT) tabanlı sensör teknolojileri, çalışma ortamlarından gerçek zamanlı veri toplayarak tehlikelerin erken tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Gaz sızıntısı, sıcaklık, gürültü ve titreşim gibi fiziksel risk faktörleri, sensör tabanlı izleme sistemleriyle otomatik olarak analiz edilmekte ve acil durumlarda önleyici müdahaleler gerçekleştirilebilmektedir (Zhao et al., 2019). Ayrıca giyilebilir güvenlik teknolojileri (wearable safety devices), çalışan hareketleri ve fizyolojik durumunu izleyerek yorgunluk, düşme ve tehlikeli bölgeye giriş gibi kritik durumlarda uyarı sistemi sunmaktadır (Guo et al., 2018).

3. Yapay Zekâ Destekli Güvenlik Çözümleri

Yapay zekâ (AI), makine öğrenmesi (ML) ve veri madenciliği teknikleri sayesinde iş kazalarının tahmini ve önleyici stratejilerin geliştirilmesi daha da kolaylaşmaktadır. Özellikle yüksek riskli sektörlerde çalışma ortamı verileri analiz edilerek kazaya yol açabilecek davranış ve durumlar tahmin edilmektedir (Badri, Boudreau-Trudel & Souissi, 2018). Görüntü işleme teknikleri kullanan yapay zekâ algoritmaları, kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımını otomatik olarak izleyebilmekte ve güvenlik ihlallerini tespit edebilmektedir (Fang, Leon & Cho, 2018).

4. Robotik Sistemlerin Güvenlik Tasarımı

Robotik ve otomasyon sistemleri, tekrarlayan, ergonomik açıdan riskli ve tehlikeli işlerde insan faktörüne bağlı riskleri azaltmaktadır. Ancak işyerinde robot kullanımı yeni güvenlik riskleri doğurmakta, bu nedenle robotik

sistemlerde güvenlik tasarımı kritik hale gelmektedir (Murashov et al., 2016). İşbirlikçi robotlar (cobot), insan-robot etkileşimini güvenli kılmak için sensör tabanlı çarpışma önleme sistemleri, düşük kuvvet kontrolü ve acil durdurma mekanizmaları ile donatılmaktadır (Matheson et al., 2019).
Sonuç olarak, teknolojik gelişmelere dayalı akıllı mühendislik uygulamaları, İSG alanında proaktif ve veri odaklı bir yaklaşımın benimsenmesini sağlamaktadır. Bu dönüşüm, iş güvenliği risklerinin daha etkin yönetilmesine katkıda bulunarak çalışan sağlığının korunmasında yeni fırsatlar sunmaktadır.

UYGULAMA ÖRNEKLERİ VE İYİ UYGULAMA MODELLERİ

Mühendislik odaklı iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamaları, farklı sektörlerde riskleri azaltmak ve güvenli çalışma ortamları oluşturmak amacıyla başarıyla uygulanmaktadır. Bu bölümde, çeşitli sektörlerden iyi uygulama örnekleri incelenmektedir.

1. Endüstriyel Üretimde Güvenlik Tasarımı Örneği

Otomotiv ve makine imalat sektörlerinde güvenlik tasarımı, üretim sistemlerinin ilk aşamalarından itibaren mühendislik yaklaşımıyla ele alınmaktadır. Toyota Üretim Sistemi (TPS) kapsamında geliştirilen poka-yoke (hata önleme) mekanizmaları**,** iş kazalarını ve insan hatalarını kaynakta önlemeyi hedefleyen etkili bir mühendislik stratejisidir (Shingo, 1986). Otomatik kilitleme sistemleri, sensörlü risk algılama cihazları ve acil durdurma devreleri, tehlikeli enerjiye karşı koruma sağlamada yaygın olarak kullanılmaktadır (ISO 12100, 2010). Ayrıca üretim hattı ergonomisinin iyileştirilmesi, kas-iskelet sistemi hastalıklarının önlenmesinde önemli katkı sağlamıştır (Helander, 2006).

2. İnşaat Sektöründe Önleyici Mühendislik Uygulamaları

İnşaat sektörü, yüksek düşme riski, devrilme ve göçme gibi mekanik tehlikelerin yoğun olduğu bir alandır. Bu nedenle mühendislik tabanlı güvenlik uygulamaları kritik öneme sahiptir. Geçici kenar koruma sistemleri**,** modüler iskele mühendisliği **ve** yüksekte çalışma platformlarının tasarımı gibi mühendislik çözümleri, düşmeye bağlı kazaları önemli ölçüde azaltmıştır (Hinze, 2011). Dijital teknoloji ile birleşen bu stratejiler kapsamında insansız hava araçları (drone) ve BIM (Building Information Modeling) tabanlı

güvenlik planlaması da şantiyelerde risk değerlendirme süreçlerini güçlendirmiştir (Zhou, Whyte & Sacks, 2012).

3. Kimya ve Proses Endüstrisinde Risk Kontrol Stratejileri

Kimyasal proses endüstrilerinde güvenlik, proses güvenliği yönetimi (PSM) çerçevesinde yürütülmekte olup tehlikeli kimyasal süreçlerde mühendislik önlemleri temel risk kontrol stratejilerinden biridir. HAZOP (Hazard and Operability Study), FTA (Fault Tree Analysis) ve LOPA (Layer of Protection Analysis) gibi teknikler bu sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (CCPS, 2018). Ayrıca kimyasal tesislerde kullanılan otomatik basınç tahliye sistemleri**,** ateşleme kaynaklarının kontrolü **ve** ikinci seviye sızıntı bariyerleri proses güvenliğini artıran mühendislik uygulamaları arasındadır (Khan & Amyotte, 2015). Ölçek ekonomisine bağlı yüksek risk nedeniyle bu sektörde mühendislik tabanlı önleyici sistemler yasal olarak da zorunludur (OSHA 1910.119, 2019).

4. Sağlık Sektöründe Mühendislik Yaklaşımlı İş Güvenliği

Sağlık sektöründe iş güvenliği, biyolojik, kimyasal ve ergonomik risklerin bir arada bulunduğu karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle mühendislik çözümleri; havalandırma sistem tasarımı, negatif basınçlı izolasyon odaları ve biyogüvenlik kabinleri gibi uygulamaları içermektedir (World Health Organization, 2020). Ayrıca tıbbi cihaz güvenliği**,** radyasyon güvenliği **ve** robotik cerrahi sistemlerde güvenlik tasarımı, hasta güvenliği ile birlikte çalışan güvenliğini de önceleyen mühendislik yaklaşımları arasında yer almaktadır (Carayon et al., 2014). Giyilebilir sensörler, hasta transfer robotları ve otomatik dezenfeksiyon sistemleri, sağlık hizmetlerinde iş kazalarını ve ergonomik zorlanmaları azaltan önemli teknolojilerdir (Berkowitz, 2017).

SONUÇ

Bu çalışmada iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında mühendislik yaklaşımının rolü, risklerin kaynağında önlenmesine yönelik stratejiler ve teknolojik gelişmelerin İSG uygulamalarına entegrasyonu kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Çalışma genel olarak göstermektedir ki günümüz endüstriyel uygulamalarında güvenli çalışma ortamının tesisi yalnızca yasal zorunluluk veya etik sorumluluk değil, aynı zamanda verimlilik, sürdürülebilirlik ve kurumsal performans açısından da stratejik bir gerekliliktir.

Elde edilen bulgular, iş kazalarının ve meslek hastalıklarının büyük bir bölümünün mühendislik temelli önleyici yaklaşımlarla azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle güvenlik odaklı tasarım (Safety by Design) anlayışı, sistem güvenliği mühendisliği, risk değerlendirme modelleri (HAZOP, FMEA, FTA vb.) ve kontrol önlemleri hiyerarşisi gibi metodolojik araçların etkin kullanımı, risklerin ortaya çıkmadan yönetilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, geleneksel olarak tepki odaklı güvenlik yaklaşımından proaktif ve hatta öngörücü güvenlik yönetimine geçişi zorunlu kılmaktadır.

Çalışmada yer verilen uygulama örnekleri, mühendislik disiplinlerinin farklı sektörlerde risk kontrolünde kritik rol üstlendiğini göstermektedir. Endüstriyel üretim sektöründe hata önleme mekanizmaları ve otomasyon temelli güvenlik sistemleri; inşaat sektöründe mühendislik tasarımlı geçici koruma sistemleri; kimya endüstrisinde proses güvenliği yönetimi ve çok katmanlı koruma analizleri; sağlık sektöründe ise biyogüvenlik ve tıbbi cihaz güvenliği uygulamaları önleyici güvenlik kültürünün örnekleridir.

Ayrıca dijitalleşmenin artışıyla birlikte Endüstri 4.0, yapay zekâ, sensör tabanlı izleme sistemleri, dijital ikiz teknolojisi ve robotik uygulamalar, iş sağlığı ve güvenliği alanında yeni bir dönüşüm başlatmıştır. Bu teknolojilerin mühendislik güvenliği stratejileri ile birlikte uygulanması, risk yönetiminde gerçek zamanlı veri analizini ve öngörücü güvenlik modellerini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, iş sağlığı ve güvenliği alanında sürdürülebilir bir başarı elde edebilmek için mühendislik disiplinlerinin bilimsel yaklaşımının İSG yönetim sistemlerine entegre edilmesi zorunlu görünmektedir. Proaktif güvenlik kültürünün geliştirilmesi, teknolojik yeniliklerin etkin kullanımı ve sistematik risk yönetimi araçlarının benimsenmesi, işyerlerinde **"sıfır kaza"** hedefinin ulaşılabilir olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, mühendislik temelli İSG uygulamalarının yaygınlaştırılması sadece iş kazalarını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda kurumsal performans, çalışan memnuniyeti ve toplumsal sorumluluk açısından da önemli katkılar sunacaktır.

KAYNAKÇA

Adri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern, Safety Science, 109, 403–411.

Alli, B. O. (2008). *Fundamental principles of occupational health and safety* (2nd ed.). International Labour Office.

Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era. Safety Science, 101, 403–411.

Berkowitz, R. (2017). Healthcare robotics: Reducing workplace injuries. Journal of Healthcare Engineering, 5(2), 101–112.

Bird, F. E., & Germain, G. L. (1996). Practical Loss Control Leadership. Loganville, GA: International Loss Control Institute.

Burton, J. (2010). *WHO healthy workplace framework and model: Background and supporting literature and practices*. World Health Organization.

Carayon, P., Wetterneck, T. B., Rivera-Rodriguez, A., Hundt, A. S., Hoonakker, P., Holden, R., & Gurses, A. (2014). Human factors systems approach to healthcare quality and patient safety. Applied Ergonomics, 45(1), 14–25.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2018). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (4th ed.). Wiley.

Center for Chemical Process Safety. (2018). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (4th ed.). Wiley.

Cooper, C. L., & Quick, J. C. (2017). *The Handbook of Stress and Health: A Guide to Research and Practice*. Wiley-Blackwell.

Dhillon, B. S. (2015). Safety and Reliability Engineering. CRC Press.

Endsley, M. R. (2018). Situation awareness in automation: A review and framework. CRC Press.

European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2019). *Healthy workplaces campaign*. Retrieved from https://osha.europa.eu

Fang, W., Leon, R., & Cho, Y. K. (2018). Deep learning-based automated safety monitoring system using PPE detection. Automation in Construction, 94, 317–329.

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access, 8, 108952–108971.

Goetsch, D. L. (2019). *Occupational Safety and Health for Technologists, Engineers, and Managers* (9th ed.). Pearson.

Goetsch, D. L. (2019). *Occupational Safety and Health for Technologists, Engineers, and Managers* (9th ed.). Pearson.

Guo, H., Yu, Y., Skitmore, M., & Zhang, L. (2018). Analysis of safety risks for IoT-based wearable devices in construction. Automation in Construction, 93, 223–234.

Hale, A., & Hovden, J. (1998). Management and culture: The third age of safety. *A Review of Approaches to Organizational Aspects of Safety, 1*, 1–14.

Hämäläinen, P., Takala, J., & Kiat, T. B. (2017). Global estimates of occupational accidents and work-related illnesses 2017. *World Congress on Safety and Health at Work*.

Health and Safety Executive (HSE). (2015). Machinery Safety Guidelines. HSE Publications.

Helander, M. (2006). A Guide to Human Factors and Ergonomics (2nd ed.). CRC Press.
International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). IEC 61508 Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems. IEC.
International Labour Organization (ILO). (2023). Safety and health at the heart of the future of work. Retrieved from https://www.ilo.org
International Labour Organization (ILO). (2023). *Safety and health at work*. Retrieved from https://www.ilo.org
International Labour Organization. (2018). Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience. ILO Publications.
International Organization for Standardization. (2010). ISO 12100: Safety of machinery—Risk assessment. ISO.
International Organization for Standardization. (2010). ISO 12100:2010 – Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction. ISO.
International Organization for Standardization. (2017). ISO 9241: Ergonomics of human-system interaction. ISO.
International Organization for Standardization. (2018). ISO 45001: Occupational health and safety management systems—Requirements. ISO.
Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Industry 4.0 and lean manufacturing: Synergy analysis. International Journal of Production Research, 56(8), 2975–2990.
Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 11(4), 261–277.
Khan, F. I., & Amyotte, P. (2015). Safety and Risk Management in Chemical Processes. CRC Press.
Kletz, T. (1999). HAZOP and HAZAN. Taylor & Francis.
Kletz, T. (2001). Learning from accidents (3rd ed.). Gulf Professional Publishing.
Lees, F. P. (2012). *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
Leigh, J. P. (2011). Economic burden of occupational injury and illness in the United States. *Milbank Quarterly, 89*(4), 728–772.
Leveson, N. (2012). Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT Press.
Manuele, F. A. (2014). Advanced safety management: Focusing on Z10 and serious injury prevention (3rd ed.). Wiley.
Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review. Robotics, 8(4), 100.
Murashov, V., Hearl, F., & Howard, J. (2016). Working safely with robot workers. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 13(3), D61–D71.
National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2015). Hierarchy of controls. CDC.
Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2016). Occupational safety standards. U.S. Department of Labor.
Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2020). Hierarchy of Controls. Retrieved from https://www.osha.gov

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2020). Machine Guarding Standard 29 CFR 1910 Subpart O. U.S. Department of Labor.
Occupational Safety and Health Administration. (2016). Recommended practices for safety and health programs. U.S. Department of Labor.
Occupational Safety and Health Administration. (2019). Process Safety Management Standard (29 CFR 1910.119). U.S. Department of Labor.
Reason, J. (1997). Managing the risks of organizational accidents. Ashgate.
Reason, J. (2000). Human error: Models and management. BMJ, 320(7237), 768–770. https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768
Roland, H. E., & Moriarty, B. (1990). System safety engineering and management (2nd ed.). John Wiley & Sons.
Schulte, P. A., Guerin, R. J., Schill, A. L., Bhattacharya, A., Cunningham, T. R., Pandalai, S. P., ... & Stephenson, C. M. (2015). Considerations for incorporating "well-being" in public policy for workers and workplaces. *American Journal of Public Health, 105*(8), 31–44.
Schwab, K. (2017). The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum.
Shingo, S. (1986). Zero quality control: Source inspection and the poka-yoke system. Productivity Press.
Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (2nd ed.). ASQ Quality Press.
Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (1981). Fault tree handbook (NUREG-0492).U.S. Nuclear Regulatory Commission.
Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., & Becker, S. (2004). *An Introduction to Human Factors Engineering* (2nd ed.). Pearson.
Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., & Gordon-Becker, S. (2015). An introduction to human factors engineering (2nd ed.). Pearson.
World Health Organization (WHO). (2021). Occupational Health. Retrieved from https://www.who.int
World Health Organization. (2020). Occupational Health and Safety in Healthcare Settings. WHO Press.
Zhao, X., Li, Q., Zhang, S., & Wang, H. (2019). Real-time monitoring for hazardous gases based on wireless sensor networks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 57, 1–9.
Zhou, Z., Whyte, J., & Sacks, R. (2012). Construction safety and digital design: A review. Automation in Construction, 22, 102–111.

Doğal Elyaf İçeren Kompozitler

İlyas KARTAL[1]
Gamze BAYGELDİ[2]

1- Doç.Dr. İlyas KARTAL; Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. ilyaskartal@marmara.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-9677-477X
2- Gamze BAYGELDİ; Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, gamzenurbaygeldi@gmail.com ORCID No: 0009-0004-0528-8119

ÖZET

Kompozit malzemeler, üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra hafiflik avantajıyla sürekli gelişmekte ve havacılık, otomotiv, deniz gibi birçok sektörde kendine önemli yer edinmiştir. Öte yandan, günümüzde artan küresel ısınma, sürdürülebilirlik gibi çevresel kaygılar, fosil yakıtlardan türetilen kompozit malzemelerin kullanımında azalmaya neden olmaktadır. Özellikle sera gazı emisyonlarının azaltılması ve yakıt verimliliğinin iyileştirilmesi yönündeki küresel girişimler, düşük karbon ayak izine sahip hafif ve sürdürülebilir malzemelere olan ihtiyacı giderek artırmaktadır. Bu doğrultuda, doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeler önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Jüt, keten, rami, kenevir, pamuk, sisal ve kenaf gibi lignoselülozik elyaflardan elde edilen takviyelerin yanı sıra ipek ve yün gibi hayvansal kökenli elyaflar da takviye elemanı olarak yaygın olarak kullanılabilmektedir. Bu elyaflar; biyokütle kaynaklı, biyolojik olarak parçalanabilir ya da parçalanamaz polimer matrislerle birleştirilerek yenilenebilir hammaddelerden üretilmektedir. Böylelikle söz konusu kompozitler, yalnızca çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmakla kalmamakta, aynı zamanda geri dönüşüm potansiyelleri, düşük maliyetleri ve enerji tasarrufu sağlamaları nedeniyle otomotiv, inşaat, ambalaj ve havacılık gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak değerlendirilmektedir. Sahip olduğu tüm bu avantajlar doğal elyaf takviyeli kompozit malzemeleri, geleceğin gelişen malzeme teknolojilerinle stratejik bir konuma taşımaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin üretim süreçlerinde daha az enerji gerektirmesi ve toksik atık oluşturmaması, çevre dostu politikalarla uyumlu olmalarını sağlayarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzeme, Doğal Elyaf, Hibrit Kompozit, Sürdürülebilir Malzemeler.

GİRİŞ

Doğal elyaf takviyeli kompozitler son yıllarda önemli malzemeler haline gelmiştir. Doğal elyaf ve malzemelere olan ilgiyi artırmak için 2009 yılı uluslararası doğal elyaf yılı olarak kabul edilmiştir. Havacılık, otomotiv, bina, inşaat ve mobilya endüstrileri gibi birçok endüstride kullanılmaktadırlar. Doğal esaslı kompozitlerin faydaları arasında sağlık açısından çok az tehlike oluşturmaları veya hiç oluşturmamaları, düşük maliyetli, hafif, yenilenebilir, bol miktarda bulunmaları, estetik açıdan çekici olmaları ve iyi bir özel mukavemet ve sertliğe sahip olmaları yer almaktadır. Doğal elyaf takviyeli kompozitler, geleneksel elyaf kompozitlere kıyasla çevre dostu malzemeler olarak kabul edilebilir (Asim et al., 2015).

Doğal elyaflar, ekonomiye katkıda bulunan ve ülkenin çevre politikasını destekleyen önemli bir ekili biyokütleyi temsil etmektedir. Doğal liflerin yaygın kullanımı ve erişilebilirliği, ormanlar ve tarım üzerindeki baskıyı azaltabilir. Çeşitli doğal liflerin hammadde olarak kullanılması, doğanın

ekolojik dengesinin korunmasına da yardımcı olacaktır. Bu nedenle, kolay bulunabilirlik, hafiflik, aşındırıcı olmayan yapı, düşük maliyet, düşük CO_2 emisyonu, geri dönüştürülebilirlik, yenilenebilirlik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi çok sayıda avantaj nedeniyle doğal liflerle güçlendirilmiş kompozitlerin kullanımında bir artış söz konusudur.

Sap, yaprak, sak, gövde, meyve ve tohum bitkilerinden elde edilen doğal lifler, bireysel ve doğal fiziksel, mekanik ve benzersiz yüzey özelliklerine sahiptir. Doğal liflerin hidrofilik ve hidrofobik doğası, farklı sorpsiyon olaylarına neden olur. Doğal lifler içeren kompozitler, daha düşük yoğunluk, daha iyi ısıl ve ses yalıtımı ile elektrik yalıtımı gibi avantajlara sahiptir ve bu özellikler, kompozitlerin işlevsel olarak kullanılmasını destekler.

Doğal lifli kompozitler, endüstrilerin olumsuz çevresel etkileri sorununa akıllı alternatif çözümlerden biridir. Dünya geneli yıllık doğal elyaf verimi, 45,5 milyon ton olup üçte biri Hindistan'da gerçekleşir (Beg & Pickering, 2008). Muz, Hindistan cevizi, jüt, şeker kamışı, zerdeçal, kapok, kenaf, palmiye ve ananas baskındır. Tropikal bir tarım ortamı, tarımsal atıklardan elde edilen elyafın büyümesi ve kullanımı için büyük bir potansiyele sahiptir. Doğal elyaflar bu nedenle ekstraksiyon sürecinin önemli bir yan ürünüdür ve kompozit ürünlerde takviye malzemesi olarak kullanılabilir (Venkatachalam, Navaneethakrishnan, Rajsekar, & Shankar, 2016).

Doğal elyaflar, mekanik özellikler, nem emilimi ve zayıf termal dayanım gibi farklılıklar nedeniyle kompozit üretiminde zorluklar yaratır. Elyaf-matris yapışması, kaliteli kompozit üretiminde kritik bir faktör haline gelmiştir. Doğal elyaf kompozitlerin pazar taleplerini karşılayabilmesi için elyaf oranları, matris seçimi, süreç optimizasyonu ve istatistiksel yöntemlerle ürün geliştirme önem taşır.

Otomotiv sektöründe ses yalıtımı ve yakıt verimliliği için düşük ağırlıklı malzemelere olan talep, doğal liflerin alternatif olarak kullanımını artırmıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hammaddeler, endüstriyel üretimde çevresel ve ekonomik avantajlar sunar. Doğal bitki ve hayvan bazlı elyafların polimerik kompozitlerde kullanımı, tüm endüstrilerde önemli bir tasarım unsuru haline gelmiştir. Güçlendirilmiş polimerik kompozitler olarak doğal bitki ve hayvan bazlı elyafların kullanımı, tüm endüstriyel ürünler için tasarım ve üretim elemanlarında önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir (Cheung, Ho, Lau, Cardona & Hui, 2009). Sürdürülebilir kompozit üretimi için yenilenebilir tarım ürünlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılmalı, geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri de planlanmalıdır. Bu yaklaşım, çevresel etkileri azaltarak geleceğin kompozit malzemeleri için yenilikçi çözümler sunar. (Chan, Welford & Management, 2005) (Riedel & Nickel, 2005).

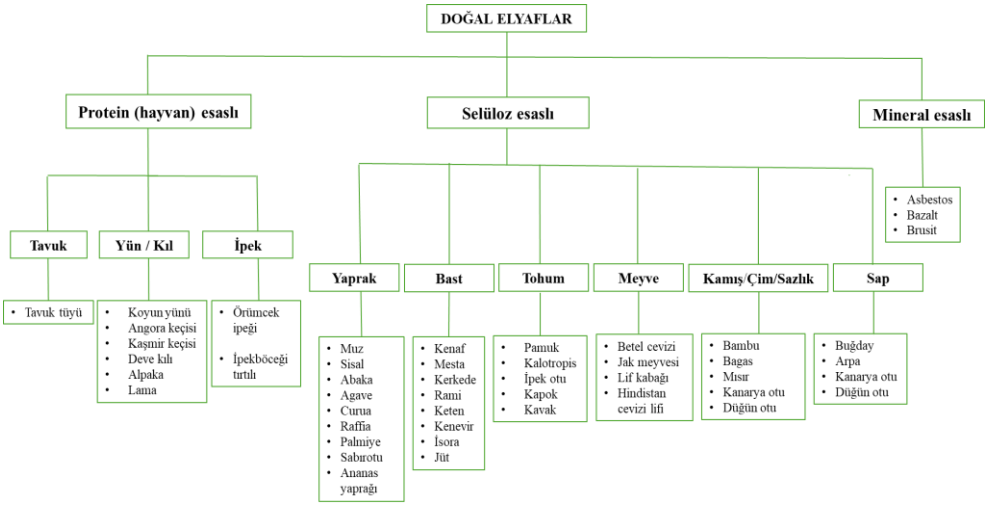
Bugün geldiğimiz noktada gelişmiş devletler üreticilerini, (i) üretimde ortaya çıkan zehirli atık miktarının azaltılması, (ii) hammaddelerin yeniden kullanılması, (iii) hasarlı veya kusurlu ürünlerin onarılması ve (iv) geri dönüşümün mümkün olduğu ölçüde yapılması ve son olarak (v) atıkların çöpe

atılması gibi çevre dostu yaklaşımları desteklemek için kompozit malzemeler üretmeye teşvik etmektedir (Cheung et al., 2009).

DOĞAL ELYAFLAR VE SINIFLANDIRILMASI

Bitki, hayvan ve diğer kaynaklardan elde edilen elyaflar, doğal çevresel sürdürülebilirliği artırarak kompozit üretiminde takviye veya laminasyon malzemesi olarak kullanılır. Birçok doğal elyafın çekirdeğinde lümen adı verilen içi boş bir alan vardır; bu alan elyafı farklı hücrelere bölen rastgele düzenlenmiş düğümlerden oluşur. Doğal liflerin yüzeyi pürüzlüdür ve bu yüzey düzensizlikleri kompozit bir yapıda matrisle iyi bağlar oluşturur. Her bir doğal elyafa özgü mekanik özellikler, kompozitlerin nihai kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli kriterlerdir. Doğal liflerin, özellikle kenevir ve rami liflerinin kopma noktasına kadar olan mukavemeti ve uzaması, E-cam lifleri ile rekabet etmektedir. Liflerin gerilme mukavemeti ve Young modülü, selüloz yüzdesi arttıkça artmaktadır (Pillai & Technology, 2014). Cam ve aramid gibi sentetik elyaflarla karşılaştırıldığında, doğal elyaflar düşük yoğunluğa sahiptir, bu da onları malzemenin ağırlığının önemli bir sorun olduğu düşük ağırlıklı uygulamalar için uygun bir alternatif haline getirir (Abhemanyu et al., 2019).

Doğal liflerdeki lignin içeriğinin varlığı, matris polimer mukavemeti ile birlikte sürdürülebilir çok işlevli kompozitler geliştirmek için kullanılmıştır. Doğal liflerin sertliği, selüloz içeriğinin yüzdesine ve mikrofibrillerin düzenine bağlıdır (Thakur et al., 2014). Bir elyafın darbe dayanımı ve yük taşıma gücü yalnızca mikrofibrillerin hizalanmasına bağlıdır (Baillie & Jayasinghe, 2004; Liese, 1985). Lifler, yük taşıyan bir eleman olarak işlev görürken, lignin ise bir matris yük transfer ortamı olarak lifleri bir arada tutar ve istenen yönde yönlendirilmesini sağlar (Abhemanyu et al., 2019). Jüt ve keten gibi tarıma dayalı bast lifleri, iyi yapısal ve takviye performansları nedeniyle genellikle kompozit endüstrileri tarafından tercih edilmektedir. Bast liflerinde bulunan selüloz lifleri, lignin ve hemiselülozu bir arada tutar (Kalia et al., 2011). Doğal elyafların sınıflandırması şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Doğal liflerin sınıflandırılması

DOĞAL ELYAFLARIN KARAKTERİZASYONU

1. Protein Elyafları

Protein lifleri, peptit bağlarıyla birbirine bağlanan amino asitlerden oluşan birçok reaktif fonksiyonel grup içerir. Protein içerikleri lif eksenine paralel olarak yönlendirilir. Protein lifi genel olarak parlaklığı ve yumuşaklığıyla bilinir. Bu gruptan olan Alpaka keçi lifi iyi yalıtım özelliklerine sahiptir. Angora lifi çok incedir ve dokunulduğunda sıcaktır. Maliyetini azaltmak için sıklıkla yün elyafıyla harmanlanır. Deve tüyü iyi parlaklık ve yalıtım özelliklerine sahiptir. Kaşmir keçi lifleri yumuşak ve lüks bir his verir ve iyi emiciliğe sahiptir.

Anti-paralel beta-tabaka kristalleri, ipek fibroinlerini yüksek çekme mukavemeti ve dayanıklılığa sahip lifler haline getirir (Hu et al., 2011; Jin & Kaplan, 2003; Omenetto & Kaplan, 2010). Düşük yoğunluklu ipek lifleri, doğal olarak iyi uzama ve alev direnç özelliklerine sahiptir (Ataollahi et al., 2012; Pickering et al., 2016; Ude et al., 2013). Mekanik özellikleri bitki

liflerinden daha iyidir. Bal arısı ipeği lifi iyi bir dayanıklılığa ve %200'den fazla esnekliğe sahiptir (Sutherland et al., 2011). İpek lifi harmanlama, bileşenlerinin özelliklerini birleştiren biyomateryaller üretmenin verimli bir yoludur (Hu et al., 2012). Tavuk tüyü lifi, kompozit malzeme üretiminde en yüksek katkı oranında iyi bir eğilme modülüne ve gürültü azaltma katsayısına sahiptir (Barone & Schmidt, 2005; Cheng et al., 2009; Huda & Yang, 2008). İnsan saçı da bir protein lifidir; ana bileşeni keratin olup, dayanıklı, karmaşık ve inanılmaz derecede güçlüdür. Tek bir saç teli 100-150 gramlık bir yükü taşıyabilir (Verma et al., 2016).

2. Mineral Elyaflar

Asbest doğal olarak elyaf şeklinde bulunur. Kaya yünü veya cüruf yünü olarak bilinen sentetik bir mineral elyafı, erimiş kaya veya cürufun içinden hava veya buhar üflenerek üretilir. Bu elyaf yumuşak, esnek ve elektrik, ısı ve korozyona karşı iyi bir yalıtkandır. Mineral elyaflar, yangın koruma ve ısı yalıtım malzemelerinde dolgu maddesi olarak kullanılır. Bazalt, dünya genelinde doğal olarak bulunur ve çevre dostudur; elyafları, eriyikten elyaf çekilmesi ve sarılması süreciyle üretilir. İyi yangın direncine sahiptir, kimyasal olarak inerttir ve darbe mukavemeti iyidir (Mingchao et al., 2008).

Brusit, magnezyum hidroksitin mineral formudur ve iyi anti-alkali özelliklere sahiptir. Cam lifine kıyasla alkali bir ortamda daha stabildir. Bu lifin orta derecede mukavemeti 900 MPa'ya kadar ulaşabilir (Govindan, 2020).

3. Selüloz Elyaflar

Yaprak, bast, tohum, meyve, kamış, çimen, saz ve sap lifleri yüksek selüloz içeriğine sahiptir. Yenilenebilir selüloz lifinin içeriği ve çeşitli liflerin yüzde ağırlığı tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Farklı doğal liflerdeki yüzdece selüloz içeriği *(Cook, 1968; Kumar et al., 2011; Leao et al., 2001; Olesen & Plackett, 1999; Paul et al., 1997; Ramachandra et al., 2004).*

Elyaf Türü	Ağırlıkça selüloz %
Abaka	56 – 63
Bagas	33
Bambu	73.8
Muz	61.5
Betel cevizi	35 – 64.8
Mısır	15 – 20
Pamuk	90
Kozalaklı ağaç	39 – 45
Koko elyafı	43
Kürar	71 -74
Keten	82
Kenevir	77.07
Sabırotu	77.6
Jüt	63.24
Ananas	71.6
Rami	91
Palm yağı	19

Selüloz bazlı lifler, lif demetlerinin daha küçük liflere ayrılarak lif çapının azalmasına neden olan merdane işlemine tabi tutulur. Bu işlem sırasında, yüzey topografyasının pürüzlülüğü artar ve bu, bileşiklerin boy/en oranı ile mekanik özelliklerinde bir artışa yol açar. Yüksek selüloz içeriğine sahip liflerde reaksiyon bölgeleri, kompozit üretim sürecinde liflerin mekanik bağlanmasını artıran alkali muamelesi ile iyileştirilebilir. Selüloz hacmi fraksiyonu ve selüloz kristalliğinin derecesi, lifin boyuna Young modülünü belirler. Alkali işlemden sonra, selüloz lifi daha hizalı mikro fibril açısı gösterir ve böylece yük taşıma kapasitesini artırır. Endüstriyel kompozit malzemenin etkinliği, lif türüne ve selüloz içeriğine bağlıdır; az miktarda matris eklenmesi, fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde (örneğin, çekme mukavemeti, Young modülü) önemli değişikliklere neden olur.

DOĞAL ELYAFLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİM TEKNİKLERİ

Kompozitler, matris ve takviye olmak üzere iki ana unsurdan oluşur ve üç kategoriye ayrılır: metal matrisli kompozitler (MMC), seramik matrisli kompozitler (SMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK). PMK'de elyaflar reçine veya plastik ile karıştırılarak elyaf takviyeli plastik üretilir (Hollaway, 2010). Fiberler ve matris arasındaki ara yüzeydeki mikro çatlaklar, kompozitlerin sertlik ve mukavemetini olumsuz etkiler. Takviyeli fiberlerden oluşan preformlar, maliyet etkinliği, hasar toleransı, yapısal bütünlük, geniş tasarım imkanı ve üstün düzlem dışı aidiyetler sunar ve özellikle yönlendirilmiş fiberlerin basılmasını sağlar (Hamilton et al., 2010; Norris et al., 2011; Quan et al., 2015; Van der Zwaag et al., 2014).

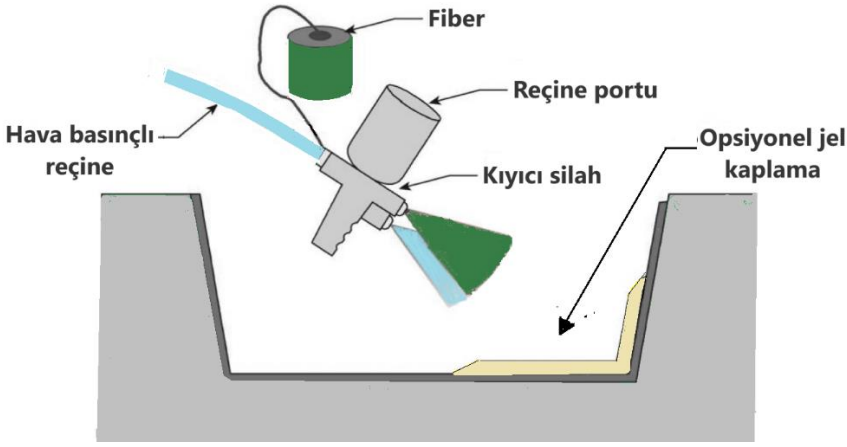
Son yıllarda, biyolojik olarak parçalanabilen lifler ve polimerlerle üretilen yeşil kompozitler, çevre koruma ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda birçok ülke tarafından teşvik edilmektedir (Väisänen et al., 2016). Düşük maliyet, yüksek mekanik mukavemet ve çevresel faydalarıyla bambu, doğal elyaflar arasında öne çıkar. Bambu, diğer bitkilere kıyasla üç kat daha fazla oksijen üretip karbondioksit emerek sera etkisini azaltır (Lau et al., 2018).

Doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri, üretim sürecine bağlı seçim kriterlerine göre belirlenir. Ürünlerin karmaşıklığı, boyutsal toleransı ve üretim süresi bu özellikleri etkiler (Lau et al., 2018). Elyaf-matris arayüzü ve katkı maddeleri, kompozit performansını doğrudan etkiler. Kimyasal işlemler, yüzey modifikasyonları ve plazma gibi yöntemler, arayüzey kesme mukavemetini artırarak daha güçlü kompozitler elde edilmesini sağlar (Rahman et al., 2015; Azaman et al., 2013; George & Bressler, 2017). Elyaf ve matris arasındaki arayüzey bağları, performansı artırmada kritik rol oynar. (Ho et al., 2012; Matuana et al., 2001)

Kimyasal aşılama gibi işlemler, elyafların yüzey karakterlerini değiştirerek kompozitlerin performansını arttırmak için kullanılır (Saheb & Jog, 1999). Plazma işlemi, çevre dostu bir teknoloji olarak yığın özellikleri etkilemeden yüzey özelliklerini iyileştirir. Üretim sürecinde kompozit boyutu kritik bir faktördür; küçük ve orta boyutlu bileşenler için enjeksiyon ve sıkıştırma kalıplama, büyük yapılar için otoklav, pultrüzyon ve açık kalıplama yöntemleri tercih edilir (Keener et al., 2004). (Rajmohan et al., 2019).

1.Sprey Yöntemi

Açık kalıp prosesinde, doğranmış elyaf, reçine ve katalizör karışımı püskürtme tabancasıyla kalıba uygulanır (şekil 2). Püskürtme silindirleri, fazla reçineyi uzaklaştırmak ve sıkışmış havayı çıkarmak için kullanılır. Reçine kaynaklı ağır organik bileşikler hava kirliliğine neden olabilir. Bu yöntem, kapalı kalıp tekniklerinde de uygulanarak her iki yüzeyde iyi bitişler elde edilir. Düşük maliyetle orta ve büyük karmaşık formlar üretiminde tercih edilir (Bhat et al., 2018).



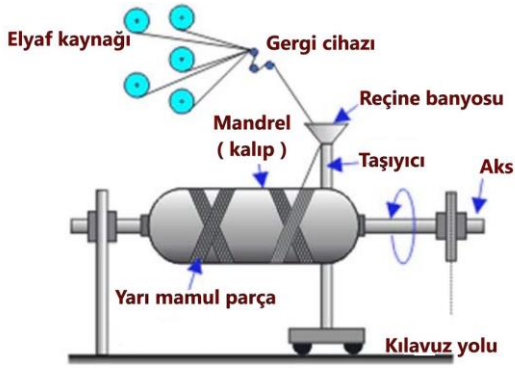
Şekil 2: Sprey işlemi *(Cripps, Searle, & Summerscales, 2000)*.

2.Laminasyon

Laminasyon diğer adıyla el yatırma yöntemi manuel olarak veya tabaka kalıplama bileşikleri kullanılarak otomatikleştirilebilir. Laminatın kalınlığı, gerekli katman sayısını belirler ve kürleme, reçine sistemine bağlı olarak oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda yapılabilir (Huntsman, 2020).

3.Filament Sarımı

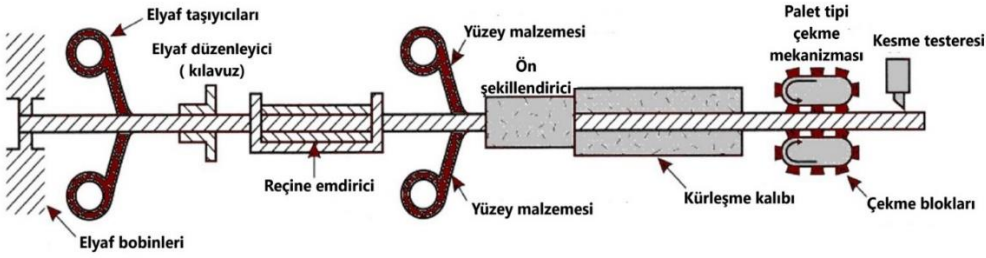
Eksenel simetrik lif takviyeli yapıları üretmek için kullanılan bu süreç, lifin sıvı reçine veya matris çözeltisinden geçirilmesini ve ardından önceden emprenye edilen liflerin uygun bir kalıp üzerine sarılmasını içerir. Lifler, şerit veya kumaş olarak farklı yönelimlerde sarılabilir. Tüm kompozit yapı, kalıp ile birlikte kürlenir. Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra kalıp çıkarılır (Hernandez-Moreno et al., 2008; Yang et al., 2014). Filament sarımı şematik olarak şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3: Filament sarma işlemi *(Bhatt et al., 2018)*

4.Pultrüzyon

Bobinlerden çekilen elyaflar, birlikte yönlendirilir ve reçine tankına daldırılmadan önce ısıtıcıdan geçirilir. Malzeme, son sertleşmeden önce istenilen şekli veren ısıtılmış bir kalıptan çıkar. Sistemdeki çekme mekanizması, yüksek mukavemetli sürekli kesitler üreterek otomatik seri üretim sistemleri için istenilen son ürünleri sağlar (Adrian & Gheorghe, 2010; Rufe & Rufe, 2005). Bu teknik iyi yüzey kalitesi ve tam otomasyon nedeniyle, otomotiv ve havacılık endüstrilerine uygundur (Dexter, 1998). Pultrüzyon işlemi şekil 4'de gösterilmektedir.

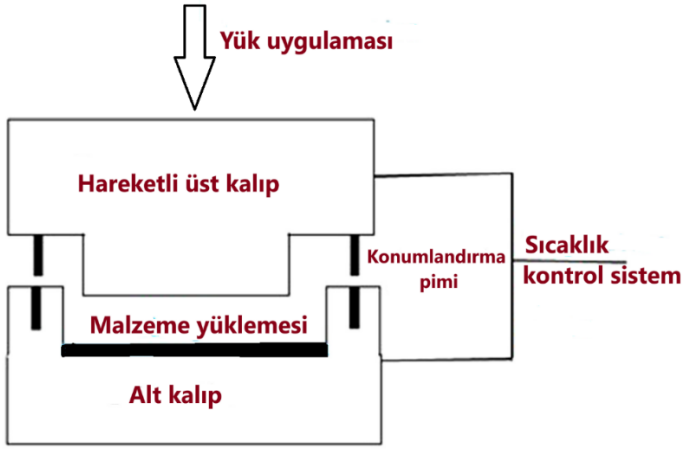


Şekil 4 : Pultrüzyon işlemi *(Bhatt et al., 2018)*

5.Basınçlı Kalıplama

Basınçlı kalıplama sürecinde zaman, basınç ve sıcaklık temel faktörlerdir ve kompozitin kalınlığı, boyutu, şekli ile kürleme döngüsüne göre belirlenir. Bu kalıplamada alt kalıp sabitken üst kalıp hareket eder ve basınç hidrolik presle uygulanır (Şekil 5). Sıcaklık bir elektrik devresiyle kontrol edilir. Basınç ve sıcaklığın optimum kontrolü, kompozit kalitesini belirler. Süreç değişkenlerinin ayarlanması, istenen özelliklere sahip, yüksek

tekrarlanabilirlikte ve düşük düzeltme maliyetli kompozitlerin üretilmesini sağlar (Societyof Manufacturing Engineering, 2020).



Şekil 5: Basınçlı kalıplama *(Bhatt et al., 2018).*

6.Vakum Torbalama ve Vakum İnfüzyonu

Vakumlu torbalama, plastik filmle kaplanan ıslak yerleştirme işleminde vakum basıncıyla fazla reçineyi ve boşlukları sıkıştırır. Vakumlu infüzyon ise kuru yatırma işleminde reçinenin kalıba infüze edilmesiyle gerçekleştirilir. Büyük ve yüksek kaliteli yapılar üretmek için kullanılan bu yöntem, havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak tercih edilir ve vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) olarak da adlandırılır (Strong, 2008).

DOĞAL ELYAF UYGULAMALARI VE PERFORMANSLARI

Araştırmacılar, çevre dostu ekokompozit teknolojisine yönelik yeni fikirler geliştirmektedir. Bu malzemeler, hammadde maliyetlerindeki artış, doğal kaynakların sürdürülebilirliği ve çevresel tehditler nedeniyle önem kazanmış, mobilya, ambalaj, inşaat ve otomotiv gibi sektörlerde yenilikçi çözümler sunmuştur. Ancak, bu taleplerin karşılanması için tasarımda çok yönlülük ve uygun matris seçimleri gereklidir. Doğal lif takviyesi, sentetik liflere alternatif olarak öne çıkmış ve tarımsal liflerin polimerlerle birleştirilmesiyle çevre

dostu, ekonomik biyokompozitler üretilmiştir. Bambu, jüt, sisal ve kenevir gibi tarımsal lifler bu çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin üstünlüğü, elyafların yapısı, boyutu ve işleme tekniğine bağlıdır. Selüloz içeriği, kristallik ve mikrofiber yönü, liflerin sertlik ve dayanıklılığını artıran önemli faktörlerdir. Yüksek selüloz içeriği ve düşük mikrofibril açıları, ideal sonuçlar sağlar. Jüt, sisal gibi lifler, termoset ve termoplastik matrislerde iyi mekanik ve ısı yalıtım özellikleri gösterir.
Örülmüş elyaflar için örgü yapısının sıkılığı ve deseni, kompozitlerin mukavemetinde kritik rol oynar. Mat tip dokuma kompozitlerin, düz ve dimi dokumalardan daha iyi mekanik performans sağladığı tespit edilmiştir. Elyaf demeti, iplik veya kumaş formundaki bu tekstiller, dayanıklı kompozit yapılarda inhibitör etki gösterir.
Keten elyafı iyi gerilme mukavemetine, nem tutma özelliklerine ve UV engelleme kabiliyetine sahiptir ve düşük yoğunluk ve sıfır statik yük avantajları teknik kompozit malzemelerin geliştirilmesi için birçok fırsat sunmaktadır. İç mekan kullanımı için, bakteri ve böceklere karşı doğal direnç gibi ek avantajlara da sahiptir.
Jüt elyafının düşük darbe direnci, daha yüksek sürtünme özellikleri, ağartılabilirlik ve boyama nitelikleri, sınırlı uzama ve sertliği, boşluk içeriği ile birlikte, kompozit üretiminde kabul edilebilir ara yüzey bağlama sunduğu anlamına gelir. Kararlı termal bozunması ve yüksek yük taşıma kapasitesi değerli özellikleridir. İnşaat mühendisliği ve otomotiv uygulamalarında, ayakkabı ve deri endüstrisinde ve yapı endüstrisi sektörlerinde uygulanabilir. Bu elyafla ilgili üst düzey malzeme geliştirme araştırmaları halen devam etmektedir (Boubekeur et al., 2015
Jüt lifi, düşük aşındırıcılığı ve yüksek lif yüklemesi ile ahşaba alternatif bir çözüm sunmaktadır. Liflerin su emme ve boyutsal kararsızlık gibi sorunları, kaplama ve yüzey işlemleriyle giderilmektedir. Palm çekirdeği lifi ve jüt gibi doğal liflerle üretilen kompozitler, inşaat ve mobilya sektörlerinde ahşap yerine kullanılmaktadır. Jüt lifi ile kırmızı çamur ve uçucu külün birleşimi, dayanıklılık ve yangın direnci gibi özellikleriyle ahşaba umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Kompozitlerin performansını artırmak için bağlayıcı ajanlar, yüzey modifikasyon teknikleri ve hibrit liflerle mekanik bağlama yöntemleri kullanılmaktadır (Maity et al., 2012).
Bambu takviyeli kompozitler, geleneksel ahşap ve kompozitlere kıyasla birçok avantaja sahiptir. Yüksek boyutsal stabilite, dayanıklılık, hava koşullarına direnç, düşük bakım gereksinimi, toksik olmama ve yangına dayanıklılık bu avantajlar arasındadır. Geri dönüştürülmüş bambu lifleri ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) karışımlarıyla üretilen kompozitler, termit direnci ve yüksek termal stabilite gibi özelliklere sahiptir ve mutfak gereçleri, yapısal uygulamalar ve dekoratif aksesuarlar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Epoksi reçineyle takviye edilen bambu lifi karışımları aşınma direncini artırırken; sıkıştırma ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerle orta düzeyde mekanik özelliklere sahip ürünler üretilebilmektedir. Elle yerleştirme

yöntemi ise büyük ve karmaşık ürünlerin düşük maliyetle üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Nirmal et al., 2015).
Kenevir lifinin higroskopik yapısı, düşük CO_2 emisyonu ve inceliği, onu iç mekan kullanımı için kompozit malzemelerin geliştirilmesinde etkili kılmaktadır (Kymäläinen et al., 2004). Gözenekli olan sisal elyafı, filtrasyon ve arıtma amaçlı malzemelerin yapımında kullanılmaktadır (Sahu et al, 2017). Süt otu elyafının üstün gözenekliliği, endüstride ve otomobil sektöründe yağların emilmesi ve tutulmasında kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Hubbe et al., 2013).
Ananas elyafı, yüksek gerilme mukavemeti, esnekliği ve iyi boyama özellikleri ile deriye alternatif olarak kullanılabileceği anlamına gelmektedir (Govindan, 2020). Nanoselüloz ananas lifi artık yara pansuman malzemeleri, implantlar ve doku mühendisliği malzemeleri ve biyoteknoloji alanında kullanılmak üzere ilaç dağıtım malzemeleri yapmak için kullanılmaktadır (Cherian et al., 2010). Doğal lifler insan dokusuyla karşılaştırılabilir mekanik özelliklere sahiptir ve biyolojik olarak uyumludur; ayrıca doğal liflerin konak doku üzerinde ters bir etkisi yoktur, bu da biyomedikal uygulamalarda kullanılacak malzemelerde zorunlu bir niteliktir (Janssen, 2000).
Halihazırda, bitkilerdeki biyolojik olarak parçalanabilen doğal lifler, polimer kompozitlerin geliştirilmesinde takviye elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bitkilerin büyüme koşulları, olgunlukları ve kullanılan hasat yöntemleri gibi çeşitli hususlar doğal elyafın özellikleri üzerinde etkili olmaktadır.
Yün liflerinde balmumu ve gres bulunması hidrofobik oldukları anlamına gelir ve lifin geniş gözeneklere sahip ölçek benzeri yapısı kılcal köprüler oluşturmaya yardımcı olur.
Doğal elyaf olarak insan saçı da kullanılan çalışmalar mevcuttur. İnsan saçı keratin adı verilen bir polimerin uzun amino asit zincirlerini içerir. 50,65 karbon, %17,4 nitrojen, %5,0 sülfür ve %20,85 oksijenden oluşur. Ayrıca düşük seviyede glutamin, serin, sitozin, lösin, arginin ve valin içerir. İnsan saçının biyo-polimerler ve doğal liflerle birlikte kullanıldığı yeni tür kompozitler teknik uygulamalar bulabilir (Popescu & Höcker, 2007).
Bir diğer doğal elyaf yüksek kristalli yapısı nedeniyle tavuk tüyü lifleri (TTL) biyolojik olarak parçalanabilir, dayanıklı ve stabildir. TTL'nin bor oksit ile harmanlanmasından elde edilen kompozitler ideal bir yük kapasitesine ve alev geciktirici özelliklere sahiptir. Diğer araştırma alanları TTL ile polimer karışımlarını birleştirmeye odaklanmaktadır. Çalışmalar, kompozitlerin eğilme modülünün TTL yüzdesi arttıkça iyileştiğini göstermiştir. TTL'nin ölçek benzeri yapıları, onları ısı yalıtımlı kompozitler yapmak için çok uygun hale getirmiştir (Okumuş, 2014).
Doğal lif takviyeli kompozitler, mobilya üretiminde sürdürülebilir bir alternatif sunar, ancak maliyet, görsellik ve kalite gereksinimlerine uygun yeniden tasarım gerektirir. Ahşap lif preformları, sıkıştırma kalıplama veya reçine transfer kalıplama yöntemleriyle mobilya bileşenlerine

dönüştürülebilir. Sıkıştırma kalıplama ile üretilen kompozitler, 20-90 GPa mukavemet aralığı sunar. Muz lifi takviyeli epoksi reçine kompozitleri güçlü bir alternatif sağlar ve biyoplastik olarak çevre dostu kompozitler sunar.
Polihidroksialkanoatlar (PHA) ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler, doğal liflerle biyolojik olarak parçalanabilen kompozitler üretir. PLA, mükemmel bariyer özellikleri ve çok yönlülüğü ile dikkat çeker ve petrol bazlı plastiklere alternatif olabilir. Biyoplastikler, toplam plastik üretiminin %1'ini oluştursa da çevre dostu ürünlere artan talep ile bu oran yükselmektedir. 2030'da biyoplastik ve biyokompozit endüstrisinde yaklaşık 300.000 teknisyene ihtiyaç duyulacağı tahmin edilmektedir. Bu gelişmeler, biyoplastiklerin çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel inovasyon açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Hamamcı, 2018).
Son yıllarda PLA, nişasta, kitosan gibi biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin kompozit uygulamalarına olan ilgi artmıştır. Bu polimerler, biyobozunur tıbbi destekli kompozit yapılar üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

REFERANSLAR

Abhemanyu, P., Prassanth, E., Kumar, T. N., Vidhyasagar, R., Marimuthu, K. P., & Pramod, R. (2019). *Characterization of natural fiber reinforced polymer composites*. In *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing.

Adrian, P. P., & Gheorghe, B. M. (2010). Manufacturing process and applications of composite materials. *Journal of Future Manufacturing Technologies and Engineering, 9*(19), 3.1–3.6.

Rahman, M. A., Parvin, F., Hasan, M., & Hoque, M. E. (2015). *Introduction to manufacturing of natural fibre-reinforced polymer composites*. Springer.

Asim, M., Abdan, K., Jawaid, M., Nasir, M., Dashtizadeh, Z., Ishak, M. R., & Hoque, M. E. (2015). A review on pineapple leaves fibre and its composites. *International Journal of Polymer Science, 2015*(1), 950567. https://doi.org/10.1155/2015/950567

Ataollahi, S., Taher, S. T., Eshkoor, R. A., Ariffin, A. K., & Azhari, C. H. (2012). Energy absorption and failure response of silk/epoxy composite square tubes: Experimental. *Composites Part B: Engineering, 43*(2), 542–548.

Azaman, M., Sapuan, S., Sulaiman, S., Zainudin, E., & Abdan, K. (2013). An investigation of the processability of natural fibre reinforced polymer composites on shallow and flat thin-walled parts by injection moulding process. *Materials & Design, 50*, 451–456.

Baillie, C., & Jayasinghe, R. (2004). *Green composites: Polymer composites and the environment*. Elsevier.

Barone, J. R., & Schmidt, W. F. (2005). Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers. *Composites Science and Technology, 65*(2), 173–181.

Beg, M. D. H., & Pickering, K. L. (2008). Mechanical performance of Kraft fibre reinforced polypropylene composites: Influence of fibre length, fibre beating and hygrothermal ageing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39*(11), 1748–1755. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.08.003

Bhatt, A. T., Gohil, P. P., & Chaudhary, V. (2018). Primary manufacturing processes for fiber reinforced composites: History, development & future research trends. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 377, p. 012101). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012101

Boubekeur, B., Belhaneche-Bensemra, N., & Massardier, V. (2015). Valorization of waste jute fibers in developing low-density polyethylene/poly lactic acid bio-based composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 34*(8), 649–661.

Chan, J. C. H., & Welford, R. (2005). Assessing corporate environmental risk in China: An evaluation of reporting activities of Hong Kong listed enterprises. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 12*(2), 88–104.

Cheng, S., Lau, K.-T., Liu, T., Zhao, Y., Lam, P.-M., & Yin, Y. (2009). Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA green composites. *Composites Part B: Engineering, 40*(7), 650–654.

Cherian, B. M., Leão, A. L., De Souza, S. F., Thomas, S., Pothan, L. A., & Kottaisamy, M. (2010). Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. *Carbohydrate Polymers, 81*(3), 720–725.

Cheung, H.-Y., Ho, M.-P., Lau, K.-T., Cardona, F., & Hui, D. (2009). Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. *Composites Part B: Engineering, 40*(7), 655–663. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.014

Cook, J. G. (1968). *Handbook of textile fibres. 1: Natural fibres*. Merrow Publishing.

Cripps, D., Searle, T., & Summerscales, J. (2000). Open mold techniques for thermoset composites. In *Comprehensive Composite Materials* (Vol. 2, pp. 587–610). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00153-3

Dexter, H. B. (1998). *Development of textile reinforced composites for aircraft structures*. Paper presented at the Textile Composites.

Friedrich, K., & Jacobs, O. (1992). On wear synergism in hybrid composites. *Composites Science and Technology, 43*(1), 71–84.

George, M., & Bressler, D. C. (2017). Comparative evaluation of the environmental impact of chemical methods used to enhance natural fibres for composite applications and glass fibre based composites. *Journal of Cleaner Production, 149*, 491–501. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.156

Gloria, A., Ronca, D., Russo, T., D'Amora, U., Chierchia, M., De Santis, R., ... Ambrosio, L. (2011). Technical features and criteria in designing fiber-reinforced composite materials: From the aerospace and aeronautical field to biomedical applications. *Biomechanics, 9*(2), 151–163.

Govindan, R. (2020). *Natural fiber composites: Manufacturing, characterization and testing*. CRC Press.

Hamidi, Y. K., Yalcinkaya, M. A., Guloglu, G. E., Pishvar, M., Amirkhosravi, M., & Altan, M. C. (2018). Silk as a natural reinforcement: Processing and properties of silk/epoxy composite laminates. *Materials, 11*(11), 2135.

Hamilton, A. R., Sottos, N. R., & White, S. R. (2010). Self-healing of internal damage in synthetic vascular materials. *Advanced Materials, 22*(45), 5159–5163. https://doi.org/10.1002/adma.201002427

Hernandez-Moreno, H., Douchin, B., Collombet, F., Choqueuse, D., & Davies, P. (2008). Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure. *Composites Science and Technology, 68*(3–4), 1015–1024. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.07.019

Ho, M.-P., Wang, H., Lee, J.-H., Ho, C.-K., Lau, K.-T., Leng, J., & Hui, D. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites Part B: Engineering, 43*(8), 3549–3562. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001

Hollaway, L. C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials, 24*(12), 2419–2445. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062

Hu, X., Cebe, P., Weiss, A. S., Omenetto, F., & Kaplan, D. L. (2012). Protein-based composite materials. *Materials Today, 15*(5), 208–215. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70091-3

Hu, X., Shmelev, K., Sun, L., Gil, E.-S., Park, S.-H., Cebe, P., & Kaplan, D. L. (2011). Regulation of silk material structure by temperature-controlled water vapor annealing. *Biomacromolecules, 12*(5), 1686–1696. https://doi.org/10.1021/bm200140d

Hubbe, M. A., Rojas, O. J., Fingas, M., & Gupta, B. S. (2013). Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: A review. 3. Spilled oil and emulsified organic liquids. *BioResources, 8*(2), 2918–2976. https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2918-2976

Huda, S., & Yang, Y. (2008). Composites from ground chicken quill and polypropylene. *Composites Science and Technology, 68*(3–4), 790–798. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.003

Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and building with bamboo*. International Network for Bamboo and Rattan.

Jin, H.-J., & Kaplan, D. L. (2003). Mechanism of silk processing in insects and spiders. *Nature, 424*(6952), 1057–1061. https://doi.org/10.1038/nature01809

Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2011). *Cellulose fibers: Bio- and nano-polymer composites—Green chemistry and technology*. Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7

Keener, T. J., Stuart, R. K., & Brown, T. K. (2004). Maleated coupling agents for natural fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 35*(3), 357–362. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.014

Kumar, R., Obrai, S., & Sharma, A. (2011). Chemical modifications of natural fiber for composite material. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 6*(4), 219–228.

Kymäläinen, H.-R., Koivula, M., Kuisma, R., Sjöberg, A.-M., & Pehkonen, A. (2004). Technologically indicative properties of straw fractions of flax, linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Bioresource Technology, 94*(1), 57–63. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.029

Lau, K.-T., Hung, P.-Y., Zhu, M.-H., & Hui, D. (2018). Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. *Composites Part B: Engineering, 136*, 222–233. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.038

Leão, A. L., Caraschi, J. C., Tan, I. L., Kozlowski, R. M., & Manys, S. (2001). Fibra de curauá: Uma alternativa na produção de termoplásticos reforçados. *Polímeros: Ciência e Tecnologia, 3*(31), 214–229.

Liese, W. (1985). Anatomy and properties of bamboo. In *Proceedings of the International Bamboo Workshop* (pp. 196–208).

Maity, S., Singha, K., Gon, D. P., Paul, P., & Singha, M. (2012). A review on jute nonwovens: Manufacturing, properties and applications. *International Journal of Textile Science, 1*(5), 36–43.

Matuana, L. M., Balatinecz, J. J., Sodhi, R. N. S., & Park, C. B. (2001). Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR spectroscopy. *Wood Science and Technology, 35*(3), 191–201. https://doi.org/10.1007/s002260100089

Mingchao, W., Zuoguang, Z., Yubin, L., Min, L., & Zhijie, S. (2008). Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 27*(4), 393–407. https://doi.org/10.1177/0731684407084574

Norris, C., Bond, I., & Trask, R. (2011). The role of embedded bioinspired vasculature on damage formation in self-healing carbon fibre reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42*(6), 639–648. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.02.011

Olesen, P. O., & Plackett, D. (1999). *Natural fibres performance forum*. Copenhagen: Danish Technological Institute.

Omenetto, F. G., & Kaplan, D. L. (2010). New opportunities for an ancient material. *Science, 329*(5991), 528–531. https://doi.org/10.1126/science.1188936

Paul, A., Joseph, K., & Thomas, S. (1997). Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers. *Composites Science and Technology, 57*(1), 67–79. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00111-5

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 83*, 98–112. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038

Pillai, C. K. S. (2014). Recent advances in biodegradable polymeric materials. *Materials Science and Technology, 30*(5), 558–565. https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000463

Popescu, C., & Höcker, H. (2007). Hair—The most sophisticated biological composite material. *Chemical Society Reviews, 36*(8), 1282–1291. https://doi.org/10.1039/b609524n

Quan, Z., Wu, A., Keefe, M., Qin, X., Yu, J., Suhr, J., ... Chou, T.-W. (2015). Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: Opportunities

and challenges. *Materials Today, 18*(9), 503–512. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001

Rajmohan, T., Vinayagamoorthy, R., & Mohan, K. (2019). Review on effect of machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCs). *Journal of the Textile Institute, 110*(9), 1282–1302. https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1557745

Ramachandra, T. V., Kamakshi, G., & Shruthi, B. V. (2004). Bioresource status in Karnataka. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8*(1), 1–47. https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.07.002

Riedel, U., & Nickel, J. (2005). Applications of natural fiber composites for constructive parts in aerospace, automobiles, and other areas. *Biomacromolecules, 10*, 1–9. *(Eserin tam adı ve yayım bilgisi eksikse kesin bilgiyle güncellemek gerekir)*

Rufe, P. D. (2005). *Fundamentals of manufacturing supplement*. Society of Manufacturing Engineers.

Saheb, D. N., & Jog, J. P. (1999). Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology, 18*(4), 351–363. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199924)18:4<351::AID-ADV6>3.0.CO;2-X

Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods and applications* (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers.

Sutherland, T. D., Church, J. S., Hu, X., Huson, M. G., Kaplan, D. L., & Weisman, S. (2011). Single honeybee silk protein mimics properties of multi-protein silk. *PLoS ONE, 6*(2), e16489. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016489

Thakur, V. K., Thakur, M. K., Raghavan, P., & Kessler, M. R. (2014). Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2*(5), 1072–1092. https://doi.org/10.1021/sc500087z

Ude, A., Ariffin, A., & Azhari, C. (2013). Impact damage characteristics in reinforced woven natural silk/epoxy composite face-sheet and sandwich foam, coremat and honeycomb materials. *International Journal of Impact Engineering, 58*, 31–38. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.02.001

Väisänen, T., Haapala, A., Lappalainen, R., & Tomppo, L. (2016). Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber–polymer composites: A review. *Waste Management, 54*, 62–73. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.034

Van der Zwaag, S., Grande, A. M., Post, W., Garcia, S. J., & Bor, T. C. (2014). Review of current strategies to induce self-healing behaviour in fibre reinforced polymer based composites. *Materials Science and Technology, 30*(13), 1633–1641. https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000585

Venkatachalam, N., Navaneethakrishnan, P., Rajsekar, R., & Shankar, S. (2016). Effect of pretreatment methods on properties of natural fiber composites: A review. *Polymers and Polymer Composites, 24*(7), 555–566. https://doi.org/10.1177/096739111602400715

Verma, A., Singh, V., Verma, S., & Sharma, A. (2016). Human hair: A biodegradable composite fiber–A review. *International Journal of Waste Resources, 6*(206), 2. https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000206

Yang, B., Ha, S., Pyo, S., & Lee, H. (2014). Mechanical characteristics and strengthening effectiveness of random-chopped FRP composites containing

air voids. *Composites Part B: Engineering, 62*, 159–166. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.017

Nirmal, U., Hashim, J., & Low, K. O. (2015). Adhesive wear and frictional performance of bamboo fibres reinforced epoxy composite. *Tribology International, 81*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.07.005

Huntsman International LLC. (2020). *Wet lay-up moulding processes*. https://www.huntsman.com/advanced_materials/a/Our%20Technologies/Ready%20to%20Use%20Formulated%20Systems/Composites/Wet%20Lay-Up

Society of Manufacturing Engineers. (2020, January). *Composite material and manufacturing*. https://www.sme.org/technologies/manufacturing-topics/composite-materials-manufacturing/

Okumuş, Y. (2014). *Karbonize edilmiş tavuk tüyü lifi/epoksi kompozitlerin geliştirilmesi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

Hamamcı, B. (2018). Yeşil kompozitlerde biyopolimerlerin kullanımının önemi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 8*(1), 12–24. https://doi.org/10.31466/kfbd.395192

Eğitim Alanında Yapay Sinir Ağları Kullanılan Çalışmalar

Gizen MUTLU[1]
Nisa VURAN SARI[2]

1- Arş. Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. gmutlu@mersin.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7553-2077
2- Arş. Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. nvuran@mersin.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7042-3031

ÖZET

Son yıllarda yapay zekâ ve büyük veri analitiği, eğitim alanında köklü bir dönüşüme öncülük etmektedir. Bu kitap bölümü, son beş yılda yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN) tabanlı modellerin eğitimdeki uygulamalarını inceleyerek bu alandaki güncel eğilimleri ve metodolojileri sistematik bir çerçevede sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma, literatürü dört ana tematik başlık altında kategorize etmektedir: akademik performans tahmini, kişiselleştirilmiş eğitim, içerik üretimi ve soru çözümü ile eğitim sistemlerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi. Ayrıca, Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP), Konvolüsyonel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN), Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) ve Transformatör gibi temel derin öğrenme modellerinin çalışma prensipleri açıklanmıştır.

İncelenen çalışmalar, ANN tabanlı modellerin, öğrenci başarısızlık riskini erken belirlemede, bireysel öğrenme yolları ve duygusal durumlara göre uyarlanmış içerik önermede, otomatik olarak soru ve ders materyali üretmede ve kurumsal düzeyde eğitim kalitesini değerlendirmede geleneksel yöntemlere kıyasla üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Özellikle MLP, LSTM ve CNN gibi modellerin, erken müdahale sistemlerinden takım tabanlı performans takibine kadar geniş bir yelpazede etkinliği kanıtlanmıştır.

Sonuç olarak bu bölüm, ANN'lerin eğitimde sadece bir tahmin aracı olmanın ötesinde, proaktif, uyarlanabilir ve bütüncül eğitim sistemleri oluşturmak için temel bir teknoloji haline geldiğini ortaya koymaktadır. Bu derleme, alandaki araştırmacılar ve uygulayıcılar için kapsamlı bir başvuru kaynağı niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler – Yapay Sinir Ağları, Eğitim Teknolojileri, Derin Öğrenme, Öğrenme Analitiği, Uyarlanabilir Öğrenme Sistemleri.

GİRİŞ

Yapay zeka destekli analiz yöntemleri, son yıllarda eğitim araştırmaları alanındaki en önemli ve dinamik konulardan biri haline gelmiştir. Özellikle büyük veri, uzaktan eğitim platformları ve bireyselleştirilmiş öğrenme ortamlarının gelişimi ile ortaya çıkan devasa eğitim verisi, fiziksel ve geleneksel istatistiksel yaklaşımlarla tam olarak anlaşılamayan öğrenme süreçlerinin daha doğru şekilde modellenmesi için yeni kapılar aralamıştır (Zawacki-Richter vd., 2019). Bu bağlamda, yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, ANN) ve derin öğrenme teknikleri, eğitimcilerin ve araştırmacıların veriye dayalı kararlar almasını sağlayan eğitimsel karar destek sistemleri için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, öğrenme süreçlerinin doğasında var olan

karmaşıklığı ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalama potansiyeli ile geleneksel yöntemlerden ayrılmaktadır (Ouyang ve Jiao, 2021).
Yapay sinir ağları tabanlı modellerin eğitimdeki temel gücü, yalnızca sonuçları tahmin etmekle kalmayıp, bu sonuçlara yol açan süreçleri de modelleyebilmesidir. Tahmin görevlerine ek olarak, bu modeller öğrenci davranış analizi, bilgi edinme sürecinin anlık takibi (knowledge tracing), öğretim kalitesinin değerlendirilmesi ve öğrenme tabanlı akıl yürütme sistemlerinin tasarımı gibi kritik alanlarda aktif olarak kullanılmaktadır. Örneğin, öğrencilerin Sanal Öğrenme Ortamlarındaki (Virtual Learning Environment, VLE) etkileşim verilerini analiz ederek akademik başarıyı veya dersi bırakma riskini taşıyan öğrencileri erken aşamada tespit etmek, en yaygın ve etkili kullanım alanlarından biridir ve bu alanda yapılan çalışmalar, derin öğrenme modellerinin yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir (Waheed vd., 2020).

Eğitimde ANN kullanımının en yenilikçi alanlarından biri, öğrencilerin bilgi ve beceri durumlarını zaman içinde takip eden bilgi izleme modelleridir. Geleneksel yaklaşımların ötesine geçen derin öğrenme tabanlı bilgi izleme modelleri, bir öğrencinin bir sonraki soruyu doğru cevaplayıp cevaplayamayacağını, önceki performans dizisine bakarak yüksek bir isabetle tahmin edebilmektedir. Özellikle öz-dikkat (self-attention) mekanizmalarını kullanan modeller, bu alanda çığır açıcı sonuçlar ortaya koymuştur (Pandey ve Karypis, 2019). Bu sayede, her öğrenciye özel anlık geri bildirimler ve kişiselleştirilmiş öğrenme yolları sunmak mümkün hale gelmektedir. Bu kişiselleştirme, sadece öğrenci başarısını artırmakla kalmaz, aynı zamanda eğitimcilerin de bireysel öğrenci ihtiyaçlarına daha etkin bir şekilde odaklanmasına olanak tanır.

Bu alandaki hızlı gelişmeler, farklı görevler için özelleşmiş YSA mimarilerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Öğrencilerin öğrenme platformlarındaki tıklama akışı gibi sıralı verilerini analiz etmek için Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) ağları sıklıkla kullanılmaktadır. Öğrenciler arasındaki sosyal etkileşimleri veya kavramlar arasındaki ilişkileri modellemek için Grafik Sinir Ağları (Graph Neural Network, GNN) giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Yang vd., 2021). Otomatik metin puanlama veya forumlardaki tartışmaların analizi gibi doğal dil işleme görevleri için ise Transformatör tabanlı modeller, en son teknoloji olarak kabul edilmektedir (Uto ve Ueno, 2021). Benzer şekilde, Konvolüsyonel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) da el yazısı tanıma veya eğitimsel video analizi gibi alanlarda uygulama potansiyeli sunmaktadır.



Şekil 1: Son Beş Yılda Yapılan Akademik Çalışmaların Gruplandırılması.

Bu kitap bölümü, son beş yılda yayımlanmış akademik çalışmaları kapsamakta ve ANN'lerin eğitimdeki uygulamalarını dört temel kavramsal gruba ayırarak incelemektedir. Şekil-1'de sunulan bu dört grup şu şekildedir:

1. **Akademik Performans Takibi:** Öğrencilerin akademik performanslarını, risk düzeylerini ve grup tabanlı başarılarını tahmin etmeye yönelik yapay sinir ağı modelleri.
2. **Kişiselleştirilmiş Eğitim:** Öğrencilerin bireysel öğrenme ihtiyaçlarını analiz etmek ve buna göre uyarlanmış eğitim içerikleri sunmak amacıyla kullanılan yapay sinir ağı modelleri.
3. **İçerik Üretimi ve Soru Çözümü:** Ders materyali, içerik üretimi ve soru çözümünde kullanılan yapay sinir ağı modelleri.
4. **Eğitim Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Değerlendirilmesi:** Öğrenci başarısının artırılması, öğretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve karar destek sistemlerinin oluşturulması gibi alanlarda kullanılan yapay sinir ağı modelleri.

Bu gruplandırma ANN'nin eğitimdeki teknik uygulama çeşitliliğini sistematik olarak ortaya koymakta ve hem araştırmacılara hem de uygulayıcılara bu modellerin hangi alanlarda nasıl kullanıldığını anlamada bir yol haritası sunmaktadır. Her bir alt alan ve çalışma detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bu kitap bölümü Giriş, Materyal ve Metot, Literatür ve Sonuç kısımlarından oluşmaktadır. Materyal ve metot bölümünde literatürde tercih edilen derin öğrenme modellerinin tanımları, Literatür bölümünde, son beş yıla ait ANN-tabanlı modellerin eğitimdeki uygulamalarının yer aldığı detaylı literatür özetiyle araştırmacılar için eğitim teknolojilerindeki çeşitli uygulamalar tematik olarak kategorize edilmektedir. Sonuç bölümünde ise incelenen çalışmalar ışığında ANN'lerin eğitim alanındaki uygulamaları bütüncül bir şekilde değerlendirilmekte ve bu teknolojilerin sunduğu avantajlar ve temel modellerin etkinliği üzerine genel bir çıkarım yapılmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Konvolüsyonel sinir ağları (Convolutional Neural Network, CNN)

CNN'ler özellikle görüntü işleme alanında kullanılan, lokal özellikleri öğrenebilen derin öğrenme modelleridir. Çalışma prensibi, giriş verisi üzerinde kayan bir çekirdek (kernel) ile yapılan konvolüsyon işlemiyle başlamaktadır. Bu işlem, kenar ve desen gibi yerel özellikleri yakalamakta ve her konvolüsyon katmanının ardından aktivasyon fonksiyonu (genellikle ReLU) uygulanarak doğrusal olmayanlık eklenmektedir. Daha sonra gelen havuzlama (pooling) işlemi, çıktıların boyutunu azaltarak modele küçük ötelemelere karşı dayanıklılık kazandırır. CNN'lerin temel avantajları, seyrek bağlantı (sparse connectivity), parametre paylaşımı (parameter sharing) ve çevirmeye eşdeğerlilik (translation equivariance) gibi özellikler sayesinde hem verimli hem de genelleştirilebilir yapılar sunmasıdır. Son katmanlarda ise genellikle tam bağlantılı katmanlar ve softmax fonksiyonu kullanılarak sınıflandırma yapılmaktadır. CNN'ler, sınıflandırma, nesne tanıma, yüz tanıma ve segmentasyon gibi birçok görevde etkili şekilde kullanılmaktadır (Goodfellow vd., 2016).

Çok katmanlı algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP)

MLP, katmanları arasında doğrusal olmayan transformasyonlar yoluyla verileri işleyen, çok sayıda nöron katmanından oluşan bir yapay sinir ağı sınıfıdır. Giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanından oluşan yapısı ile bilinen özel bir ANN türüdür. Bu mimari, esas olarak çeşitli aktivasyon fonksiyonlarının uygulanmasıyla çalışır. Bu fonksiyonlar, MLP'nin verilerdeki karmaşık kalıpları öğrenmesini sağlayan doğrusal olmayan özellikler getirir. Esasen, MLP giriş verilerini giriş katmanından gizli katmanlara yayarak işler, burada ağırlıklar ve biasler aracılığıyla manipüle edilir ve nihayetinde ele alınan belirli sorunla ilgili çıktı üretmektedir (Contreras vd., 2024).

MLP'nin çalışma prensibi, ileri yayılma ve geri yayılma mekanizmaları etrafında döner. İleri yayılma sırasında, girdi özellikleri ilgili ağırlıklarıyla çarpılır ve verileri karmaşık fonksiyon yaklaşımına uygun doğrusal olmayan bir alana dönüştüren bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları arasında ReLU (Rectified Linear Unit), sigmoid ve softmax bulunur ve her biri ağın çıktısına farklı özellikler kazandırır (Elansari vd., 2023). Gizli katmanlarda, verilerin çeşitli yönlerini yakalamak için birden fazla nöron aynı anda çalışır. Bu katmanlı yaklaşım, MLP'lerin özellik hiyerarşileri oluşturmasına ve girdi verilerini karar verme için sıkıştırılmış bir temsil haline kademeli olarak soyutlamasına olanak tanımaktadır. Geri yayılım aşaması, MLP'nin eğitimi için kritik öneme sahiptir. Bu aşamada, tahmin edilen çıktı ile gerçek hedef değerler karşılaştırılarak çıktı katmanında hata hesaplanır. Bu hata sinyali daha sonra, zincir kuralı kullanılarak ağın ağırlıkları ve önyargıları ile ilgili gradyanı

hesaplamak için kullanılır. Genellikle stokastik gradyan inişi (Stochastic Gradient Descent, SGD) veya Adam gibi optimizasyon algoritmaları kullanılarak ayarlanan ağırlık güncellemeleri, ardışık yinelemeler sırasında hata fonksiyonunu en aza indirerek modelin performansını iyileştirmektedir (Gutowski vd., 2023).

Tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Network, RNN)

Ağ içinde döngüler içeren benzersiz bir yapı aracılığıyla sıralı verileri işlemek için tasarlanmış özel bir sinir ağı mimarisi türüdür. Bu özellik, geçmiş bilgileri hatırlamalarını sağlayan bir tür bellek biçimini korumalarına olanak tanır, bu da özellikle sıralı veya zamana bağlı veriler içeren görevlerde faydalıdır. RNN'ler, değişken uzunluktaki girdi dizilerini işleme yetenekleri nedeniyle doğal dil işleme, konuşma tanıma ve zaman serisi tahminleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. RNN'lerin temel işlevi, verileri sıralı olarak işleyerek zamansal bağımlılıkları yakalamaktır. Bu işlemde ağ, her yeni girdi ile birlikte gelişen bir durumu korur. Bir RNN'nin durumu, alınan girdi ve önceki zaman adımındaki gizli duruma göre her zaman adımında güncellenir. Bu tekrarlayan bağlantı, bilginin kalıcı olmasını sağlar ve RNN'lerin zaman içinde kalıpları öğrenmede yetkin olmasını sağlar (Hindarto, 2023).

Matematiksel olarak, zaman t'deki çıktı h_t, bu zaman adımındaki girdi x_t ve önceki gizli durum $h_{(t-1)}$ kullanılarak Denklem (1)'deki gibi hesaplanır:

$$ht = f\,(Ux_t + Wh_{(t-1)}) \quad (1)$$

Burada U ve W sırasıyla girdi ve tekrarlayan bağlantılarla ilişkili ağırlık matrisleridir ve f $tanh$ veya ReLU gibi doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonudur (Ai vd., 2020).

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, standart RNN mimarilerinde çeşitli iyileştirmeler ve değişiklikler üzerinde durmuştur. Örneğin, dikkat mekanizmalarının RNN'lerle entegre edilmesi, modellerin girdi dizilerinin belirli kısımlarına odaklanmasını sağlayarak duygu tanıma ve dil çevirisi gibi görevlerde performansı önemli ölçüde artırmaktadır. Sonuç olarak, RNN'ler, özellikle sıralı verileri içeren görevler için derin öğrenme alanında güçlü bir araçtır (Ai vd., 2020).

Uzun-kısa süreli bellek (Long Short-Term Memory, LTSM)

LSTM, sıralı verileri modellemek için kullanılır. Sıradaki uzun süreli ilişkileri daha iyi yakalamak için LSTM ağları, geleneksel RNN'lerin aksine, önceki girdiler ve bunların bağımlılıkları hakkında veri tutmak için bir bellek hücresi kullanır. Bellek hücresinde bilgi akışını yöneten kapılar vardır. Bir giriş kapısı, bir çıkış kapısı ve bir unutma kapısı içeren bu kapılar, hücreye bilginin nasıl eklendiğini, hücreden nasıl çıkarıldığını ve hücreden nasıl silindiğini yönetir (Alsabhan, 2023).

Kapılı Tekrarlayan Birim (Gated Recurrent Unit, GRU)

GRU, sıralı verilerdeki bağımlılıkları etkili bir şekilde yöneterek geleneksel RNN'lerin performansını artırmak için tasarlanmış bir tür tekrarlayan sinir ağı (RNN) mimarisidir. İlk olarak (Cho vd., 2014) tarafından tanıtılan GRU'lar, modelin geçmiş bilgilerin ne kadarının saklanacağına veya atılacağına karar vermesini sağlayan "kapılar" olarak bilinen mekanizmaları entegre ederek RNN'lerin çalışmasını kolaylaştırır. Bu, LTSM ağlarına kıyasla daha basit bir kapı yapısı sayesinde gerçekleştirilir ve önemli bir performans kaybı olmadan hesaplama karmaşıklığını azaltır (Tao vd., 2019).

GRU mimarisi temel olarak iki kapıdan oluşur: güncelleme kapısı ve sıfırlama kapısı.

Güncelleme Kapısı: Bu kapı, önceki gizli durumun ne kadarının yeni duruma aktarılacağını kontrol eder. Modelin önceki durumu ne ölçüde unutması ve yeni bilgileri ne ölçüde dahil etmesi gerektiğini belirler. Matematiksel olarak, zaman t'deki güncelleme kapısı z_t Denklem (2)'deki gibi ifade edilebilir:

$$z_t = \sigma(W_z * [h_{t-1}, x_t]) \quad (2)$$

Burada σ sigmoid aktivasyon fonksiyonudur, W_z güncelleme kapısı için ağırlık matrisidir, h_{t-1} önceki gizli durumdur ve x_t mevcut girdidir.

Sıfırlama Kapısı: Bu kapı, geçmiş bilgilerin ne kadarının göz ardı edilmesi gerektiğini belirler ve modelin hafızasını sıfırlamasına olanak tanır. Sıfırlama kapısı r_t şu şekilde tanımlanır:

$$r_t = \sigma(W_r * [h_{t-1}, x_t]) \quad (3)$$

Güncelleme kapısına benzer şekilde, W_r sıfırlama kapısı için ağırlık matrisidir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, GRU'ları LSTM gibi diğer mimarilerle karşılaştırmış ve her ikisinin de karmaşık zamansal bağımlılıkları işleyebildiğini, ancak GRU'ların daha az parametre ile benzer performans elde edebildiğini, böylece daha hızlı eğitim ve daha verimli hesaplama sağladığını göstermiştir (Obeta vd., 2023). Ayrıca, bu literatür taramasında gösterildiği gibi GRU, eğitim sürecine erken müdahaleye izin veren sistemler geliştirilmesinde ve dolayısıyla öğrenci başarısının artırılması gibi çalışmalarda (Bernacki vd., 2020) oldukça etkilidir.

Özetle, GRU'lar benzersiz geçit mekanizmaları sayesinde geleneksel RNN yapılarına verimli bir alternatif sunarak, hesaplama yükünü azaltırken ilgili bilgilerin daha iyi tutulmasını kolaylaştırır. Tasarımları, kaynak verimliliğinin çok önemli olduğu uygulama bağlamları için özellikle uygun olmalarını sağlarken, aynı zamanda çeşitli görevlerde sağlam performans elde etmelerini sağlar.

Grafik sinir ağları (Graph Neural Network, GNN)

Grafik olarak yapılandırılmış verileri işlemek için özel olarak tasarlanmış bir sinir ağı modelidir. Bu yetenek, sosyal ağlar, moleküler biyoloji ve bilgi grafikleri gibi birçok gerçek dünya olgusunun doğal olarak düğümlerden (varlıkları temsil eden) ve kenarlardan (ilişkileri temsil eden) oluşan grafikler olarak temsil edilebilmesi nedeniyle giderek daha önemli hale gelmektedir (Ren vd., 2022). GNN'ler bu yapısal bilgileri kullanarak düğümlerin ve bağlantılarının temsillerini üretir ve düğüm sınıflandırmasından bağlantı tahminine ve grafik sınıflandırmasına kadar çeşitli görevleri mümkün kılmaktadır.

Temel işleyiş prensipleri, düğümlerin komşularından bilgi topladığı ve bu bilgiyi güncelleyerek düğüm temsillerini oluşturduğu mesaj aktarımı sürecine dayanır. Her GNN katmanında, düğümler bağlı oldukları komşulardan gelen mesajları ortalama, toplam veya maksimum gibi toplama işlevleri aracılığıyla birleştirir ve bu mesajları doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları ile işleyerek temsil vektörlerini günceller. Bu işlem, ağın derinliği boyunca tekrarlanarak düğüm, kenar veya tüm grafik düzeyinde çeşitli görevlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır. GNN'lerin bu esnek mimarisi, farklı mesajlaşma stratejileri kullanan Grafik Evrişimli Ağlar (Graph Convolutional Network, GCN) ve GraphSAGE gibi alt modellerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Qiu ve Shi, 2023).

Transformatörlerden çift yönlü kodlayıcı temsilleri (Bidirectional Encoder Representations From Transformers, BERT)

Doğal Dil İşleme'de oldukça yenilikçi bir sinir ağı mimarisidir. BERT'i, metni soldan sağa veya sağdan sola okuyan geleneksel dil modellerinden ayıran çift yönlü dikkat mekanizmasıdır. Bu, bir kelimenin bağlamını, ondan önceki ve sonraki kelimelere bakarak analiz edebileceği anlamına gelmektedir. BERT, büyük miktarda metin verisi üzerinde eğitim alarak dil nüansları ve anlamsal ilişkiler hakkında derinlemesine bir anlayış kazanır ve bu da onu duygu analizi de dahil olmak üzere çeşitli NLP görevleri için güçlü bir araç haline getirmektedir (Pilicita ve Barra, 2025).

BERT'in eğitim ortamlarına entegrasyonu da oldukça yaygın görülmektedir. BERT değerlendirme doğruluğunu artıran, çok dilli etkileşimleri destekleyen ve kişiselleştirilmiş öğrenme ihtiyaçlarını karşılayan yenilikçi eğitim araçlarının önünü açmaktadır (Huang vd., 2024). Uygulamaları genişlemeye devam ettikçe, BERT geleneksel eğitim uygulamalarını dönüştürme ve öğrenci katılımını ve öğrenme sonuçlarını iyileştirme konusunda önemli bir potansiyel sergilemektedir.

LİTERATÜR

Akademik performans tahmini

Öğrencilerin akademik performanslarını tahmin etmek, eğitimde ANN'in yaygın bir kullanımıdır. Özellikle LSTM, CNN ve çok katmanlı algılayıcılar (Multilayer Perceptron, MLP) gibi zamansal modeller, bireylerin veya grupların öğrenme çıktılarını tahmin etmek için kullanılmıştır (Li vd., 2022). Risk değerlendirmelerinin, uyarlanabilir öğrenme ortamlarının ve erken müdahale sistemlerinin teknik temeli bu kategoriye giren çalışmalardan oluşmaktadır.

Öğrencilerin akademik performanslarını tahmin ve takip etmek için yapay sinir ağları modelleri kullanan çalışmaların bir kısmında çevrimiçi öğretim sistemlerindeki veriler kullanılmıştır. Örneğin, ANN'ye dayalı öğrenme analitiği ve tahmin modelleri (Bernacki vd., 2020) tarafından fen, teknoloji, mühendislik ve matematik öğrencilerinin erken başarısızlık yaşama olasılığını tahmin etmek için bir çalışmada kullanılmıştır. Sınav sonuçları, video izleme süresi ve çevrimiçi test puanları gibi bilgileri analiz ederek model her bir kişinin başarısızlık risk seviyesini kategorize edebilmiştir. Çalışmada kapılı tekrarlayan birim (Gated Recurrent Unit, GRU) ve LTSM teknikleri kullanılmıştır. Geleneksel makine öğrenmesi teknikleriyle karşılaştırıldığında derin öğrenme modelleri daha yüksek doğruluk, hassasiyet ve F1 puanları üretmektedir. Eğitim sürecine erken müdahaleye izin veren bu sistem sayesinde öğrenci başarısı önemli ölçüde artmaktadır. Sinir ağı, çeşitli öğrenme kalıplarını belirleyerek özel destek yöntemleri önermektedir. Bu bağlamda çalışma, ANN'lerin erken uyarı sistemlerinde ne kadar iyi çalıştığını somut verilerle ortaya koymaktadır.

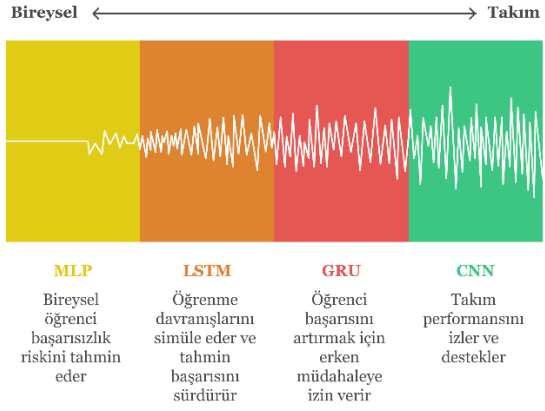
Çevrimiçi eğitim platformlarındaki veriler ile akademik başarı performansına ilişkin yürütülen başka bir çalışmada (Olivé vd., 2019) başarısızlık riski taşıyan öğrencileri belirlemek üzere evrensel bir ANN modeli geliştirilmiştir. Modelin amacı farklı ders içeriklerinde dahi yüksek tahmin başarısı sağlayabilen tek tip bir yapı sunmaktır. Veriler arasında erişim süresi, materyal görüntüleme oranı ve sınav skorları yer almaktadır. Çalışmada MLP kullanılarak tüm derslere uygulanabilir tek bir sinir ağı modeli eğitilmiştir. Eğitim verisi zaman pencerelerine (örneğin ilk 4 hafta) bölünerek erken tahmin yapılmıştır. Sonuçlar özelleştirilmiş modellerden bir miktar daha düşük doğruluk sunsa da genel geçerlilik açısından bu yaklaşımın avantajlarını ortaya koymaktadır. Bu model Moodle gibi platformlara entegre edilerek erken müdahale sistemleri geliştirilebilir.

Benzer şekilde, (Rivas vd., 2021) ANN'ler ve diğer makine öğrenme teknikleri özellikle Moodle platformunda sanal öğrenme ortamlarında eğitim gören öğrencilerin akademik başarısını tahmin etmek için kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, MLP yapay sinir ağı modeli kullanılarak öğrencilerde düşük başarı riskini tahmin etmek ve erken müdahale çözümü sunmaktır. Öğrencilerin sanal öğrenme ortamlarındaki başarısının önemli belirleyicisi

olarak öğrencilerle ne kadar etkileşime girildiği sonucuna ulaşmışlardır. Diğer geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında MLP modeli daha fazla doğruluk sunmuş olup, yazarlar bu yöntemin öğrencilere özel öneriler sunan çevrimiçi rehberlik programlarının temeli olarak görülebilir yorumunu yapmışlardır.

(Niu vd., 2023) ise çevrimiçi öğrenme ortamlarında öğrencilerin dersi bırakma oranlarını belirlemek ve yüksek bırakma oranlarını düşürmek için tasarlanmış yeni bir yapay zeka modeli sunmuşlardır. Çalışmada LSTM modellerini, CNN'lere dayalı otomatik kodlayıcılar (Autoencoders) ile birleştirmişlerdir. LSTM bu zaman serisi verilerini sırayla analiz ederken CNN ise öğrenme davranışlarının düşük boyutlu temsillerini çıkararak karmaşık örüntüleri yakalar ve zaman içinde tahmin başarısını sürdürür. Model öğrenme yönetim sistemlerinden gelen gerçek veriler kullanılarak test edildiğinde, yüksek F1 puanları elde etmişlerdir. Bulgular bu hibrit yapının uzun süreli öğrenme davranışlarını doğru bir şekilde simüle etmedeki etkinliğini göstermiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda öğrencilerin bireysel olarak akademik performanslarına bakılmıştır. Farklı olarak (Giannakas vd., 2021) takım tabanlı öğrenme ortamlarında ekibin akademik performansını erken bir aşamada tahmin etmek için derin öğrenmeye dayalı bir sınıflandırıcı sistem geliştirmişlerdir. Sistem sosyal etkileşim puanlarını, çevrimiçi aktiviteyi ve her takım üyesinin katılım düzeyini dikkate almaktadır. CNN ve MLP mimarilerinin birleştirilmesiyle yüksek doğrulukta erken sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Özellikle proje tabanlı öğrenme ortamlarında ekip performansını izlemek ve desteklemek için oldukça faydalı olduğu ortaya konmuştur. Bu model ile ekip dinamiklerinin nicel olarak nasıl analiz edilebileceğini ortaya koymuşlardır.



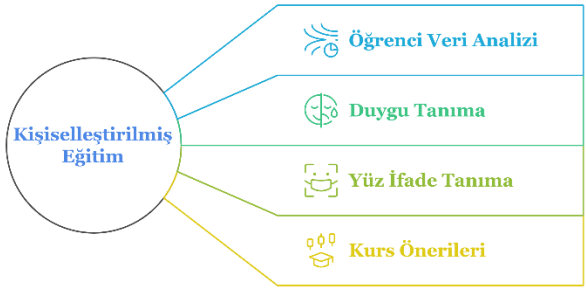
Şekil 2: ANN-tabanlı Akademik Performans Tahmininde Kullanılan Algoritmalar ve Tercih Edilme Amaçları.

Özetle, öğrencilerin akademik performanslarını yordayan çeşitli faktörleri değerlendiren ANN modellerini kullanan çok sayıda çalışma

bulunmaktadır. Çevrimiçi öğrenme ortamlarında ANN'ler öğrencilerin akademik performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için etkili bir araç olduğu görülmüştür. Kişisel riskleri belirleme, erken müdahale sistemleri oluşturma ve bireyselleştirilmiş destek sunma açısından MLP, CNN ve LSTM gibi modeller önemli katkılarda bulunmaktadır. Takım tabanlı öğrenme ortamlarında grup performansını takip etmek için etkili yollar da sunarlar. Bireysellikten takım çalışmasına doğru uzanan analizde sırasıyla MLP, LSTM, GRU ve CNN modelleri yer almaktadır. MLP modelleri genellikle öğrencinin bireysel başarısızlığını tahmin ederken LSTM modelleri öğrenme davranışları üzerine sıralı bir tahmin gerçekleştirir. GRU, öğrencinin başarısını arttırmak adına erken müdahaleyi belirler ve CNN ise takım performanslarını izler. Bu bölümde sunulan çalışmalarda, ANN ile hibritlenen derin öğrenme modellerinin, tasarlanan sistemlerde nerelere müdahale ettiğinin özeti Şekil 2'de sunulmuştur. Bu bağlamda, ANN'ler bireysel başarıyı izlemenin yanı sıra proaktif, uyarlanabilir ve bireyselleştirilmiş öğrenme ortamları oluşturmak için de önemlidir.

Kişiselleştirilmiş eğitim

Geleneksel eğitim modelleri her öğrenciye aynı materyali aynı hızda sunarken sıklıkla bireysel farklılıkları göz ardı etmektedir. Bu sorunu ele almak için her öğrencinin benzersiz öğrenme tercihlerini, hızını ve ilgi alanlarını hesaba katarak daha verimli öğretim stratejileri sağlama hedefi ile kişiselleştirilmiş eğitim sistemleri oluşturulmuştur. Bu bağlamda, öğrenci öğrenme verilerini değerlendirmek ve kişiye özel içerik önerileri yapmak için en etkili yöntemlerden biri ANN'lerdir. Şekil 3'te de sunulduğu gibi, öğrencilerin mevcut bilişsel ve duygusal durumlarını anlamak, bireyselleştirilmiş eğitim içeriği oluşturmak için çok önemlidir. Bu, öğretmenlerin öğrencilerine ne tür materyal sağlayacaklarına karar vermelerine yardımcı olabilir.



Şekil 3: Kişiselleştirilmiş Eğitimde ANN-tabanlı Çalışmaların Tercih Edildiği Alanlar.

Öğrencilerin duygusal durumlarını belirlemek için yapılan bir çalışmada CNN ve transfer öğrenme teknikleri kullanılmıştır (Hung vd., 2019). Öğrenme sırasında toplanan yüz ifadelerine dayalı görüntü verileri

modeli eğitmek için kullanılmıştır. Öğrencilerin motivasyonunu ve odaklanmasını analiz etmek için kullanılabilecek önemli faktörlerden biri duyguları tanıma yetenekleridir. Çalışmada CNN ve transfer öğrenmenin duygusal durumları doğru bir şekilde belirlemek için birlikte iyi çalıştığı sonucuna varılmıştır. Öğretim süreci boyunca öğrencilerin duygularını anlamak, öğrenme ortamlarının değiştirilmesini kolaylaştırmıştır.

Öğretmenlerin sınıftaki yüz ifadelerini tanımlamak için (Zheng vd., 2020) tarafından yapılan bir çalışmada bir dikkat mekanizması ve CNN tabanlı model kullanmışlardır. Video karelerinden gelen yüz verilerini kullanan modelde, yüz ifadelerinin yoğunluk derecesini otomatik olarak kategorize edilmektedir. Bu sistem özellikle dijital öğretmen destek kaynaklarında ve öğretmen performans değerlendirmelerinde kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Sınıflandırma doğruluğunu artırmak için dikkat mekanizması temel yüz bölgelerine yoğunlaşırken, CNN katmanları düşük seviyeli özellikleri öğrenmektedir.

(Chen vd., 2025) derin öğrenmeyi graf analiz yöntemleriyle birleştirerek öğrenciler için çevrimiçi kurs öneri sistemlerini geliştiren yeni bir hibrit model geliştirmişlerdir. Çalışmada, öğrenci-kurs eşleşmelerini daha doğru bir şekilde tahmin edebilen bir sistem geliştirmek için 12.898 öğrenciden alınan akademik ve davranışsal veriler kullanılmıştır. Grafik yapısı üzerinde uygulanan bağlantı tahmin tekniğinde, CNN modeli her öğrencinin benzersiz niteliklerinden önemli desenler çıkarsa da soğuk başlatma (cold start) sorununu başarıyla çözmüştür. Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında uygulanan modelin daha yüksek doğruluğu ve F1 puanı, önerilerin kalitesini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Sosyal ilişkiler ve bireysel tercihlerin kapsamlı bir analizini sunan bu çalışmanın yapısı kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır.

Sonuç olarak, öğrencilerin ve öğretmenlerin yüz ifadelerinin, duygusal tepkilerinin ve davranışsal verilerinin analizi bu başlığın ana odak noktası olmuştur. Özellikle eğitim süreçlerinde CNN ve dikkat mekanizmaları kullanılarak oluşturulan modeller bilişsel-duygusal durumu izlemeyi ve öğrenme sürecini özelleştirmeyi amaçlamaktadır. İnsan-bilgisayar etkileşimi (Human-Computer Interaction, HCI) açısından bu çalışmalar eğitim teknolojilerinde duygusal bir etkileşim katmanı geliştirmeyi amaçladıkları için önemlidir.

İçerik üretimi ve soru çözümü

ANN'ler eğitim alanında içerik üretimi ve soru çözümü süreçlerinde de giderek daha fazla kullanılmaktadır. ANN'ler, sınav sorularını otomatik olarak hazırlama ve ders materyallerini özetleyip metne dönüştürme gibi içerik üretim görevlerinde aktif olarak yer almaktadır. Bu sistemler öğrenci sorularını anlayan ve yanıtlayan yapay zekâ tabanlı soru-cevap sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. ANN'ler özellikle açıklayıcı cevaplar üretmede, kısa cevapları değerlendirmede ve öğrenci-robot etkileşimli rehberlik

sistemlerini kolaylaştırmada etkilidir. Ancak bu teknolojileri etkili bir şekilde kullanmanın veri kalitesi, model şeffaflığı ve etik hususlar gibi sorunları da içeren dezavantajları bulunmaktadır.

(Tomikawa vd., 2024) bir bireyin okuma yeterliliğine uygun zorluk seviyelerinde soru-cevap çiftlerini otomatik olarak üretebilen bir sistem önermişlerdir. Madde Tepki Kuramı (Item Response Theory, IRT) soru zorluğunu değerlendirmek ve bir kişinin yeteneğini ölçmek için kullanılan sistemin temelini oluştururken, zorluk kontrollü cevaba dayalı soru üretimi için T5 modelleri ve zorluk kontrollü cevap çıkarma için Transformatörlerden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri (Bidirectional Encoder Representations From Transformers, BERT) kullanılarak iki aşamalı bir derin öğrenme mimarisi geliştirmişlerdir. IRT'den türetilen zorluk değerleri, eğitim verisi olarak Stanford Soru Cevaplama Seti (Stanford Question Answering Dataset, SQuAD) veri kümesine eklenmiş ve her bir kişinin yeteneğine göre soru üretilmesine olanak tanıyan uyarlanabilir bir soru oluşturma çerçevesi oluşturmuşlardır. Önerilen yöntemin sonuçları ile, önerilen yaklaşımın zorluk derecesini kontrol etme ve özelleştirilmiş sorular oluşturma açısından etkinliğini göstermişlerdir.

(Zhu vd., 2022) kısa cevapların otomatik değerlendirilmesi amacıyla geliştirdikleri modellerinde, modern ve klasik yapay sinir ağı mimarilerini bütünleştiren bir derin öğrenme yaklaşımı sunmuşlardır. Küçük veri kümesi sorununa karşı yüksek kaliteli bağlamsal temsiller elde etmek için, metin çiftlerini BERT modeli kullanılarak dinamik olarak kodlamışlardır. Konumsal bilgi içeren bir kapsül ağı ve Bi-LSTM ağı, BERT çıktılarını daha karmaşık anlamsal temsillere dönüştürmek için paralel olarak uygulayarak çok başlıklı dikkat mekanizması (Multi-Head Attention) kullanarak bu iki bileşenden türetilen küresel ve yerel bağlamları birleştirmişlerdir ve güçlü bir anlamsal temsil üretilmiştir. Ek olarak puanlama işlemini daha esnek ve gerçekçi hale getirmek amacıyla klasik one-hot encoding yerine triple-hot encoding fonksiyonu önerilmiştir. Önerdikleri model ile, veri kümelerinde daha önceki yaklaşımlardan daha iyi performans göstererek derin öğrenmenin pratikliğini kanıtlamışlardır.

(Drori vd., 2022) üniversite düzeyindeki matematik problemlerini çözebilen, açıklayabilen ve yeni problemler üretebilen bir ANN modeli sunmuşlardır. Model, program sentezi (Program Synthesis) ve az örnekle öğrenme (Few-Shot Learning) tekniklerinin kullanılmasıyla çok az sayıda örnekle insan düzeyinde performans sergilemiştir. Sistem yalnızca doğru cevabı üretmekle kalmamış, aynı zamanda çözüm adımlarını anlaşılır biçimde açıklayarak öğretimsel bir rol üstlenmiştir. Ayrıca benzer yapıda matematiksel problemler üreterek içerik oluşturma yeteneği de gösterdiği için geleneksel otomatik değerlendirme sistemlerinin ötesinde bir işlevsellik sunmaktadır. Modelin eğitimde hem öğretim hem değerlendirme açısından kullanılabilirliği test edilmiş ve yüksek doğrulukla çalıştığı görülmüştür. Bu çalışma, yapay zekâ destekli öğrenme ortamlarında hem öğretmenlere yardımcı olacak

açıklayıcı sistemlerin hem de otomatik içerik üretim araçlarının geliştirilebileceğini göstermesi açısından dikkat çekicidir.

Son yıllarda yapılan akademik çalışmalar, ANN'lerin eğitimde hem içerik üretiminde hem de soru çözümünde öğretmenlerin iş yükünü azaltırken öğrencilerin bireysel öğrenme süreçlerine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Eğitim sistemlerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi

Eğitim sistemlerinin geliştirilmesinde ANN'ler öğrenci başarısının artırılması, öğretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve karar destek sistemlerinin oluşturulması gibi pek çok kritik alanda kullanılmaktadır. Eğitim sistemleri yalnızca bireysel öğrenme değil, aynı zamanda kurumsal düzeyde veri analitiği, eğitim politikaları geliştirme ve öğretmen desteği açısından da ANN'lerden yararlanmaktadır.

(Kumar vd., 2023) tarımsal mesleki eğitimlerdeki eğitim kalitesini incelemişlerdir. Çalışmada ANN modelinde geri yayılım algoritması (Back Propagation, BP) kullanarak öğrenci ilgisi, ders içeriği ve öğretmen performansı gibi çok yönlü verilerin analizi yoluyla, eğitim kalitesiyle ilgili puanlar üretmişlerdir. Eğitim verilerinin önceden normalleştirilmesi ağın doğruluğunu artırmıştır. Bulgular, BP sinir ağlarının çok değişkenli eğitim analizlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Model, özellikle kırsal bölgelerde eğitim kalitesinin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesinde uygulanabilir.

(Ren, 2025), makine öğrenimi tekniklerini çevresel faktörlere (öğrenci özellikleri, eğitim ortamı vb.) entegre ederek yapay zeka eğitiminin kalitesini değerlendiren bir model oluşturmuştur. Çalışmada Katmanlı Algılayıcı türünde bir ANN ve eğitim için BP kullanılmıştır. ANN tabanlı modelin tahmin doğruluğu açısından diğer geleneksel tekniklerden daha iyi performans gösterdiği bulgulanmıştır. Bu nedenle, kaynak erişimi, öğrenci etkileşimi ve öğretim tasarımı gibi çevresel faktörlerin eğitim kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir.

(Al-Badawi vd., 2022), çevrimiçi öğrenme yönetim sistemlerinden (LMS) elde edilen verileri kullanarak öğrenci performansını tahmin etmek suretiyle eğitim süreçlerinin etkinliğini değerlendiren bir model önermiştir. Çalışmada, öğrenci etkileşim verilerini (tıklama sayısı, kaynak görüntüleme, forum aktivitesi vb.) analiz etmek için Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) türünde bir Yapay Sinir Ağı (ANN) modeli kullanılmıştır. Geliştirilen MLP tabanlı modelin, Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine, SVM) ve Naive Bayes gibi diğer geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarına kıyasla öğrenci başarısını tahmin etmede daha yüksek bir doğruluk oranı (%92,8) sunduğu bulgulanmıştır. Bu sonuç, öğrencinin dijital öğrenme ortamındaki etkileşim düzeyi ve davranış kalıpları gibi faktörlerin, akademik başarıyı öngörmede ve dolayısıyla eğitim sisteminin öğrenciyi ne ölçüde entegre edebildiğini değerlendirmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Tablo 1'de bu çalışma kapsamında sunulan çalışmaların özeti verilmiştir.

Tablo 1: Eğitim alanında ANN-tabanlı çalışmalara ilişkin literatür özeti.

Grup	Yazar, Yıl	Yöntemler	Sonuçlar
Akademik Performans Tahmini	Olivé vd., 2019	MLP	Farklı ders içeriklerinde dahi genel geçerliliği yüksek bir erken uyarı sistemi sunulmuş ve Moodle gibi platformlara entegre edilebileceğini göstermişlerdir.
	Bernacki vd., 2020	GRU, LSTM	Derin öğrenme modelleri (GRU, LSTM), geleneksel yöntemlere göre daha yüksek doğruluk üreterek STEM öğrencilerinin başarısızlık riskini etkin bir şekilde kategorize etmiştir.
	Rivas vd., 2021	MLP	MLP modeli, öğrenci etkileşiminin başarının anahtarı olduğunu göstermiş ve geleneksel tekniklere göre daha yüksek doğruluk sunarak kişiselleştirilmiş rehberlik programlarına temel oluşturmuştur.
	Giannakas vd., 2021	CNN, MLP	CNN ve MLP kombinasyonu ile ekip tabanlı öğrenme ortamlarında sosyal etkileşim ve katılım verilerini kullanarak ekip performansını erken bir aşamada yüksek doğrulukla tahmin etmiştir.
	Li vd., 2022	LSTM, CNN, MLP	Risk değerlendirmeleri ve erken müdahale sistemleri için teknik temel oluşturarak bireylerin veya grupların öğrenme çıktılarını tahmin etmişlerdir.
	Niu vd., 2023	LSTM, CNN, Autoencoders	Uzun süreli öğrenme davranışlarını ve karmaşık örüntüleri başarıyla yakalayarak dersi bırakma riskini yüksek doğrulukla tahmin etmişlerdir.
Kişiselleştirilmiş Eğitim	Hung vd., 2019	CNN, Transfer Öğrenme	CNN ve transfer öğrenme, öğrenme sırasındaki yüz ifadelerinden öğrencilerin duygusal durumlarını yüksek doğrulukla tanıyarak öğrenme ortamlarının dinamik olarak değiştirilmesine olanak sağlamıştır.
	Zheng vd., 2020	CNN, Dikkat Mekanizması	Dikkat mekanizmalı CNN modeli, öğretmenlerin yüz ifadelerinin yoğunluğunu videolardan otomatik

			olarak kategorize ederek öğretmen performans değerlendirmesi için objektif bir veri sağlamıştır.
	Chen vd., 2025	CNN, Graf Analizi	Graf analizi ve CNN tabanlı hibrit model, öğrenci-kurs eşleşmelerini yüksek doğrulukla tahmin etmiş ve "soğuk başlatma" sorununu çözerek kişiselleştirilmiş önerilerin kalitesini artırmıştır.
İçerik Üretimi ve Soru Çözümü	Zhu vd., 2022	BERT, Bi-LSTM, Kapsül Ağı, Multi-Head Attention	BERT, Bi-LSTM ve Kapsül Ağı'nı birleştiren hibrit model, kısa cevapların anlamsal temsillerini güçlü bir şekilde üreterek otomatik değerlendirmede önceki yaklaşımlardan daha iyi performans göstermiştir.
	Drori vd., 2022	Program Sentezi, Az Örnekle Öğrenme	Model, az sayıda örnekle insan düzeyinde matematik problemleri çözmüş, çözüm adımlarını açıklamış ve yeni problemler üreterek hem öğretim hem de değerlendirme için çok yönlü bir araç olduğunu kanıtlamıştır.
	Tomikawa vd., 2024	T5, BERT, IRT	IRT ile birleştirilen T5 ve BERT modelleri, her öğrencinin okuma yeteneğine uygun zorluk seviyesinde otomatik olarak soru-cevap çiftleri üreterek kişiselleştirilmiş bir test çerçevesi oluşturmuştur.
Eğitim Sistemlerinin Geliştirilmesi	Al-Badawi vd., 2022	MLP (ANN)	MLP modeli, çevrimiçi öğrenme sistemlerindeki etkileşim verilerini kullanarak öğrenci performansını %92,8 doğrulukla tahmin etmiş ve bu verilerin başarıyı öngörmedeki önemini kanıtlamıştır.
	Kumar vd., 2023	ANN, Geri Yayılım (BP)	Geri yayılımlı (BP) ANN modeli, öğrenci ilgisi ve öğretmen performansı gibi çok yönlü verileri analiz ederek tarımsal mesleki eğitimin kalitesini değerlendirmede güvenilir sonuçlar vermiştir.
	Ren, 2025	ANN (MLP türü), Geri Yayılım (BP)	ANN tabanlı model, kaynak erişimi ve öğrenci etkileşimi gibi çevresel faktörlerin eğitim kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmede geleneksel tekniklerden daha yüksek tahmin doğruluğu göstermiştir.

SONUÇ

ANN'ler eğitim alanında sağladığı bir dizi avantaj nedeniyle son beş yıl içinde yapılan çalışmalarda giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. İncelenen çalışmalara göre ANN'ler yalnızca akademik performansı tahmin etmek için değil; aynı zamanda kişiselleştirilmiş öğrenme ortamları oluşturmak, otomatik olarak içerik üretmek, duygusal durumları analiz etmek ve eğitim sistemlerini genel olarak değerlendirmek için de kullanılabilmektedir. Bireysel öğrenme deneyimlerini izlemek ve sistem düzeyinde karar destek sistemleri oluşturmak için özellikle etkili yapılar MLP, CNN, LSTM, GRU BERT ve grafik tabanlı modellerdir. Derin öğrenme modelleri, doğruluk, kesinlik ve öngörücü performans açısından geleneksel tekniklerden daha iyi performans gösterdikleri için erken müdahale sistemlerinin, kişiselleştirilmiş öneri sistemlerinin ve öğretim kalitesini ölçen yapay zeka çözümlerinin teknik temelidir. Bu inceleme, eğitim alanında ANN kullanan araştırmacılar için metodik bir bakış açısı sunmakta ve ANN'nin eğitim teknolojilerindeki çeşitli uygulamalarını tematik olarak kategorize etmektedir.

REFERANSLAR

Ai, X., Sheng, V., Fang, W., Ling, C. ve Li, C. (2020). Ensemble learning with attention-integrated convolutional recurrent neural network for imbalanced speech emotion recognition. IEEE Access, 8, 199909-199919.

Al-Badawi, A., Al-Raisi, S. ve Al-ismaili, M. (2022). Predicting student performance in online learning using machine learning models. *IEEE Access*, *10*, 43831-43844. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169109

Alsabhan, W. (2023). Student cheating detection in higher education by Implementing Machine Learning and LSTM techniques. *Sensors*, *23*(8), 4149

Bernacki, M. L., Chavez, M. M. ve Uesbeck, P. M. (2020). Predicting achievement and providing support before STEM majors begin to fail. Computers & Education, 158, 103999.

Chen, X., Wang, X., Wang, Y., Liu, D. ve Zhang, W. (2025). Leveraging deep learning and graph analysis for enhanced course recommendations in online education. Scientific Reports, 15(18623).

Contreras, L. F. H., Cui, J., Yu, L., Huang, Z., Nikpour, A. ve Kavehei, O. (2024). Kan-eeg: towards replacing backbone-mlp for an effective seizure detection system.

Drori, I., Zhang, S., Shuttleworth, R., Tang, L., Lu, A., Ke, E., ... ve Strang, G. (2022). A neural network solves, explains, and generates university math problems by program synthesis and few-shot learning at human level. Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(32), e2123433119.

Elansari, T., Ouanan, M. ve Bourray, H. (2023). Modeling of multilayer perceptron neural network hyperparameter optimization and training.

Giannakas, F., Troussas, C., Voyiatzis, I. ve Sgouropoulou, C. (2021). A deep learning classification framework for early prediction of team-based academic performance. Applied Soft Computing, 106, 107355.

Goodfellow, I., Bengio, Y. ve Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Gutowski, T., Antkiewicz, R. ve Szlufik, S. (2023). Machine learning with optimization to create medicine intake schedules for parkinson's disease patients. Plos One, 18(10), e0293123.

Hindarto, D. (2023). Comparison of rnn architectures and non-rnn architectures in sentiment analysis. Sinkron, 8(4), 2537-2546.

Huang, J., Li, G. ve Li, G. (2024). Research on sentiment recognition in online shopping reviews using an integrated bert and bilstm approach. 4th International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2024), 103. https://doi.org/10.1117/12.3035076

Hung, J. C., Lin, K. C. ve Lai, N. X. (2019). Recognizing learning emotion based on convolutional neural networks and transfer learning. Applied Soft Computing, 84, 105724.

Kumar, M. G. V., N, V., Čepová, L., Raja, M. A. M., Balaram, A. ve Elangovan, M. (2023). Evaluation of the quality of practical teaching of agricultural higher vocational courses based on BP neural network. Applied Sciences, 13(2), 1180.

Li, J. (2025). Entrepreneurial Skill Augmented Neural Network (ESANN): A Deep Learning Approach for Enhancing Entrepreneurial Competencies in Teachers. International Journal of Computational Intelligence Systems, 18(1), 1-21.

Li, M., Wang, X., Wang, Y., Chen, Y. ve Chen, Y. (2022). Study-GNN: a novel pipeline for student performance prediction based on multi-topology graph neural networks. *Sustainability*, *14*(13), 7965.

Nakagawa, H., Iwasawa, Y. ve Matsuo, Y. (2019, October). Graph-based knowledge tracing: modeling student proficiency using graph neural network. In *IEEE/WIC/aCM international conference on web intelligence* (pp. 156-163).

Niu, K., Lu, G., Peng, X., Zhou, Y., Zeng, J. ve Zhang, K. (2023). CNN autoencoders and LSTM-based reduced order model for student dropout prediction. Neural Computing and Applications, 35(30), 22341-22357.

Obeta, S., Grisan, E. ve Kalu, C. (2023). A comparative study of long short-term memory and gated recurrent unit. JAIMLD, 1(1), 01-09.

Olive, D. M., Huynh, D. Q., Reynolds, M., Dougiamas, M. ve Wiese, D. (2019). A quest for a one-size-fits-all neural network: early prediction of students at risk in online courses. IEEE Transactions on Learning Technologies, 12(2), 171-183.

Qiu, H. ve Shi, C. (2023). Lm-unet: lateral mlp augmented u-net for medical image segmentation.. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3082767/v1

Ren, X. (2025). A hybrid model combining environmental analysis and machine learning for predicting AI education quality. *Scientific Reports*, *15*(1), 12577.

Ren, R., Su, J., Yang, B., Lau, R. Y. ve Liu, Q. (2022). Novel low-power construction of chaotic s-box in multilayer perceptron. Entropy, 24(11), 1552. https://doi.org/10.3390/e24111552

Rivas, A., Gonzalez-Briones, A., Hernandez, G., Prieto, J. ve Chamoso, P. (2021). Artificial neural network analysis of the academic performance of students in virtual learning environments. Neurocomputing, 423, 713-720.

Tao, Y., Wang, X., Sánchez, R., Yang, S. ve Bai, Y. (2019). Spur gear fault diagnosis using a multilayer gated recurrent unit approach with vibration signal. Ieee Access, 7, 56880-56889.

Tomikawa, Y., Suzuki, A. ve Uto, M. (2024). Adaptive Question–Answer Generation with Difficulty Control Using Item Response Theory and Pre-trained Transformer Models. IEEE Transactions on Learning Technologies.

Zheng, K., Yang, D., Liu, J. ve Cui, J. (2020). Recognition of teachers' facial expression intensity based on convolutional neural network and attention mechanism. IEEE access, 8, 226437-226444.

Zhu, X., Wu, H. ve Zhang, L. (2022). Automatic short-answer grading via BERT-based deep neural networks. IEEE Transactions on Learning Technologies, 15(3), 364-375.

Tahminden Eyleme: Enerji Yönetim Sistemlerinde Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Uygulamaları

Gizen MUTLU[1]

1- Arş. Gör.; Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. gmutlu@mersin.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7553-2077

ÖZET

Küresel enerji sektörü, artan talep, yenilenebilir kaynakların entegrasyonu ve sürdürülebilirlik hedeflerinin getirdiği baskılarla köklü bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel enerji yönetim yöntemlerinin bu yeni ve karmaşık ekosistemde yetersiz kalması, Makine Öğrenimi (MÖ) ve Derin Öğrenme (DÖ) gibi veri odaklı teknolojilerin benimsenmesini zorunlu kılmıştır. Bu çalışma, MÖ'nün enerji yönetimindeki dönüştürücü rolünü; temel yöntemleri, pratik uygulamaları ve gelecek perspektiflerini kapsayacak şekilde bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Bölümde ilk olarak, Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri, K-En Yakın Komşu ve Uzun Kısa Vadeli Bellek gibi temel MÖ/DÖ algoritmalarının teorik altyapıları ve enerji sistemlerindeki kullanım amaçları açıklanmaktadır. Ardından, güncel literatürden seçilmiş vaka çalışmaları aracılığıyla bu tekniklerin; elektrik fiyatı tahmini, akıllı şebeke operasyonları, yenilenebilir enerji üretim öngörüsü ve anomali tespiti gibi kritik alanlardaki somut başarıları ve performans metrikleri incelenmektedir. Çalışma ayrıca, MÖ uygulamalarının önündeki en büyük engeller olan veri kalitesi sorunları, ölçeklenebilirlik, model açıklanabilirliği ve enerji adaleti gibi etik kaygıları da detaylı bir şekilde tartışmaktadır. Sonuç olarak bu bölüm, MÖ'nün enerji sistemlerinde yarattığı paradigma değişimini sergilerken, bu teknolojinin sürdürülebilir ve adil bir enerji geleceği inşa etmedeki rolünü tam olarak yerine getirebilmesi için fiziksel model entegrasyonu, algoritmik şeffaflık ve etik veri yönetimi gibi alanlarda atılması gereken adımları aydınlatmaktadır.

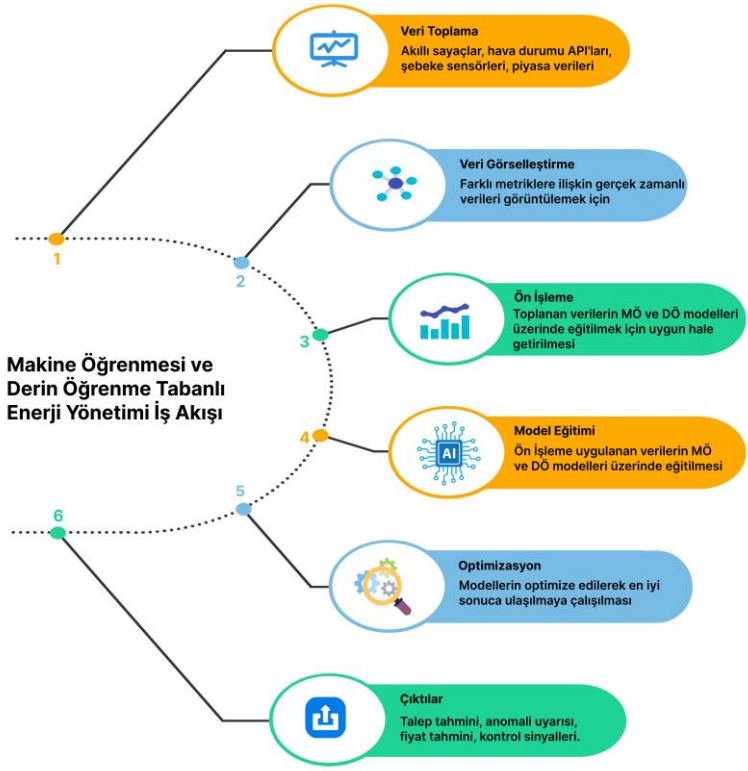
Anahtar Kelimeler – Derin Öğrenme, Makine Öğrenmesi, Enerji Yönetim Sistemleri, Yapay Zeka.

GİRİŞ

Küresel enerji altyapısı, artan talep, yenilenebilir kaynakların değişken doğası ve sürdürülebilirlik hedeflerinin getirdiği baskılar nedeniyle benzeri görülmemiş bir operasyonel karmaşıklıkla karşı karşıyadır. Bu sistemlerin istikrarı, ulusal ekonomiler ve toplumsal refah için kritik öneme sahip olup, büyük ölçekli kesintiler (blackout) gibi sistemik arızalar, altyapının mevcut zorluklar karşısındaki kırılganlığını ortaya koymaktadır. Örneğin, 31 Mart 2015'te Türkiye genelinde yaşanan kapsamlı elektrik kesintisi, şebeke yönetimindeki dinamik dengesizliklerin ve kontrol mekanizmalarının yetersizliğinin yol açabileceği zincirleme etkileri somut bir şekilde göstermiştir. Bu olay, geleneksel enerji yönetim paradigmalarının, günümüzün yüksek değişkenliğe sahip enerji ekosistemini etkin bir şekilde yönetmek için yetersiz kaldığının altını çizmektedir. Dolayısıyla, bu karmaşıklığı yönetebilecek ve sistemin direncini

artırabilecek gelişmiş analitik yaklaşımlara duyulan ihtiyaç aciliyet kazanmıştır.

Yakın zamana kadar enerji yönetimi, büyük ölçüde geçmiş tecrübelere dayalı manuel müdahaleler ve ARIMA gibi klasik istatistiksel modellerle yürütülmekteydi. Operatörler, talebi karşılamak için genellikle reaktif kararlar alır ve sistemdeki verimsizlikleri veya potansiyel arızaları tespit etmek için sınırlı araçlara sahipti. Ancak günümüzün değişken enerji manzarası, bu geleneksel yaklaşımların öngörü ve esneklik kapasitesini aşmaktadır. Geleneksel teknikler, artık bu karmaşıklıkları yönetmede yetersiz kalmakta, bu da ileri analitik araçların benimsenmesini kaçınılmaz kılmaktadır. İşte bu yeni ve karmaşık denklemde, Makine Öğrenimi (MÖ) ve Derin Öğrenme (DÖ) teknikleri, devrim niteliğinde bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Şekil 1 enerji yönetim sistemlerinde makine öğrenmesi (MÖ) ve derin öğrenme (DÖ) modellerinin geliştirilmesi ve uygulanması için izlenen temel iş akışını göstermektedir. Süreç, altı ana adımdan oluşmaktadır:



Şekil 1: Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Tabanlı Enerji Yönetimi İş Akışı

- Veri Toplama: Akıllı sayaçlar, şebeke sensörleri, hava durumu API'ları ve piyasa verileri gibi çeşitli kaynaklardan ham enerji verilerinin toplanması.
- Veri Görselleştirme: Toplanan verilerdeki eğilimleri, anormallikleri ve ilişkileri anlamak amacıyla farklı metriklere ilişkin gerçek zamanlı görselleştirmelerin yapılması.
- Ön İşleme: Ham verilerin eksik değer giderme, normalizasyon ve özellik mühendisliği gibi tekniklerle MÖ/DÖ modelleri için uygun hale getirilmesi.
- Model Eğitimi: Ön işlemden geçmiş veriler kullanılarak, enerji sisteminin davranışını modellemek üzere MÖ ve DÖ algoritmalarının eğitilmesi.
- Optimizasyon: Eğitilen modellerin performansını en üst düzeye çıkarmak için hiperparametre ayarlaması gibi optimizasyon tekniklerinin uygulanması.
- Çıktılar: Optimize edilmiş modellerin, talep tahmini, anomali tespiti, fiyat öngörüsü ve şebeke için kontrol sinyalleri gibi eyleme geçirilebilir çıktılar üretmesi.

Bu döngüsel ve bütüncül yaklaşım, ham veriden yola çıkarak enerji sistemlerinin daha akıllı, verimli ve otonom bir şekilde yönetilmesinn temelini oluşturur.

Devasa veri kümelerini işleyebilen, gizli kalıpları ve korelasyonları ortaya çıkarabilen ve geleceğe yönelik isabetli tahminler üretebilen bu algoritmalar, enerji yönetiminde bir paradigma değişimi yaratmaktadır (Yao ve diğerleri, 2023). Enerji Yönetim Sistemleri'nin (EYS) beyni olarak görev yapan MÖ modelleri, enerji kullanımını anlık olarak izlemek, tüketim ve üretim trendlerini öngörmek, ekipman arızaları veya siber saldırılar gibi anomalileri saniyeler içinde tespit etmek ve operasyonları optimize etmek gibi kritik işlevleri otonom bir şekilde yerine getirir (Akram ve diğerleri, 2024). Bu teknolojinin en güçlü uygulama alanlarından ikisi, anomali tespiti ve zaman serisi tahminlemesidir. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) gibi gelişmiş modeller, bir yandan normal enerji tüketim desenlerini öğrenerek en ufak sapmaları bile potansiyel bir sorun olarak işaretleyebilirken (Kardi ve diğerleri, 2021); diğer yandan hava durumu ve piyasa koşulları gibi değişkenleri analize dahil ederek gelecekteki enerji talebini veya yenilenebilir enerji üretimini yüksek doğrulukla tahmin edebilir (Franović ve diğerleri, 2023). Anomali tespiti reaktif bakımı proaktif bir stratejiye dönüştürürken, doğru tahminleme de arz-talep dengesini sağlayarak şebeke istikrarını güvence altına alır. Bu iki yeteneğin sinerjisi, enerji sistemlerinin daha akıllı, daha güvenilir ve nihayetinde daha sürdürülebilir bir yapıya evrilmesinin temelini oluşturur.

EYS enerji verimliliği, maliyet azaltma ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır. EYS'ler, enerji kullanımını izlemek, tüketim modellerini tahmin etmek, anormallikleri tespit

etmek ve operasyonları optimize etmek gibi kritik işlevleri yerine getirir. MÖ algoritmaları, bu gelişmiş yeteneklerin temelini oluşturmakta ve geçmiş ile gerçek zamanlı verilerin analiz edilmesini sağlayarak bilinçli karar alma süreçlerini desteklemektedir (Akram ve diğerleri, 2024).

Bir diğer yandan, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, değişkenlikleri ve kesintili yapıları nedeniyle enerji sistemlerine daha fazla karmaşıklık katmaktadır. MÖ modelleri, doğru üretim tahminleri sağlayarak ve dinamik şebeke ayarlamalarını kolaylaştırarak bu zorlukların üstesinden gelmektedir. Örneğin, MÖ teknikleri, şebekelerin istikrarını sağlamada ve yenilenebilir enerjinin entegrasyonunu artırarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmada başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Gülmez & Selçuklu, 2024).

Bu çalışma, EYS'yi temel alarak anomali tespiti, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, akıllı şebekeler ve elektrik fiyat tahmini gibi konuları ele almaktadır. Bu alanlarda yapılan güncel çalışmalar ve kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde incelenerek, enerji sistemlerinin verimliliğini, güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik yaklaşımlar tartışılmaktadır. Bu doğrultuda okuyucuya net bir yol haritası sunulacaktır:

İlk olarak, Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri ve Uzun Kısa Vadeli Bellek Ağları gibi enerji yönetiminde sıkça kullanılan temel MÖ ve DÖ yöntemleri teorik altyapılarıyla açıklanacaktır. Ardından, elektrik fiyat tahmini, akıllı şebeke yönetimi, anomali tespiti ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi kritik alanlarda gerçekleştirilmiş güncel ve etkili akademik çalışmalar vaka analizleri şeklinde incelenecektir. Son olarak, bu teknolojilerin potansiyeli, karşılaşılan zorluklar ve gelecekteki araştırma yönelimleri tartışılarak bölüm sonlandırılacaktır.

MAKİNE ÖĞRENMESİ VE DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ

Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Karar Ağaçları (Decision Tree, DT), denetimli öğrenme yaklaşımları arasında yer alır ve sınıflandırma ile regresyon problemlerini çözmek için kullanılır. Bir karar ağacı, özellikler hakkında ardışık sorular sorarak veriyi sınıflandırır. Bu süreç, bir hiyerarşi oluşturur ve ağaç yapısı şeklinde kodlanır. Karar ağaçları, veriyi anlamlı bir şekilde işleyerek basit sorular aracılığıyla sınıflandırma yapmaları nedeniyle diğer yöntemlere kıyasla bazı avantajlar sunar (Safavian ve Landgrebe, 1991). EYS'de DT modelleri,

tüketim kalıplarını analiz etmek ve enerji israfına neden olan faktörleri belirlemek için kullanılabilir.

K-en yakın komşu (K-Nearest Neighbor, KNN), hem regresyon hem de sınıflandırma görevleri için kullanılan bir diğer denetimli öğrenme tekniğidir (Imandoust ve Bolandraftar, 2013). KNN, tembel öğrenme veya örnek tabanlı öğrenme prensibini takip eder. Yani, model eğitim aşamasında genelleme yapmaz; bunun yerine, eğitim kümesi gelecekteki tahminler için saklanır. Daha sonra, etiketlenmemiş test verisi için tahminler, en yakın komşularına (veri noktalarının Öklid mesafesine göre belirlenen komşuları) dayalı olarak yapılır. Burada dikkate alınacak komşu sayısı (K), belirli bir uygulamaya göre ayarlanması gereken bir hiperparametredir. Enerji yönetiminde KNN algoritması, geçmiş tüketim verilerine dayanarak benzer koşullarda gelecekteki enerji talebini tahmin etmek için kullanılabilir.

Destek Vektör Makineleri (SVM), sınıflandırma ve regresyon görevleri için kullanılan çekirdek (kernel) tabanlı bir makine öğrenmesi tekniğidir (Cortes ve Vapnik, 1995). Güçlü teorik temelleri ile iyi genelleme yetenekleri sayesinde en yaygın kullanılan denetimli öğrenme yöntemlerinden biri haline gelmiştir. SVM, eğitim verisindeki farklı sınıfları birbirinden ayıran ve aralarındaki mesafeyi (marjı) en büyük seviyeye çıkarmayı hedefleyen bir yüzey (hiper düzlem) belirleyerek çalışır (Burger, 1998). EYS'de SVM, anomali tespiti yaparak şebeke üzerinde olağan dışı enerji kullanımlarını belirlemek için uygulanabilir.

Topluluk Öğrenme (Ensemble Learning), çeşitli temel modelleri bir araya getirerek daha güçlü ve genelleştirilebilir bir model oluşturmayı amaçlayan bir makine öğrenmesi tekniğidir.

Rastgele Ormanlar (Random Forests, RF), belirli sayıda karar ağacından oluşan bir topluluktur (Breiman, 2001). RF algoritmaları, yorumlanabilir olmaları ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) önleme yetenekleri nedeniyle son yıllarda daha yaygın hale gelmiştir. Rastgele orman modellerinin eğitilmeden önce belirlenmesi gereken üç temel hiperparametresi vardır: düğüm boyutu, ağaç sayısı ve örneklenen özellik sayısı. Rastgele orman sınıflandırıcıları hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerini çözmek için kullanılabilir. Enerji yönetimi bağlamında RF, farklı enerji kaynaklarının verimli kullanımını sağlamak ve değişken enerji talebine göre en uygun stratejileri belirlemek için kullanılabilir.

Derin Öğrenme Yöntemleri

Uzun Kısa Vadeli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) ağları, ardışık verilerdeki bağımlılıkları etkili bir şekilde yakalamak için tasarlanmış bir tür Tekrarlayan Sinir Ağı'dır (Recurrent, Neural Networks, RNN). Geleneksel RNN'lerin kaybolan veya patlayan eğim sorunlarını aşmak için, LSTM'ler bilgi akışını kontrol eden kapılı bir mimari kullanır. Bu mimari, unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Unutma kapısı, önceki durumun hangi kısımlarının atılacağını

belirlerken, giriş kapısı yeni bilgilerin eklenmesini düzenler ve çıkış kapısı mevcut adımdaki çıktıyı filtreler. LSTM, özellikle EYS'de, enerji talebi ve üretimi gibi zaman serisi verilerinin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır, çünkü bu model, geçmiş ve mevcut veri arasındaki bağıntıları doğru şekilde öğrenerek gelecekteki enerji talebini tahmin edebilir (Nam vd., 2020; Zhang ve Fleyeh, 2020).

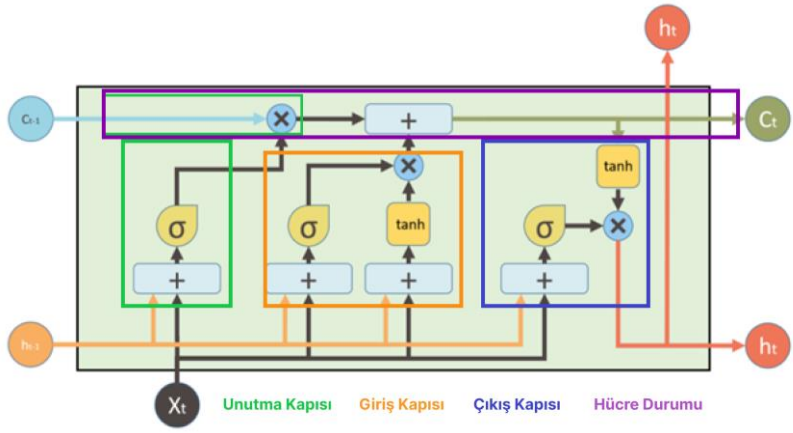
LSTM'ler bellek hücresi ve kapı olmak üzere üç ana bileşenden oluşur: unutma kapısı, giriş kapısı ve çıkış kapısı. Bu öğeler bilgi akışını dinamik olarak yönetmek için birlikte çalışır:

• Unutma Kapısı: Önceki durumun hangi kısımlarının atılması gerektiğini belirler. Sigmoid aktivasyon fonksiyonunu kullanarak 0 (tamamen unut) ile 1 (tutarak) arasında bir değer çıktısı verir.

• Giriş Kapısı: Hücre durumuna yeni bilgilerin eklenmesini kontrol eder, sigmoid aktivasyon değerleri seçer ve tanh aktivasyonu yeni aday değerler üretir.

• Çıkış Kapısı: Mevcut adım için ilgili çıktıyı belirlemek üzere hücre durumunu sigmoid-tanh kombinasyonundan filtreleyerek çıktıyı üretir.

Bu kapılı mimari, LSTM'lerin zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları verimli bir şekilde modellemesini sağlar (Zhang & Fleyeh, 2020). LSTM mimarisi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: LSTM Mimarisi

LSTM ve RNN ile enerji yönteminde uygulamalar aşağıdaki gibi gruplandırılabilmektedir:

a. Enerji Talebi Tahmini: LSTM'ler, geçmiş tüketim verilerini analiz ederek enerji talebini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır. Bu modeller, kamu hizmetlerinin kaynak tahsisini optimize etmesini ve maliyetleri düşürmesini sağlayarak arz ve talebi dengelemede önemli avantajlar sağlar (Nguyen vd., 2021).

b. Yenilenebilir Enerji Çıktı Tahmini: Hava durumu verilerini geçmiş üretim kayıtlarıyla entegre ederek, LSTM'ler güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çıktısını doğru bir şekilde tahmin eder. Bu yetenek, yenilenebilir enerjinin değişkenliği arasında şebeke istikrarını korumak için önemlidir (Wang vd., 2023).

c. Zaman Serisi Verilerinde Anomali Algılama: LSTM'ler, tipik tüketim modellerini öğrenerek ve enerji kullanımındaki ani artışlar veya düşüşler gibi sapmaları belirleyerek enerji sistemlerindeki anomalileri tespit edebilir. Bu işlevsellik, arıza tespiti ve endüstriyel ve şebeke düzeyindeki enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir (Kaymakci vd., 2021).

d. Enerji Fiyat Tahmini: LSTM modelleri, gelecekteki enerji fiyatlarını tahmin etmek için piyasa eğilimlerini ve geçmiş fiyatlandırma verilerini analiz eder. Bu uygulama, paydaşların enerji ticareti piyasalarında bilinçli kararlar almalarını destekler (Ergen & Kozat, 2019).

LİTERATÜR TARAMASI

Küresel enerji talebinin artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun zorunlu hale gelmesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından tüketimin optimize edilmesine yönelik acil ihtiyaçlar, enerji yönetimini giderek daha kritik bir öneme sahip hale getirmiştir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için MÖ dönüştürücü bir araç olarak öne çıkmıştır. MÖ, enerji yönetiminde akıllı ve öngörücü sistemlerin geliştirilmesini mümkün kılarak hem verimliliği artırmak hem de kaynakları daha sürdürülebilir bir şekilde kullanmak için yeni fırsatlar sunmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar, MÖ ‘nün akıllı evlerde enerji tüketimini optimize etme, dağıtılmış enerji sistemlerini daha etkin bir şekilde yönetme ve endüstriyel uygulamalarda israfı azaltma gibi çeşitli alanlarda kayda değer başarılar elde ettiğini göstermiştir. Bu gelişmeler, enerji yönetiminde daha akıllı, uyumlu ve çevreye duyarlı çözümler sunarak modern enerji sistemlerinin geleceğini şekillendirmede büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Elektrik Fiyatı Tahmini Alanındaki Çalışmalar

Kılıç vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, Batı Danimarka DK1 şebeke bölgesi için elektrik fiyatı tahmini problemi ele alınmıştır.

Ocak-Nisan 2019 dönemine ait, rüzgâr/güneş üretimi, tüketim ve piyasa fiyatlarını içeren çok boyutlu saatlik veriler üzerinde Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modeli uygulanmıştır. Modelin performansı, 8,41 RMSE ve 0,81 R^2 değerleri ile değerlendirilmiş ve Aşırı Gradyan Artırma (XGB), Random Forest, SARIMA gibi kıyaslama modellerini geride bıraktığı raporlanmıştır. Çalışmanın pratik bir uygulaması olarak, model tahminleri kullanılarak gün öncesi ve gün içi piyasalar arasındaki fiyat farklarından faydalanan bir ticaret stratejisi geliştirilmiştir. Bu stratejinin, %28'lik hata payına rağmen yaklaşık 35,9 milyon avroluk bir kâr (%60 optimum) ürettiği gösterilmiştir. Sonuçlar, LSTM'in dinamik piyasa koşullarına uyum sağlama potansiyelini vurgularken, yazarlar gelecekteki çalışmalar için hibrit modellerin ve genişletilmiş veri setlerinin kullanımını önermişlerdir.

Zhang vd. (2018), Alman gün öncesi elektrik piyasasında fiyat tahmini için modüler bir derin öğrenme yaklaşımı geliştirmiştir. Çalışmada, EPEX SPOT pazarından alınan 10 yıllık (88.704 saatlik) ve yenilenebilir üretim ile hava durumu verileriyle zenginleştirilmiş bir veri kümesi analiz edilmiştir. Önerilen metodoloji, üç entegre alt modelden müteşekkildir: Fiyat tahminleri için bir Konvolüsyonel Sinir Ağlar (CNN)-LSTM zaman serisi modeli, yenilenebilir üretim tahmini için bir CNN modeli ve bu çıktıları yük tahminleriyle birleştiren bir Gradient Boosting Regressor tabanlı hibrit model. Bu kompozit yapı, geleneksel ARIMA modellerinin (MAE: 4,33–4,51 €/MWh) performansını önemli ölçüde aşarak 3,74 €/MWh'lik bir Ortalama Mutlak Hata (MAE) skoruna ulaşmıştır. Bu sonuçlar, modüler yaklaşımların karmaşık piyasa dinamiklerini, özellikle de zamansal ve mevsimsel desenleri yakalamadaki etkinliğini ortaya koymaktadır. Yazarlar, gelecek araştırma yönelimleri olarak modele ek coğrafi verilerin eklenmesini ve topluluk öğrenme tekniklerinin uygulanmasını önermişlerdir.

Derin öğrenme modellerinin hiperparametre optimizasyonu üzerine odaklanan bir çalışmada, Gülmez ve Selçuklu (2024) elektrik fiyat tahmini için Yapay Tavşan Optimizasyonu (ARO) ile entegre bir derin LSTM ağı geliştirmiştir. 2015-2022 dönemine ait saatlik piyasa ve meteoroloji verilerini içeren kapsamlı bir veri setini analiz eden araştırmacılar, ARO ile optimize edilen modelin yedi günlük tahmin penceresinde 0,885'lik bir R^2 skoruna ulaştığını raporlamıştır. Bu sonuç, LSTM-GA (R^2: 0,719) ve geleneksel ANN gibi alternatif modellerden daha yüksek bir performans sergilemiştir. Ayrıca, SHapley Eklemeli Açıklamalar (SHAP) analizi uygulanarak modelin yorumlanabilirliği artırılmış; yakın fiyat geçmişi, işlem hacmi ve doğal gaz fiyatlarının en etkili girdi değişkenleri olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, optimizasyon algoritmalarının derin öğrenme ile entegrasyonunun hem tahmin doğruluğunu hem de model şeffaflığını artırarak daha bilinçli piyasa kararları için bir çerçeve sunduğunu göstermektedir.

Akıllı Şebeke Alanındaki Çalışmalar

Akıllı şebekelerde dağıtım güvenilirliğini artırmaya yönelik bir çalışmada, Lakshmanarao vd. (2024) makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerini birleştiren yenilikçi bir füzyon tabanlı kararlılık tahmin sistemi geliştirmiştir. Araştırmada, UCI makine öğrenmesi deposundan temin edilen ve güç kullanımı, fiyat esnekliği gibi 12 farklı özelliği içeren 10.000 örneklik bir veri seti kullanılmıştır. Ön işleme adımlarını takiben, SVM, LR, DT ve RF gibi çeşitli sınıflandırma algoritmaları uygulanmış ve bunlar arasında %97,8'lik doğruluk oranı ile SVM en iyi performansı göstermiştir. Bu temel modellerin performansını daha da ileriye taşımak amacıyla, ANN'nin özellik çıkarma kabiliyeti ile SVM'nin güçlü sınıflandırma yeteneğini bir araya getiren yeni bir füzyon (topluluk) modeli önerilmiştir. Geliştirilen bu hibrit model, %98,9 gibi etkileyici bir doğruluk oranına ulaşarak hem tekil MÖ modellerini hem de temel ANN yapısını geride bırakmıştır. Ayrıca, füzyon modelinin kesinlik, geri çağırma ve F1-puanı metriklerinde de üstün sonuçlar vermesi, önerilen yaklaşımın akıllı şebeke kararlılığı tahmininde yüksek etkinlik ve sağlamlık sergilediğini kanıtlamıştır.

Merkezi olmayan akıllı şebekelerin kararlılık analizi üzerine odaklanan bir çalışmada, Franović ve diğerleri (2023), temel sistem parametrelerinden yola çıkarak kararlılık durumlarını tahmin etmek için gelişmiş makine öğrenimi tekniklerini kullanmışlardır. Araştırma, Merkezi Olmayan Akıllı Şebeke Kontrolü (DSGC) simülasyon modelinden türetilen ve güç çıkışı, fiyat esnekliği, şebeke katılımcısı tepki süresi gibi kritik değişkenleri içeren 30.000 örneklik bir veri kümesi üzerinde yürütülmüştür. Çalışmada kararlılık problemi, hem bir sınıflandırma görevi (sistemin kararlı/kararsız olarak etiketlenmesi) hem de bir regresyon görevi (sayısal kararlılık değerinin tahmin edilmesi) olarak iki farklı açıdan ele alınmıştır. Bu çift yönlü problemi çözmek amacıyla Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), XGB, SVM ve Genetik Programlama (GP) olmak üzere dört farklı algoritmanın performansı karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonucunda, XGB algoritması her iki görevde de en üstün performansı sergilemiş; sınıflandırma için 0,99 F1-puanı ve regresyon için 0,98 R^2 gibi oldukça yüksek skorlar elde etmiştir. MLP'nin de XGB'ye yakın bir performans gösterdiği, SVM'nin orta düzeyde, GP'nin ise sınırlı bir başarı sağladığı raporlanmıştır. Ayrıca, tepki süresi gibi düşük korelasyonlu özelliklerin çıkarılmasının performansı olumsuz etkilemediği gözlemlenerek veri setinin sağlamlığı teyit edilmiştir. Modellerin performansını en üst düzeye çıkarmak için çapraz doğrulama ile desteklenen rastgele hiperparametre arama (random search) tekniği kullanılarak XGB ve MLP modelleri için optimal parametreler belirlenmiştir.

Mali ve diğerleri (2020), akıllı şebekelerde (SG) enerji tüketim tahminini, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve makine öğrenimi (MÖ) teknolojilerini entegre eden kapsamlı bir çerçeve aracılığıyla ele almışlardır. Çalışma, Dayton Power and Light Company'ye (DPLC) ait 10 yıllık (2004–

2018) saatlik tüketim verileri üzerinde yürütülmüş; veriler anomali giderme ve normalizasyon gibi ön işleme adımlarından geçirilmiştir. Kısa vadeli tahmin performansı için Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modelleri karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmesinde, LSTM modeli 0,9553'lük bir Belirlilik Katsayısı (R^2) ile RNN modelini (R^2: 0,9541) marjinal bir üstünlükle geride bırakmış, bu da LSTM'in zamansal bağımlılıkları modellemedeki daha yüksek kapasitesini teyit etmiştir. Deneysel analizin yanı sıra, çalışma teorik bir katkı olarak akıllı şebekeler için beş katmanlı bir sistem mimarisi önermiştir: 1) IoT (veri toplama), 2) Elektrik (enerji iletimi), 3) İletişim (ağ bağlantısı), 4) Bilgi (veri depolama ve işleme) ve 5) Yapay Zekâ (tahmin ve karar alma). Bu mimari, akıllı sayaçlar gibi IoT cihazlarından gelen gerçek zamanlı verilerin, en üst katmandaki yapay zekâ modelleri tarafından dinamik tahminler üretmek için sistematik bir şekilde kullanılmasını sağlayarak bütüncül bir vizyon sunmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, IoT ve MÖ teknolojileri arasındaki sinerjinin geleneksel güç şebekelerini akıllı ve adaptif sistemlere dönüştürmedeki merkezi rolünü vurgulamakta ve gelecekteki performans artışları için hibrit modeller ile ek girdi değişkenlerinin (örneğin, hava durumu verileri) potansiyeline işaret etmektedir.

Akıllı Enerji Yönetimi Alanındaki Çalışmalar

Akram vd. (2024), kullanıcı konforunu korurken enerji tüketimini optimize etmek için ML'den yararlanan akıllı şehirler için özel olarak tasarlanmış bir Akıllı Enerji Yönetim Sistemi (IEMS) tanıttı. Çalışmada, yerleşim alanlarındaki çeşitli enerji tüketim modellerini temsil eden 757 kayıttan oluşan bir veri seti kullanıldı. Veriler gürültüyü gidermek, normalleştirmek ve eğitim (%70) ve doğrulama (%30) setlerine ayırmak için yeniden işlendi. Önerilen sistem, sınıflandırma ve tahmin için bir Destek Vektör Makinesi (SVM) algoritması kullandı. SVM'nin modelleri belirleme ve yüksek boyutlu verileri sınıflandırma yeteneği, yüksek doğruluk ve güvenilirlik elde etmede etkili oldu. Sistem, doğrulama sırasında yalnızca %7,89'luk bir ıskalama oranıyla %92,11'lik dikkate değer bir doğruluk elde etti. Duyarlılık (%92,71) ve özgüllük (%91,67) gibi diğer ölçümler, modelin sağlamlığını doğruladı. Sonuçlar, Karar Ağacı Regresyonu ve Doğrusal Regresyon modelleri dahil olmak üzere önceki yaklaşımlarla kıyaslandı ve önemli iyileştirmeler gösterildi. Yeni bir Enerji İnterneti (IoE) tabanlı mimari, gerçek zamanlı veri toplama, ön işleme ve model eğitimini kolaylaştırarak büyük akıllı şehir uygulamaları için ölçeklenebilirliği garanti altına aldı.

Hakawati vd. (2024), Filistin'in Batı Şeria bölgesindeki konut binalarında ikamet edenlerin bilgisi, davranışı ve akıllı EYS'nin uygulanması arasındaki ilişkiyi araştırdı. Çalışmada, akıllı enerji sistemleriyle ilişkili bilgi, davranış, maliyetler ve çevresel etkilerle ilgili soruları içeren 100 ikamet edene dağıtılan çevrimiçi bir anket aracılığıyla

toplanan veriler kullanıldı. Veriler, SmartPLS yazılımı aracılığıyla Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi (PLS-SEM) kullanılarak analiz edildi. Temel bulgular, ikamet edenlerin bilgisi ile sürdürülebilir enerji davranışları arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ve bilginin hem maliyet azaltımını hem de çevresel faydaları olumlu yönde etkilediğini gösterdi. Aracılık analizi, davranışın bilgi ile incelenen sonuçlar arasında önemli bir aracı görevi gördüğünü gösterdi. Davranış yapısı varyansın %66,2'sini açıklarken, maliyet ve çevresel etki yapıları sırasıyla %71,3 ve %69,6'sını açıklamıştır.

Elektrik Tüketiminde Anomali Tespiti Alanındaki Çalışmalar

Elektrik tüketim verilerinde anomali tespiti üzerine yenilikçi bir yaklaşım sunan Kardi vd. (2021), alışılmadık tüketim örüntülerini bir saat önceden belirlemek amacıyla iki aşamalı bir model geliştirmiştir. Çalışmada, 2017-2019 yıllarını kapsayan ve meteorolojik değişkenlerle (sıcaklık, rüzgâr hızı vb.) zenginleştirilmiş saatlik elektrik tüketim verileri kullanılmıştır. Önerilen metodolojinin ilk aşamasında, standart bir LSTM ağı, geçmiş verilere dayanarak gelecekteki tüketim değerlerini tahmin etmek için eğitilmiştir. İkinci aşamada ise, yalnızca normal tüketim verileriyle eğitilmiş bir LSTM-otokodlayıcı (Autoencoder) modeli, ilk aşamadan gelen tahmin değerlerini girdi olarak almıştır. Anomaliler, otokodlayıcının yeniden yapılandırma hatasının belirli bir eşiği aşmasıyla tespit edilmiştir. Bu eşik değeri, normal ve anormal davranışları dinamik olarak ayırmak için Üstel Hareketli Ortalama (EMA) tekniği ile belirlenmiştir. Bu iki aşamalı çerçeve, hem tekil metriklerdeki sapmalarla tanımlanan yerel anomalileri hem de genel örüntüdeki bozulmaları ifade eden küresel anomalileri yüksek bir etkinlik oranıyla tespit etme başarısı göstermiştir. Analizler, zamansal ve gecikmeli özelliklerin modele dahil edilmesinin performansı önemli ölçüde artırdığını ve mevsimsel (günlük, haftalık, yıllık) eğilimlerin modellenmesinin önemini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bu çalışma, enerji israfı, kullanıcı hataları veya teknik arızalar gibi potansiyel sorunların erken teşhisi için sağlam ve proaktif bir anomali tespit sistemi sunarak, LSTM tabanlı tahmin ve otokodlayıcı mimarilerinin sinerjisini başarılı bir şekilde sergilemiştir.

Yenilenebilir enerji Alanındaki Çalışmalar

Zhenpeng Yao vd. (2023), enerji hasadı, depolama, dönüştürme ve yönetim alanlarında yenilenebilir enerji sistemlerinin gelişimini hızlandırmak için MÖ entegrasyonunu tartıştılar. Enerji araştırmalarında

performans ölçümlerini standartlaştırmak için Hızlandırma Performans Göstergeleri kavramını tanıttılar. Vurgulanan MÖ uygulamaları arasında fotovoltaik malzemelerin optimizasyonu, yeni pil kimyalarının keşfi ve geliştirilmiş elektrokimyasal verimlilikler yer almaktadır. Çalışma, verimliliği tehlikeye atmadan 17 kat artış elde ederek, iyileştirilmiş fotovoltaik kararlılığa sahip kararlı perovskit malzemeleri keşfetmek için Bayes optimizasyonunun kullanımını göstermiştir. Pil teknolojileri için, MÖ odaklı yaklaşımlar, 12.000 adaydan oluşan bir veri setini tarayarak 10 yeni katı elektrolit belirlemiş ve veri odaklı metodolojilerin önemini vurgulamıştır. Elektrokatalizde, rastgele orman modelleri CO2 azaltımı için Cu-Al alaşımlarının keşfini kolaylaştırdı ve benzeri görülmemiş Faradaik verimlilikler elde etti.

Tablo 1, enerji yönetiminde çeşitli alanlarda MÖ uygulanmasını gösteren temel çalışmaları özetlemektedir.

Tablo 1: Literatür Özeti

Alan	Punto	Çalışma Alanı	Metotlar	Sonuçlar
Elektrik Fiyat Tahmini	Kılıç vd. (2024)	Batı DK Danimarka1 şebeke bölgesindeki elektrik fiyatı tahmini	LSTM ağları	RMSE: 8,41, R^2: 0,81; İşlem stratejisi 35,9 milyon € kar (%60 optimum) elde edilmiştir.
	Zhang vd. (2018)	Almanya ihale bölgesinde gün öncesi elektrik fiyatı tahmini	Modüler DÖ Çerçevesi (CNN + LSTM)	MAE: 3,74 €/MWh, ARIMA'yı (4,33–4,51 €/MWh) geride bırakmıştır.
	Gülmez ve Selçuklu (2024)	Hiper-parametre optimizasyonu ile elektrik fiyat tahmini	ARO ile Derin LSTM	R^2: 0,885 (7 günlük tahmin), SHAP analizi fiyat geçmişini önemli bir özellik olarak tanımlamıştır.
Akıllı Şebeke	Lakshmanarao vd. (2024)	Şebeke güvenilirliği için kararlılık tahmini	MÖ/DÖ Füzyonu (SVM, ANN, RF)	Topluluk doğruluğu: %98,9, geleneksel modelleri aşmıştır.
	Franović vd. (2023)	Makine öğrenimiyle merkezi olmayan kararlılık modellemesi	XGB, SVM, MLP, Genetik Programlama	F1-puan: 0,99, R^2: 0,98.
	Mali vd. (2020)	IoT entegrasyonu ile akıllı şebekeler için enerji tüketimi tahmini	RNN, LSTM	R^2: 0,9553
Akıllı Enerji Yönetimi	Akram vd. (2024)	Kentsel akıllı şehirler için akıllı enerji yönetim sistemi	Sınıflandırma için SVM	Doğruluk: %92,11, Hassasiyet: %92,71, Kaçırma oranı: %7,89
	Hakawati vd. (2024)	Konut binalarında enerji yönetiminin benimsenmesinde davranışsal etki	Kısmi En Küçük Kareler-Yapısal Eşitlik Modellemesi	Bilgi, maliyet azaltma ve sürdürülebilirlik davranış ölçütünü olumlu yönde etkilemiştir.
Anomali Algılama	Kardi vd. (2021)	Elektrik tüketim verilerinde anormallik tespiti	LSTM Autoencoder	Yerel/küresel anormallik tespitinde yüksek doğruluk elde edilmiştir.
Yenilenebilir Enerji	Yao vd. (2023)	Yenilenebilir enerji sistemleri gelişiminin hızlandırılması	Bayes Optimizasyonu, RF	Fotovoltaik kararlılıkta 17 kat artış 10 katı elektrolit keşfedilmiştir.

Yukarıda detaylandırılan çalışmalar, makine öğreniminin enerji yönetiminin çeşitli alt alanlarında karşılaşılan kritik zorluklara çözüm üretmedeki dönüştürücü potansiyelini kolektif olarak ortaya koymaktadır. Akıllı bina ve ev otomasyonu bağlamında, MÖ tabanlı sistemlerin enerji tüketimini optimize ederek, israfı azaltarak ve kullanıcı konforunu koruyarak maliyet verimliliğini artırdığı görülmektedir. Akıllı şebeke düzeyinde, gelişmiş tahmin modelleri, arz-talep dengesini sağlayarak şebeke güvenilirliğini ve istikrarını güçlendirmiş ve bu sayede değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının daha sorunsuz entegrasyonuna olanak tanımıştır. Benzer şekilde, anomali tespit teknikleri, elektrik tüketimindeki verimsizlikleri ve potansiyel arızaları proaktif olarak belirleyerek daha dirençli ve sürdürülebilir enerji altyapılarının temelini atmıştır. Yenilenebilir enerji teknolojileri alanında ise MÖ odaklı stratejiler, yeni malzeme keşif süreçlerini hızlandırmış, enerji depolama ve üretim teknolojilerinin optimizasyonuna katkı sağlayarak sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişi desteklemiştir.

Bu bulgular ışığında, makine öğreniminin temel gücünün; yüksek doğruluk oranına sahip tahminler, dinamik optimizasyon ve adaptif çözümler sunma kapasitesinde yattığı açıktır. Bu yetenekler, MÖ'yü modern enerji sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni haline getirmektedir. Enerji ekosistemleri, yenilenebilir enerji, IoT ve merkeziyetsiz yönetişim gibi unsurların entegrasyonuyla yapısal olarak daha karmaşık hale geldikçe, makine öğreniminin rolünün ve öneminin artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bu doğrultuda, gelecekteki araştırmaların, uç bilişim, birleşik öğrenme ve Enerji İnterneti gibi yeni ortaya çıkan paradigmalar ile gelişmiş MÖ tekniklerinin entegrasyonuna odaklanması kritik bir önem taşımaktadır. Söz konusu entegrasyon, yalnızca sürdürülebilirliği ve sistem direncini teşvik etmekle kalmayacak, aynı zamanda hızla evrilen küresel enerji peyzajının gerektirdiği ölçeklenebilir, verimli ve otonom EYS'nin geliştirilmesinin önünü açacaktır.

ENERJİ SİSTEMLERİNDE MÖ VE DÖ UYGULAMANIN ZORLUKLARI

Veri Kalitesi ve Erişilebilirliği: MÖ modellerinin performansı, temelini oluşturan verilerin kalitesine doğrudan bağlıdır. Ancak enerji sektörü, çoğu zaman MÖ uygulamaları için ideal olmayan veri altyapılarına sahiptir. Karşılaşılan temel sorunlar şunlardır:

• Veri Tutarsızlığı ve Kaybı: Özellikle şebeke kararlılığının izlenmesinde kritik rol oynayan Senkronize Fazör Ölçüm Birimleri tarafından sağlanan yüksek çözünürlüklü verilerde bile senkronizasyon hataları, veri kayıpları ve gecikme (latency) sorunları yaşanabilmektedir. Bu tür kusurlar, yapay zekâ tabanlı karar verme mekanizmalarının güvenilirliğini doğrudan tehlikeye atarak hatalı kararlılık değerlendirmelerine ve kritik durumlara geç müdahalelere yol açabilir (Aslam vd., 2025; Lakshmanarao vd., 2024).

• Etiketlenmiş Veri Kıtlığı: Güç kalitesi bozuklukları gibi nadir fakat kritik olayları tespit etmek için eğitilen denetimli öğrenme modelleri, bu olayları temsil eden yeterli sayıda etiketlenmiş örneğe ihtiyaç duyar. Gerçek operasyonel verilerde bu tür olayların azlığı, modellerin genellikle sentetik veya simüle edilmiş veriler üzerinde eğitilmesine neden olmaktadır. Bu durum, modellerin gerçek şebeke koşullarında karşılaşılan gürültü ve değişkenlik spektrumunu tam olarak yakalayamamasına ve dolayısıyla pratik etkinliklerinin sınırlı kalmasına yol açar (Aslam vd., 2025).

• Veri Siloları ve Standardizasyon Eksikliği: Enerji verileri genellikle farklı kurumlar (şebeke operatörleri, dağıtım şirketleri, meteoroloji kurumları) tarafından farklı formatlarda ve silolar halinde tutulmaktadır. Bu dağınık yapı, verilerin birleştirilmesini ve bütüncül modeller geliştirilmesini zorlaştırmakta, ayrıca farklı çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmayı imkânsız kılan bir standardizasyon eksikliğine neden olmaktadır.

Etik ve Politik Kaygılar: MÖ'nün enerji sistemlerine entegrasyonu, yalnızca teknik bir mesele olmayıp, aynı zamanda önemli etik ve politik boyutlar da içermektedir. Bu kaygılar, teknolojinin toplumsal kabulünü ve adil uygulanmasını doğrudan etkilemektedir.

• Algoritmik Önyargı ve Enerji Adaleti: MÖ modelleri, eğitildikleri verilerdeki mevcut toplumsal ve tarihsel eşitsizlikleri devralma ve hatta pekiştirme riski taşır. Örneğin, belirli demografik grupların veya düşük gelirli bölgelerin enerji tüketim verilerinin eğitim setinde yetersiz temsil edilmesi, bu bölgelere yönelik adil olmayan tarife yapılarına, suboptimal enerji dağıtım stratejilerine veya teşvik programlarından dışlanmalarına yol açabilir. Bu durum, "enerji adaleti" ilkesine aykırıdır ve MÖ'nün sadece teknik bir optimizasyon aracı olarak değil, aynı zamanda bir sosyo-teknik sistem olarak ele alınmasını gerektirir (Chen vd., 2024; Aslam vd., 2025).

• Veri Mahremiyeti ve Güvenlik: Akıllı sayaçlar, hane halkının yaşam tarzı, günlük rutinleri ve hatta evde olup olmadıkları hakkında son derece hassas bilgiler üretebilir. Bu verilerin toplanması, saklanması ve işlenmesi, ciddi mahremiyet riskleri doğurur. Ayrıca, merkezi veri tabanları ve MÖ kontrollü şebeke sistemleri, DDoS saldırıları veya veri manipülasyonu gibi siber tehditlere karşı hedef haline gelebilir. Bu nedenle, gizliliği koruyan MÖ teknikleri (örneğin, birleşik öğrenme) ve sağlam siber güvenlik mimarilerinin geliştirilmesi kritik bir zorunluluktur (Gavorník vd., 2024; Hseiki vd., 2024).

Diğer Operasyonel ve Teknik Zorluklar: Yukarıdakilere ek olarak, MÖ'nün sahada yaygınlaşmasını engelleyen bir dizi operasyonel ve teknik zorluk bulunmaktadır:

• Hesaplama Karmaşıklığı ve Ölçeklenebilirlik: Özellikle derin öğrenme ve topluluk modelleri, büyük miktarda hesaplama gücü, bellek ve enerji gerektirir. Bu durum, modellerin gecikmeye duyarlı (latency-sensitive) veya kaynak kısıtlı ortamlarda (örneğin, uç cihazlar) konuşlandırılmasını zorlaştırmaktadır.

• Mevcut Sistemlere Entegrasyon: Enerji sektöründeki SCADA gibi mevcut kontrol ve otomasyon sistemleri, dinamik ve veri odaklı MÖ modellerini sorunsuz bir şekilde entegre etmek üzere tasarlanmamıştır. Bu teknik darboğaz, MÖ'nün potansiyel faydalarının tam olarak hayata geçirilmesini engellemektedir.

• Model Açıklanabilirliği ve Güven: Güvenlik açısından kritik olan enerji sistemlerinde, kara kutu olarak çalışan MÖ modellerinin neden belirli bir tahminde veya kararda bulunduğunun operatörler tarafından anlaşılması hayati öneme sahiptir. Model şeffaflığının eksikliği, hem düzenleyici kurumlar tarafından onay alınmasını zorlaştırır hem de operatörlerin sisteme olan güvenini zayıflatarak insan-makine iş birliğini engeller.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bölüm boyunca sunulan analiz ve vaka çalışmaları, küresel enerji sektörünün karşı karşıya olduğu yapısal zorluklar karşısında MÖ ileri gelen bir teknoloji olarak konumlandığını göstermektedir. Giderek artan enerji talebi, yenilenebilir kaynakların entegrasyonundan kaynaklanan şebeke değişkenliği ve acil çevresel sürdürülebilirlik hedefleri, geleneksel enerji

yönetim paradigmalarını yetersiz kılmaktadır. Bu bağlamda MÖ, enerji sistemlerinin optimizasyonunda, verimliliğinde ve güvenilirliğinde devrim niteliğinde bir potansiyel sunan etkili bir araç olarak öne çıkmıştır. Uygulamalı çalışmalar, MÖ algoritmalarının; enerji tüketiminin anlık izlenmesi, talep ve üretim için yüksek doğruluklu zaman serisi tahminleri yapılması, operasyonel anomalilerin proaktif tespiti ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu gibi kritik alanlarda somut ve ölçülebilir başarılar elde ettiğini kanıtlamıştır.

Sonuç olarak, makine öğreniminin enerji yönetimindeki rolü, reaktif bir problem çözme aracı olmaktan çıkıp, proaktif, akıllı ve otonom sistemlerin temelini oluşturan stratejik bir bileşene dönüşmektedir. Bu teknolojinin benimsenmesi, daha verimli, ekonomik ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu dönüşümün pürüzsüz bir şekilde ilerlemesi için aşılması gereken önemli zorluklar da mevcuttur. Veri kalitesi, erişilebilirliği ve mahremiyeti gibi temel sorunlar, MÖ modellerinin performansını doğrudan etkilemektedir. Aynı derecede önemli bir diğer husus ise, özellikle derin öğrenme modellerinin "kara kutu" doğasından kaynaklanan model açıklanabilirliği ve yorumlanabilirliği sorunudur. Kritik altyapı kararlarının bu algoritmalara emanet edilebilmesi için, modellerin neden belirli bir sonuca ulaştığının şeffaf bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu zorluklar, gelecekteki akademik ve endüstriyel araştırmalar için hem teknik hem de etik boyutları olan açık uçlu ve öncelikli araştırma alanları sunmaktadır.

ÖNERİLER VE GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Makine öğreniminin enerji sistemlerindeki potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için gelecekteki araştırmalar, mevcut zorluklara odaklanan bütüncül bir yaklaşımla ilerlemelidir. Teknik düzeyde, yalnızca veri odaklı modeller yerine, sistemin fiziksel prensiplerini entegre eden hibrit ve fiziksel bilgili MÖ (physics-informed machine learning) yaklaşımlarına öncelik verilmelidir. Güven ve şeffaflığı artırmak amacıyla, "kara kutu" modeller için açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yöntemleri geliştirilmeli ve farklı problemler için derin öğrenme dışındaki (örneğin SVM, RF) daha verimli algoritmalar da aktif olarak araştırılmalıdır. Veri altyapısı tarafında, tekrarlanabilirliği sağlamak üzere açık erişimli kıyaslama veri setleri

oluşturulması ve veri kalitesi sorunlarını gidermek için MÖ tabanlı veri tamamlama tekniklerinin kullanılması kritik önem taşımaktadır. Son olarak, etik ve politik alanda, hassas verileri korumak için birleşik öğrenme (federated learning) gibi gizliliği koruyan teknolojiler yaygınlaştırılmalı ve algoritmaların farklı toplumsal gruplar üzerindeki etkilerini ölçen enerji adaleti odaklı metrikler geliştirilerek daha adil ve güvenilir sistemlerin önü açılmalıdır.

REFERANSLAR

Ahmed, M., Seraj, R., & Islam, S. M. S. (2020). The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. Electronics, 9(8), 1295.

Akram, A., Abbas, S., Khan, M., Athar, A., Ghazal, T., & Al Hamadi, H. (2024). Smart energy management system using machine learning. Computers, Materials & Continua, 78(1).

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45:5–32.

Burger, C. J. C. (1998, January). A tutorial on support vector machines for pattern recognition, data mining and knowledge discovery. Workshop on data mınıng and knowledge dıscovery.

Chong, B. (2021). K-means clustering algorithm: a brief review. Academic Journal of Computing & Information Science, 4(5), 37-40.

Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine learning, 20, 273-297.

Ergen, T., & Kozat, S. S. (2019). Unsupervised anomaly detection with LSTM neural networks. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 31(8), 3127-3141.

Fouad, M., Mali, R., Lmouatassime, A., & Bousmah, M. (2020). Machine learning and iot for smart grid. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 44, 233-240.

Franović, B., Baressi Šegota, S., Anđelić, N., & Car, Z. (2023). Decentralized smart grid stability modeling with machine learning. Energies, 16(22), 7562.

Gülmez, B., & Selçuklu, S. Electricity Market Price Forecasting Using Deep Lstm Network Optimized with Artificial Rabbits Optimization: A Case Study of the Turkish Day-Ahead Market. Available at SSRN 5035223.

Hakawati, B., Mousa, A., & Draidi, F. (2024). Smart energy management in residential buildings: the impact of knowledge and behavior. Scientific Reports, 14(1), 1702.

Hassan, A. A. H., Shah, W., Husein, A. M., Talib, M. S., Mohammed, A. A. J., & Iskandar, M. (2019). Clustering approach in wireless sensor networks based

on K-means: Limitations and recommendations. Int. J. Recent Technol. Eng, 7(6), 119-126.

Imandoust, S. B., & Bolandraftar, M. (2013). Application of k-nearest neighbor (knn) approach for predicting economic events: Theoretical background. International journal of engineering research and applications, 3(5), 605-610.

Kardi, M., AlSkaif, T., Tekinerdogan, B., & Catalao, J. P. (2021, September). Anomaly detection in electricity consumption data using deep learning. In 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE.

Kaymakci, C., Wenninger, S., & Sauer, A. (2021). Energy anomaly detection in industrial applications with long short-term memory-based autoencoders. Procedia CIRP, 104, 182-187.

Kılıç, D. K., Nielsen, P., & Thibbotuwawa, A. (2024). Intraday Electricity Price Forecasting via LSTM and Trading Strategy for the Power Market: A Case Study of the West Denmark DK1 Grid Region. Energies, 17(12), 2909.

Lakshmanarao, A., Srisaila, A., Kiran, T., Kumar, K., & Koppireddy, C. S. (2024). An efficient smart grid stability prediction system based on machine learning and deep learning fusion model. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 33(2), 1293-1301.

Li, F., Su, J., & Sun, B. (2023). An Optimal Scheduling Method for an Integrated Energy System Based on an Improved K-Means Clustering Algorithm. Energies, 16(9), 3713.

Nam, H. S., Jeong, Y. K., & Park, J. W. (2020, October). An anomaly detection scheme based on LSTM autoencoder for energy management. In 2020 international conference on information and communication technology convergence (ICTC) (pp. 1445-1447). IEEE.

Nayini, S. E. Y., Geravand, S., & Maroosi, A. (2017, August). A novel threshold-based clustering method to solve K-means weaknesses. In 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS) (pp. 47-52). IEEE.

Nguyen, H. D., Tran, K. P., Thomassey, S., & Hamad, M. (2021). Forecasting and Anomaly Detection approaches using LSTM and LSTM Autoencoder techniques with the applications in supply chain management. International Journal of Information Management, 57, 102282.

Raykov, Y. P., Boukouvalas, A., Baig, F., & Little, M. A. (2016). What to do when K-means clustering fails: a simple yet principled alternative algorithm. PloS one, 11(9), e0162259.

Safavian, S. R., & Landgrebe, D. (1991). A survey of decision tree classifier methodology. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 21(3), 660-674.

Vassilvitskii, S., & Arthur, D. (2006, January). k-means++: The advantages of careful seeding. In Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms (pp. 1027-1035).

Wang, X., Yao, Z., & Papaefthymiou, M. (2023). A real-time electrical load forecasting and unsupervised anomaly detection framework. Applied Energy, 330, 120279.

Yao, Z., Lum, Y., Johnston, A., Mejia-Mendoza, L. M., Zhou, X., Wen, Y., ... & Seh, Z. W. (2023). Machine learning for a sustainable energy future. Nature Reviews Materials, 8(3), 202-215.

Zhang, F., & Fleyeh, H. (2020, November). Anomaly detection of heat energy usage in district heating substations using LSTM based variational autoencoder combined with physical model. In 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) (pp. 153-158). IEEE.

Zhang, W., Cheema, F., & Srinivasan, D. (2018, October). Forecasting of electricity prices using deep learning networks. In IEEE PES asia-pacific power and energy engineering conference (APPEEC) (pp. 451-456). IEEE.Ocak, M. A., ve Akdemir, O. (2008). An investigation of primary school science teachers' use of computer applications. The Turkish Online Journal of Educational Technology, 7(4), 54-60.

Ocak, M.A. (2005). Mathematics teachers' attitudes toward the computers. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, *4*(3), 82-88.

Scahill, E. M., Melican, C., ve Walstad, W. (2005). The preparation and experience of advanced placement in economics instructors. *Journal of Economic Education, 36*(1), 93-98.

Polimer Kompozitler, Üretim Teknikleri Ve Savunma Sanayisindeki Önemi

Gonca DÜZKALE SÖZBİR[1]
İbrahim BEKTAŞ[2]

1- Doç. Dr.; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü. goncaduzkale@gmail.com ORCID No: 0000-0002-0728-841X
2- Prof. Dr.; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü. ibektas063@gmail.com ORCID No: 10000-0002-0617-6926

ÖZET

Polimer kompozitler, yüksek mukavemet özellikleri yanı sıra hafiflik, enerji sönümleme, elastiklik ve işlenebilirlik gibi çok işlevli özellikleri sayesinde savunma sanayisinde kritik bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, bir matris polimer ile takviye elemanlarının birleşimiyle elde edilir ve her bileşenin tek başına sağladığı özelliklerin ötesinde üstün mekanik ve fonksiyonel performans sunmaktadır. Termoset ve termoplastik polimer matrisleri; cam elyaf, karbon elyaf, aramid ve doğal lifler gibi takviyelerle birleştirilerek farklı uygulamalara uygun kompozitler oluşturulmaktadır. Polimer kompozitlerin üretiminde el ile yerleştirme, RTM, pultrüzyon, filament sarma, otoklav ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler kullanılmakta olup, her bir yöntem malzeme özellikleri ve üretim ölçeğine göre avantaj ve sınırlılıklar içermektedir.

Savunma sanayinde polimer kompozitler, hafif zırh, kişisel koruyucu ekipman, elektronik savaş sistemleri, EMI koruması ve nano içerikli malzemeler gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, mekanik dayanım, darbe direnci, korozyon ve çevresel etkilere karşı direnç, ağırlık tasarrufu gibi özellikleri ile askerî performansı artırırken işlevsel verimlilik sağlamaktadır. Gelecekte, geri dönüştürülebilir malzemeler, nano takviyeli hibrit sistemler ve entegre yapısal ve fonksiyonel tasarımlar, polimer kompozitlerin savunma uygulamalarındaki önemini daha da artıracaktır. Bu bağlamda, polimer kompozit malzeme bilimi, üretim teknolojileri ve sürdürülebilirlik stratejilerinin bir arada geliştirilmesi, savunma sanayinde etkin ve yenilikçi çözümler için kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler – Polimer, Yöntem, Kompozit, Savunma sanayi, Direnç

GİRİŞ

Malzeme bilimi, belirli sistem tasarımcısı ihtiyaçlarını karşılayan ileri malzemeler geliştirerek, mevcut malzemelerin performansı artırarak ve maliyetleri düşürerek savunma endüstrisinde çok önemli rol oynamaktadır. Verimli metotlar ve bilişim araçları, askeri sistemlere malzeme eklenmesini hızlandırmak için gereklidir. Malzeme bilimi, hafif araç yapıları, etkili zırh, gelişmiş sensörler ve termal yönetim sistemleri gibi uygulamalar için gelişmiş malzemelerin ve ultra özellikli malzemelerin geliştirilmesini sağlayarak genel performans ve güvenliği artırarak savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır (Siengchin, 2023). Savunma sistemlerindeki gelişmiş uygulamalar ve stratejik materyallerin geliştirilmesi yoluyla rekabet avantajı sağlayarak ulusal güvenlik yeteneklerini artıran teknolojik yenilikleri sağlayarak savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır.

1. Savunma Sanayinde Malzeme Teknolojilerinin Evrimi

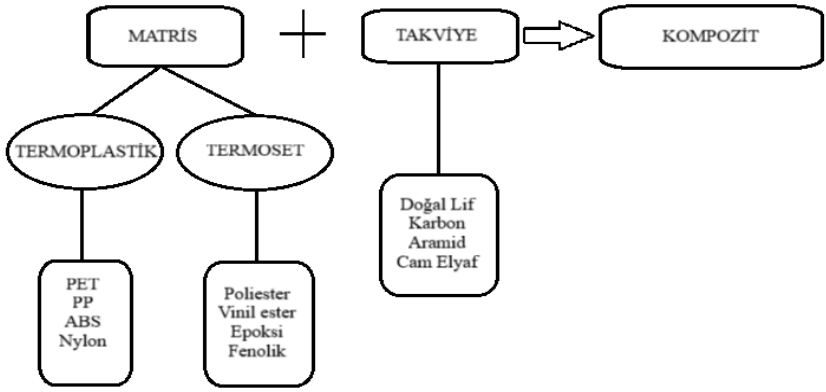
Savunma sanayisinde malzeme teknolojileri, tarihsel süreç boyunca silah sistemlerinden taşıma platformlarına, zırh teknolojilerinden elektronik bileşenlere kadar çok geniş bir yelpazede dönüşüm geçirmiştir. Bu evrim, savaşların teknoloji odaklı yapıya bürünmesiyle paralel ilerlemiş, malzeme inovasyonu, askeri üstünlüğün kritik unsurlarından biri hâline gelmiştir. Geçmişte tahta, deri, bakır ve demir gibi geleneksel malzemeler tercih edilirken, Sanayi Devrimi'yle birlikte çelik ve alaşımlı metallerin kullanımı yaygınlaşmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren ise yüksek mukavemetli çelikler, zırh çelikleri, süper alaşımlar ve kompozit teknolojiler ön plana çıkmıştır. Bu gelişmeler, yalnızca malzemelerin özelliklerinde değil, aynı zamanda üretim yöntemlerinde de önemli bir dönüşümü beraberinde getirmiştir (Ashby ve Jones, 2012; Bellais, 2013; Bhatnagar, 2016; Callister ve Rethwisch, 2020).

2. Polimer Kompozitlerin Gelişim Süreci Ve Önemi

Polimer kompozitler, bir matris polimer ile bir takviye fazının birleşmesiyle elde edilen çok fazlı malzemelerdir. Bu birleşim, her bir bileşenin tek başına sahip olduğu özelliklerin ötesinde, daha üstün özelliklerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Callister ve Rethwisch, 2020; Oladele ve ark., 2020). Polimer matrisli kompozit malzemelerin endüstriyel ölçekte kullanımı ise 1930'lu yıllarda cam elyaf takviyeli sistemlerin geliştirilmesiyle başlamıştır (Sivasubramanian ve ark., 2021). 1950'ler ve 1960'larla birlikte epoksi, polyester, vinilester gibi termoset reçineler yaygınlaşmış, cam elyaf, karbon fiber ve aramid gibi takviyelerle özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan kompozit malzemeler üretilmiştir (Bukvic ve ark., 2025). Son yıllarda, termoplastik matrisler, nano takviyeleri, hibrit kompozitler ve akıllı kompozitler araştırma odağı haline gelmiştir (Wu ve ark., 2023). Özellikle savunma sanayisinde, hafiflik, darbe yutma, elektromanyetik şeffaflık, radar soğurma gibi özellikler, aranan nitelikler haline gelmiş ve polimer kompozitler bu alanlarda dikkat çekici hale gelmiştir (Siengchin, 2023).

POLİMER KOMPOZİTLERİN TEMEL YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Matris, termoplastik yada termoset tipinde olabilir. Matris, takviye liflerini birbirine bağlamak, gerilmeleri dağıtmak, yapıya kimyasal direnç kazandırmak ve son ürüne istenen şekli vermeye yardımcı olmaktadır (Arabpour ve ark., 2020; Zheng ve ark., 2019). Matris seçimi, kompozit malzemenin hangi amaçlar için kullanılacağına bağlıdır. Şekil 1'de polimer kompozit malzemenin oluşum şeması görülmektedir.



Şekil 1: Polimer kompozit malzemenin oluşum şeması

1. Polimer Matris Türleri

1.1.Termoset Polimerler

Termoset polimerlere termoset plastikler veya termosetleyici polimerler de diyebiliriz. Bunlar ısıtıldığında yumuşamayan ve hep sert kalan malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalarının sebebi, kovalent bağlarla oluşmuş, çapraz bağlı bir polimer ağına sahip olmalarıdır. Kompozit üretiminde sıkça kullanılan termoset polimerler arasında polyester, epoksi, vinil ester, fenolik reçineler, poliamitler ve bismaleimidler var. Bu malzemeler, özellikle daha gelişmiş malzemelerin yapımında çok işe yarıyor. Son 20 senede polyester, epoksi ve vinil ester reçineleri, birçok mühendislik uygulamasında kompozit yapmak için seçiliyor. Mesela havacılık ve otomotiv sanayisi için yapılan kompozitlerde genellikle epoksi reçineler kullanılıyor. Bu termosetler, sıcaklığa ve kimyasal maddelere karşı dayanıklı oldukları için ve üç boyutlu çapraz bağlı yapıları yüzünden tercih ediliyor (Sivasubramanian ve ark., 2021). Termoset polimerlerin en önemli güzel yanları şunlardır:

- Termoset polimerler, yüksek ısıl kararlılık ve sıcaklık dayanımı göstermektedir. Termoset polimerler kürlendikten sonra erime ya da

yumuşama göstermeden yüksek sıcaklıklara dayanabilirler; yüksek sıcaklıkta şekil değişmezler (Vengatesan ve ark., 2018).

- Çapraz bağlı üç boyutlu ağ yapısı ile yüksek mekanik sertlik ve mukavemet sergilemektedirler. Kovalent çapraz bağlar sayesinde sert yapı kazanırlar ve mekanik yükler altında deformasyona daha dirençli olabilirler (Saba ve Jawaid, 2018).
- Boyutsal kararlılık yani şekil koruma sağlarlar. Termoset materyaller, ısı ve mekanik etkiler altında şekillerini koruma eğilimindedir, ayrıca çapraz bağlı yapı, polimer zincirlerinin serbest hareketini kısıtlamaktadır(Korolev ve ark., 2021).
- Termoset reçineler genellikle asit, baz ve organik çözücülere karşı daha dirençlidir; uygun katkılarla bu direnç artırılabilir (Barra ve ark., 2023).
- İyi elektriksel izolasyon özellikleri gösterirler. Termoset reçineler genelde düşük iletkenliğe sahiptir ve yüksek dielektrik dayanım sunar, bu yüzden elektrik-elektronik uygulamalarda izolasyon malzemesi olarak tercih edilirler (Calabrese ve ark., 2023).

Termoset polimerlerin dezavantajları şu şekilde sıralanmaktadır.

- Ürünlerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı zordur. Yeniden şekillendirilemezler. Termosetler bir kez kürlendikten sonra ısı uygulanarak erimez, yeniden şekillendirilemez. Bu, geri dönüşüm ve yeniden işleme imkânını büyük ölçüde sınırlamaktadır (Yu ve ark., 2014).
- Geri dönüşümdeki zorluk nedeniyle atık sorunu oluşturmaktadırlar. Çapraz bağ yapısı, malzemenin kimyasal ve fiziksel olarak ayrıştırılmasını zorlaştırır, geleneksel eritme-ekstrüzyon yöntemleri kullanılamaz. Morici ve ark. (2022) bu zorluğu vurgulamış, termosetlerin geniş çapta geri dönüştürülmesinin halen bilimsel ve teknolojik zorluklar içerdiğini belirtmiştir. Ayrıca bir derleme makalesi, konvansiyonel termosetlerin yüksek performans özelliklerinin, sınırlı geri dönüşüm sağladığını belirtmektedir (Post ve ark., 2020).
- Yüksek çapraz bağ yoğunluğu, malzemeyi sertleştirirken sünekliğini azaltabilir, bu da darbe altında çatlama ya da kırılma riskini artırmaktadır (Xue ve ark., 2025).
- İşlenme (işleme sonrası yüzey, talaş alma, montaj) zorlukları sergilemektedirler. Sert ve erimeyen yapı nedeniyle zımparalama, delme, yüzey cilalama gibi işlemler daha zahmetli olabilir. Termosetlerin yüzey bitirme işlemlerinin termoplastiklere göre daha zor olduğunu belirtmektedir (Weinert ve Kempmann, 2004).
- Termoset reçineler, kürlenme reaksiyonunun düzgün kontrol edilmesini gerektirmektedir. Aksi halde kürlenme farklılığı, iç gerilmeler, çatlaklar ya da yetersiz kalitede ürünler oluşabilmektedir (Wang ve ark., 2023).

- Aşırı titreşim veya mekanik yorulma karşısında zayıflık gösterebilmektedirler. Termosetler, katı ve rijit yapıları nedeniyle yüksek titreşim ve döngüsel yüklere karşı yorulma dayanımı açısından sınırlı olabilmektedir (Doblies ve ark., 2021).
- Kürleme sırasında hacimsel büzülme (shrinkage) meydana gelebilir, bu da kalıp ve ürün arasındaki gerilmelere, çekme hatalarına ya da iç gerilmelere sebep olabilir (Seers ve ark., 2021).
- Günümüzde sürdürülebilirlik, çevre dostu malzeme tasarımı önemli olduğu için, termoset polimerlerin geri dönüşüm zorluğu ve atık sorunu çevresel dezavantaj oluşturmaktadır (Post ve ark., 2020).

1.2.Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerler, uzun zincirli ve çapraz bağlarla birbirine bağlı moleküllerden oluşmaktadır. Bu polimerler aynı zamanda ısı ile yumuşayan plastikler olarak da adlandırılmaktadır. Termoplastik yapılar, katı bir yapıya sahiptir ve farklı şekiller elde etmek için ısıtılarak kalıplanması veya preslenmesi gerekmektedir. Isıtma ve presleme işlemlerinden sonra son şeklini almaktadırlar. Termoplastik polimerlerin en önemli özelliği, şekillerinin değiştirilebilmesi ve yeniden kalıplanabilir olmalarıdır. Termosetlerde olduğu gibi, termoplastikler de çeşitli uygulamalar için farklı reçine türlerine sahiptir. Kullanılan her reçine türü, gereksinimlerine bağlı olarak seçilmektedir (Sivasubramanian ve ark., 2021). Termoplastikler genellikle yüksek mukavemetli, esnek ve kullanılan reçine türüne bağlı olarak büzülmeye karşı dayanıklıdır. Bu malzemeler, plastik alışveriş torbalarından yüksek gerilme dayanımı ve mekanik hassasiyet gerektiren parçalara kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilen çok yönlü malzemelerdir. Bu tür polimerler, hemen hemen her türlü uygulama için uygun özellikler göstermektedir (Sivasubramanian ve ark., 2021). Bu polimerlerin avantajları şu şekilde sıralanmaktadır.

- Yeniden işlenebilme ve geri dönüştürülebilme özelliği sergilerler. Termoplastikler, ısıtıldıklarında eriyebilir, soğutulduklarında tekrar katılaşabilirler. Bu döngü çok kez tekrarlanabilir ve bu da onları geri dönüştürmeye elverişli kılmaktadır (Reis ve ark., 2020; Alshammari ve ark., 2021).
- Kısa üretim süresinde, hızlı imalata imkan tanımaktadır. Kürlenme gerektirmemeleri, çapraz bağ oluşumunun olmaması üretim sürecini kısaltmakta, otomasyon ve seri üretime daha uygun hale getirmektedir(Zeyrek ve ark., 2022).
- Yüksek darbe direnci, tokluk ve süneklik özellikleri sergilemektedir. Termoplastikler, kırılmadan enerji emme yeteneği sayesinde bazı uygulamalarda avantaj sağlar (Alshammari ve ark., 2021).

- Korozyona ve kimyasallara karşı direnç sağlarlar. Metallerle karşılaştırıldığında, birçok termoplastik asit, baz ve çözücülere karşı daha dayanıklıdır (Zeyrek ve ark., 2022).
- Stoklama kararlılığı vardır ve raf ömürleri uzundur. Termoplastikler reçine formunda kimyasal reaksiyona girmedikleri için uzun süre depolanabilirler, bu durum uzun süre bozylmadan kalmalarına imkan tanımaktadır (Abenojar ve ark., 2024).
- Çoklu işleme metotlarına uyum sağlarlar. Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, termoform, vakum şekillendirme gibi yaygın plastik işleme yöntemleri ile üretilebilirler((Bukvic ve ark., 2025).
- Hafifliklerine göre yüksek özgül mukavemet oranı sergilerler. Kompozit matris olarak kullanıldığında, lif takviyeli termoplastikler az ağırlıkla iyi mekanik özellikler sunabilmektedirler (Alshammari ve ark., 2021).

Termoplastik polimerlerin dezavantajları ise şu şekilde sıralanmaktadır.

- Düşük sıcaklık dayanımı sergilerler. Çapraz bağ yapısı olmadığından yüksek sıcaklıklarda termoplastikler şekil kaybı veya akma eğilimi gösterirler (Reis ve ark., 2020).
- Sürekli yük altında zamanla plastik deformasyona uğrama eğilimleri vardır (Cosse ve ark., 2025).
- İşleme sıcaklıklarının yani erime sıcaklıklarının yüksek olması nedeniyle enerji maliyetlerini artırırlar (Borda ve ark., 2024).
- Uzun zincir yapıları nedeniyle akışkanlık sınırlı olabilir, doldurma ve kalıp doldurma zorlukları doğabilir (Valente ve ark., 2023).
- Bazı takviyeler (örneğin karbon lifleri) ile termoplastik matrisler arasında zayıf bağlanma olabilir. Bu durum, arayüz modifikasyonu gerektirir (Alshammari ve ark., 2021).
- Lif takviyeli termoplastikler sert ve aşındırıcı olabilir ayrıca işlenmeleri (kesme, delme) zor olabilir (Alshammari ve ark., 2021).
- Özel yüksek performanslı termoplastikler ve lif takviyesiyle maliyetler artabilir (Alshammari ve ark., 2021).

2. Polimer Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Takviye Elemanları

2.1.Cam Elyaf

Cam elyaf, esas olarak cam bileşenlerinin eritilip çok ince lifler hâline çekilmesiyle elde edilmektedir. Temel bileşimi, farklı oranlarda silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), bor oksit (B_2O_3) ve sodyum oksit (Na_2O) gibi oksitlerden oluşur (Park, 2018). Cam elyaf, polimer kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye elemanlarından biridir. Genel olarak yüksek çekme dayanımı ve iyi modül, düşük yoğunluk, iyi kimyasal kararlılık ve korozyon direnci, elektriksel yalıtım (düşük iletkenlik), iyi ısıl özellikler (ısısal kararlılık), uygun maliyet /

ekonomik olma ve yüzey modifikasyonu özellikleri ile malzemenin performansını artırılabilirler (Morampudi ve ark., 2021).

2.2.Karbon Lifi

Karbon fiber, esas olarak yüksek oranda karbon atomlarından (%90–99) oluşan, grafitik mikrokristalin yapıya sahip ileri teknoloji elyaftır. Bu elyaf, organik polimer öncüllerin kontrollü ısıl işlemlerden geçirilmesiyle üretilir (Morgan, 2005). Genel olarak yüksek çekme dayanımı, yüksek elastik modül, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük termal genleşme katsayısı, korozyon ve kimyasal direnç, elektriksel iletkenlik özellikleri göstermektedir.

2.3.Aramid lifi

Aramid elyaf, yüksek performanslı bir sentetik liftir. Polimer zincirinde yer alan aromatik halkalar ve amid (-CONH-) bağları, aramid elyafa yüksek mekanik dayanım, sıcaklık direnci ve kimyasal kararlılık kazandırır. En bilinen ticari türleri: Kevlar, Twaron, Technora' dır. Genel olarak yüksek çekme dayanımı, yüksek elastik modül, yüksek ısı dayanımı(400°C'ye kadar kararlılık), mükemmel darbe, aşınma ve yorulma dayanımı, kimyasal direnç ve boyutsal stabilite, iyi elektriksel yalıtkanlık özellikleri sergilemektedirler (Gore ve Kandasubramanian, 2018).

2.4. Doğal Elyaflar

Doğal elyaflar, bitkisel veya hayvansal kökenli lif yapısına sahip, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerdir. Polimer matrislerle birlikte kullanıldığında, çevre dostu ve hafif kompozit malzemelerin elde edilmesini sağlarlar. En yaygın kullanılan doğal elyaflar; bitkisel kaynaklı, keten, jüt, kenevir, sisal, bambu, rami, pamuk, hindistan cevizi, hayvansal kaynaklılar ise ipek ve yün olarak geçmektedir (Faruk ve ark., 2012).

POLİMER KOMPOZİTLERİN ÜRETİM TEKNİKLERİ

1.El İle Yerleştirme (Hand Lay-Up) Yöntemi

El ile yerleştirme yöntemi (Hand Lay-Up), polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan en basit ve en yaygın geleneksel üretim tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, elyaf takviye (cam, karbon, aramid, doğal elyaf vb.) tabakaları, kalıp yüzeyine elle yerleştirilmekte, ardından

termoset reçine (genellikle polyester, vinil ester veya epoksi) fırça, rulo veya püskürtme yöntemiyle uygulanmaktadır. Katmanlar teker teker oluşturulmakta ve hava kabarcıkları rulo ile giderilmektedir. Parça oda sıcaklığında veya hafif ısı altında kürlenmektedir (Grum, 2007). Yöntem düşük başlangıç maliyeti, basit ekipman gereksinimi (fırça, rulo, kalıp), büyük boyutlu parçaların üretimine uygun olması, elyaf yönelimi kullanıcı tarafından kontrol edilebilir olması, prototip ve küçük ölçekli üretim için ideal olmaktadır. Yöntemin dezavantajları ise, üretim süresi uzun ve operatöre bağlıdır, elyaf/reçine oranı düşüktür, hava boşluğu riski yüksek olması nedeniyle mekanik dayanım düşebilir. Yüzey kalitesi sınırlıdır ve otomasyona uygun değildir (Elkington ve ark., 2015).

2.Reçine Doldurma Yöntemleri (Resin Transfer Molding – RTM)

Reçine Doldurma Yöntemi (RTM), elyaf takviyeli polimer (ETP) kompozitlerin üretiminde kullanılan kapalı kalıp esaslı bir enjeksiyon prosesidir. Bu yöntem, geleneksel el ile yerleştirme (hand lay-up) gibi açık kalıp tekniklerine göre daha kontrollü, tekrarlanabilir ve yüksek yüzey kalitesine sahip parçalar üretmeye olanak sağlamaktadır. RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi, orta ve yüksek hacimli üretimler için uygun bir tekniktir ve özellikle otomotiv, havacılık ile denizcilik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, cam, karbon, aramid veya doğal elyaf gibi kuru takviye dokular kapalı bir kalıp içerisine yerleştirilir. Ardından düşük viskoziteli termoset reçine (genellikle epoksi, vinil ester veya polyester) basınç altında kalıba enjekte edilerek kompozit yapı oluşturulur. Reçine, elyaf tabakalarını tamamen ıslattıktan sonra kürlenme gerçekleşir ve parça sertleşerek hazır hale gelmektedir (Oliveira ve ark., 2013). Yöntem sayesinde, yüksek mekanik dayanım, kapalı kalıp sayesinde iki yüzeyde de yüksek kalite, otomasyona ve seri üretime uygunluk, elyaf yerleşimi ve reçine akışı kontrollü, hava boşluğu oranında azalma, daha homojen reçine dağılımı sağlamaktadır. Yöntemin olumsuzlukları ise, başlangıç ekipman maliyeti yüksektir, kalıp ve proses kontrolü hassasiyet gerektirir, kalıp tasarımı karmaşık olabilir, viskozitesi yüksek reçineler için uygun değildir ve kürleme süresi toplam zamanı uzatabilmektedir (Young, 1994; Sekido ve ark., 2003).

3.Pultrüzyon (Pultrusion) Yöntemi

Pultrüzyon, sabit kesitli kompozit malzeme yapmak için kullanılan, durmaksızın devam eden bir üretim tekniğidir. Güçlü ve hafif ürünler ortaya koyduğu için önemlidir. Getirdiği kolaylıkların yanında bazı zorlukları da vardır(Hannemann ve ark., 2021; Minchenkov ve ark., 2021). Pultrüzyonla elde edilen ürünler, güçlendirilmemiş termoplastiklere göre daha iyi mekanik özellikler gösterir. Aynı zamanda benzer alüminyum ürünlere göre %70'e varan oranda daha hafiftir. Bu yöntem sayesinde, kimyasal dayanıklılık, ısı dengesi ve elektrik yalıtımı gibi ihtiyaçlara göre ayarlanabilen farklı elyaf ve

matris karışımları kullanılabilir (Binse, 1995). Pultrüzyon, hızlı üretim yapılabilen, sağlamlaştırma konusunda başarılı ve karışık kesitli parçalar elde etme şansı veren otomatik bir yöntemdir. Bu özellikleri sayesinde çok üretim yapılması gereken durumlarda oldukça işe yarar (Tomlinson ve Holland, 1994).

4. Sıcak ve Soğuk Presleme (Compression Molding)

Sıcak ve soğuk presleme yöntemlerinin her birinin farklı avantajları ve dezavantajları vardır, bu da onları farklı uygulamalar için uygun hale getirir. Sıcak presleme özellikle seramikte yüksek yoğunluklu ve ince mikro yapılar elde etmek için faydalıdır, soğuk presleme, özellikle yüksek hassasiyetli uygulamalar için basitlik ve maliyet etkinliği açısından avantajlar sunmaktadır (Briggs, 1991; Mei ve ark., 2009). Sıcak presleme, eşzamanlı ısı ve basınç uygulaması nedeniyle yüksek yoğunluk ve ince tane boyutunda geliştirilmiş mikro yapı gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek maliyetler ve sınırlı seri üretim yetenekleri gibi dezavantajları vardır. Soğuk presleme, genellikle daha ucuz ve daha çeşitli şekiller için uygun olsa da, sıcak preslemeye kıyasla daha düşük yoğunluk ve mikro yapı üzerinde daha az kontrol ile sonuçlanabilmektedir. Her yöntemin etkinliği büyük ölçüde spesifik malzemeye ve istenen özelliklere bağlı olarak değişmektedir (Harmer, 1991).

5.Filament Sarma (Filament Winding) Yöntemi

Filament sarma yöntemi, özellikle basınçlı kaplar ve borular gibi silindirik yapıların üretiminde kompozit malzemelerin imalatında öne çıkan bir tekniktir. Bu yöntem, reçineyle emprenye edilmiş liflerin dönen bir silindir etrafına sarılmasını içerir ve elyafların yerleşimi ile yönlendirilmesi üzerinde hassas kontrol sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntem, homojen elyaf bileşimine sahip yüksek kaliteli kompozit malzemelerin üretimi, yüksek lif hacim fraksiyonu ve yüksek gerilme mukavemeti dahil mükemmel mekanik özellikler gibi avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, pürüzlü yüzeylere ve artan boşluklara yol açabilen zayıf dış yüzey kaplaması oluşturması önemli bir dezavantajıdır. Bu dezavantaj, vakumlu sıkıştırma kalıplama gibi bitirme teknikleriyle hafifletilebilmektedir(Purnomo ve ark., 2023).

6. Otoklav Kalıplama (Autoclave Molding)

Otoklav kalıplama, özellikle yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir basınçlı ve ısı kontrollü kapalı kalıp yöntemidir. Bu yöntem, önceden reçine ile emprenye edilmiş elyaf tabakalarının katmanlı olarak kalıba yerleştirilmesini ve yüksek basınç altında kürlenmesini içermektedir. Otoklav, aslında bir basınçlı fırın gibi çalışır ve işlem sırasında hem sıcaklık hem de basınç kontrol edilmektedir. Bu sayede hava boşlukları minimize edilir, reçine dağılımı homojen olur ve

yüksek mekanik performans elde edilir. Avantajları içerisinde çok yüksek mekanik dayanım ve yüzey kalitesi, hava boşluğu oranının az olması ve yüksek performans, kalın ve karmaşık parçaların üretimine uygunluk, elyaf yönelimi ve katman sayısı tam kontrol edilebilir olması sayılmaktadır. Otomotiv, havacılık ve savunma için idealdir. Dezavantajı ise, ekipman maliyeti çok yüksek olması, işlem süresi uzun olması(vakum, ısıtma, basınç, soğuma), sadece yüksek performanslı ve pahalı uygulamalar için kullanılması, operatör ve süreç kontrolü hassasiyeti gerektirmesi olarak sıralanabilmektedir (Dushin ve ark., 2014).

7.Enjeksiyon Kalıplama (Injection Molding)

Enjeksiyon kalıplama, erimiş (veya eritilmiş) termoplastik veya termoset reçinenin bir kalıp boşluğuna yüksek basınçla enjekte edilmesi, soğuyup sertleşmesi ve sonra parça olarak alınması işlemidir. Kompozit parçalar için bu işlem, granül halindeki fiber takviyeli malzemenin (kısa cam elyafı, uzun elyaf, doğal elyaf, karbon elyafı vb.) plastik matrise dağıtılmış halde kalıba beslenmesi ile uygulanır (Osswald ve ark., 2007). Enjeksiyon kalıplama, yüksek üretim hızı ve otomasyon imkânı, yüksek boyutsal hassasiyet ve tekrarlanabilirlik, karmaşık geometriler üretilebilmesi, yüzey kalitesinin olması, malzeme israfının az olması, yüksek mekanik özellik elde edilebilir olması avantajlarıdır. Dezavantajları ise yüksek kalıp ve ekipman maliyeti, elyaf kırılması riski, kalıp tasarımı ve proses kontrolünün karmaşıklığı, parça boyut kısıtlamaları, soğuma büzülmesi ve iç gerilme oluşumu sayılabilir.

METALİK MALZEMELERE KIYASLANDIĞINDA POLİMER KOMPOZİTLERİN AVANTAJLARI

Polimer kompozit malzemeler metalik malzemelerle karşılaştırıldığında birçok üstünlük sağlamaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanmıştır.

- Polimer kompozitler, aynı yük taşıma kapasitesine sahip metalik malzemelere kıyaslandığında çok daha düşük yoğunluk gösterir, bu da savunma uygulamalarında ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Hafiflik, yakıt verimliliği, taşıma kapasitesi ve manevra kabiliyeti gibi kritik performans parametreleri için avantajdır (Hsissou ve ark., 2021).

•Takviye elemanı (cam elyaf, karbon fiber, aramid vb.) ile birlikte kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe mukavemeti gibi mekanik özelliklerini artırılabilir. Kompozitler, yük taşıyıcı yönlerde metal alaşımlarla rekabet edebilecek seviyelere çıkabilir (Hsissou ve ark., 2021).
•Polimer kompozitler, metalik malzemelerde yaygın olan paslanma, oksidasyon ve kimyasal aşınma gibi problemlere karşı daha dirençlidir. Bu durum, deniz, nemli ya da agresif kimyasal ortamlar için büyük avantaj sağlamaktadır (Kausar ve ark., 2022).
•Polimer matris yapısı, termal ve elektriksel iletkenliğin düşük olmasını sağlar. Bu durumda ısı yayılımını kontrol eder veya elektriksel izolasyon gerektiren uygulamalarda fayda yaratır. Aynı zamanda elektromanyetik parazit ve kısa devre risklerini azaltmaktadır (Wang ve ark., 2022).
•Polimer kompozitler, kalıplama, filament sarma, RTM, vakuum infüzyon gibi yöntemlerle karmaşık içyapılarla üretilebilir. Bu, metal işlemlerle mümkün olmayan ya da maliyetli olan geometrik şekillerin üretimini mümkün kılar (Hsissou ve ark., 2021).
•Bazı polimer kompozitlerin üretimi, metal alaşımlarla kıyaslandığında daha düşük enerji gereksinimine sahiptir, işleme sıcaklıkları daha düşüktür ve bazı işlemler daha basitti, bu da maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Tiwari ve Yang, 2023; Rajendran ve ark., 2023).
•Kompozit yapıların heterojen olması ve matris-takviye arayüzleri, dinamik yüklerde titreşim sönümleme ve darbe enerjisi yutma yeteneğini artırır. Bu tür mekanik darbelere maruz kalan savunma sistemlerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır(Hsissou ve ark., 2021).

POLİMER KOMPOZİTLERİN SAVUNMA SANAYİSİNDEKİ ÖNEMİ

Polimerler, modern askeri uygulamaların zorlu gereksinimlerini karşılayan benzersiz özellikleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, gelişmiş savunma teknolojileri geliştirmek için gerekli olan hafif yapıları, yüksek mukavemetleri ve çok işlevli yetenekleri nedeniyle değerlidir. Polimerlerin savunma uygulamalarına entegrasyonu, kişisel koruyucu ekipmanlardan askeri

araçlara ve altyapıya kadar uzanmakta ve gelişmiş performans ve koruma sunmaktadır.

1.Geliştirilmiş Koruyucu Donanım

Polimerler, özellikle aramidler gibi elyaf kompozit formundaki, kurşun geçirmez yelekler ve kasklar gibi kişisel koruyucu ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, savaş durumlarında hareketlilik ve konfor için çok önemli olan hafif bir profili korurken yüksek darbe direnci sağlamaktadır. Polimer nanokompozitler (PNC'ler), balistik özellikleri geliştirerek ve kırılganlığı azaltarak koruyucu donanımları daha da geliştirerek askeri silahlanma ve koruyucu giysiler için idealdir (Cahayaputri ve ark., 2023; Rashid ve Hoque, 2022).

Polimerler, yüksek özgül mukavemetleri, sertlikleri ve enerji emme kapasiteleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemlidir ve bu da onları koruyucu uygulamalar için ideal kılmaktadır. Lif takviyeli polimer kompozitlerin, özellikle nanofiller veya kesme kalınlaştırıcı sıvılarla modifiye edilenler, eğilme, çekme ve kesme mukavemeti dahil olmak üzere mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Bu gelişmeler, savunma teçhizatı ve personelinin performansını ve güvenliğini artıran ve modern askeri uygulamalardaki önemini vurgulayan hafif, dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine izin vermektedir (Czech ve ark., 2021).

Polimerler, hafiflikleri, dayanıklılıkları ve çok yönlülükleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Grafen takviyesi için matris görevi görürler, alev direnci, balistik koruma ve elektromanyetik girişim koruması gibi özellikleri iyileştirmektedirler. Polimerlerin nanokompozitlerde grafen ile entegrasyonu, çok işlevli özellikler sunarak onları yenilikçi savunma uygulamaları için gerekli kılar ve asker güvenliğini ve performansını artırmaktadır (Kausar, 2019).

Polimerler savunma endüstrisinde, özellikle kurşun geçirmez yeleklerin üretiminde çok önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve mermilerin kinetik enerjisini etkili bir şekilde azaltma yeteneği gibi önemli avantajlar sunarlar. Bu özellikler polimer kompozit malzemeleri kişisel koruma için çekici bir seçim haline getirir. Kompozitin, mekanik, termal ve balistik özelliklerini arttırarak, bu malzemelerin verimli, hafif, esnek ve güçlü olduğunu göstererek askeri uygulamalarda koruyucu teçhizatın genel performansını artırdığını göstermektedir (Cahayaputri ve ark., 2023).

2.Gelişmiş Malzeme Özellikleri

Polimerler, hafiflikleri, dayanıklılıkları ve çok yönlülükleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Grafen takviyesi için matris görevi görürler, ek olarak, polimerler elektrostatik yük dağılımına, korozyon korumasına ve gelişmiş sensörlerin, yakıt hücrelerinin ve pillerin geliştirilmesine katkıda bulunur. Polimerlerin nanokompozitlerde

grafen ile entegrasyonu, çok işlevli özellikler sunarak onları yenilikçi savunma uygulamaları için önemli hale getirmektedir (Kausar, 2019). Hibrit polimer kompozitler, kesme kalınlaştırıcı sıvı emprenyesi ve elyaf takviyesi gibi tekniklerle, silah endüstrisindeki koruyucu uygulamalar için çok önemli olan yüksek enerji emme kapasiteleri sergilemektedirler (Czech ve ark., 2021).

Polimerler, hafiflikleri, esneklikleri ve çevresel faktörlere karşı dirençleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Elektromanyetik girişim (EMI) koruması bağlamında, karbon bazlı silikon kompozitler, karbon dolgu maddelerinin elektriksel iletkenliğini silikonun dayanıklılığı ile birleştirir ve elektronik sistemler için etkili koruma sağlamaktadır. Bu malzemeler, iletişim cihazları ve İHA'lar gibi savunma teknolojilerinin performansını ve güvenilirliğini artırırken, korozyon ve ağırlık gibi sorunları ele alarak onları modern savunma uygulamaları için gerekli kılmaktadır (Deveci ve ark., 2025).

Polimerler, yüksek enerji emme yetenekleri nedeniyle savunma endüstrisinde çok önemlidir ve bu da onları hafif zırh uygulamaları için ideal kılmaktadır. Askeri teçhizatta kullanılan kompozitleri güçlendirerek önemli gelişmiş koruma sağlarlar. Bununla birlikte, ısı, nem ve radyasyon gibi bozunma ajanlarına maruz kalmak, mekanik ve balistik özelliklerini değiştirerek performansı etkileyebilir. Bu etkilerin anlaşılması, çeşitli çevre koşulları altında bütünlüğü koruyan, personel ve ekipmanın güvenliğini sağlayan etkili zırh çözümleri geliştirmek için gereklidir(Monsores ve ark., 2020).

Hafif yapıları askeri teçhizatta toplam ağırlığın azalmasına katkıda bulunurken, aşırı koşullara dayanma yetenekleri dinamik ortamlarda güvenilirlik sağlamaktadır. Ek olarak, polimer kompozitler aşınma, korozyon ve darbeye karşı direnci artırarak koruyucu ekipman ve araç bileşenleri için ideal hale getirir. Polimer teknolojisindeki gelişmeler, savunma uygulamaları için yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini desteklemeye devam etmektedir (Bukvić ve ark., 2025). Polimer matris kompozitleri (PMC'ler), hafiflikleri, korozyon dirençleri, kimyasal dirençleri, elektrik yalıtımı ve yüksek alev geciktiriciliği nedeniyle savunma endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır, bu da onları füze, havacılık ve diğer yapısal malzemelerdeki uygulamalar için uygun hale getirmektedir (Bag ve ark., 2024).

Savunma endüstrisinde, özellikle koruyucu uygulamalar için kullanılan bu kompozitler, koruyucu ekipman ve ekipmanlarda yüksek özgül mukavemetleri, sertlikleri ve enerji emme kapasiteleri nedeniyle kullanılmaktadır (Czech ve ark., 2021). Savunma endüstrisinde kullanılan polimer malzemeler, silah gövdeleri ve hafif silahlardaki uygulamalar için mekanik özellikleri, aşınma direncini ve korozyon direncini geliştirmek için cam ve karbon elyaflarla güçlendirilmiş poliamid 66 (PA66) ve polikarbonat (PC) içermektedir (Karslı ve ark., 2020).

3.Çok Yönlü Uygulamalar

Polimerler, kişisel korumanın ötesinde; askeri platformlar, patlayıcılar ve algılayıcı cihazlar gibi birçok savunma uygulamasında da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Hafif olmaları ve dayanıklılık sağlamaları, onları daha inovatif askeri araçlar ve altyapılar geliştirmek için uygun kılmaktadır. Polimerlerin çift kullanımlı doğası, hem çatışma kaynaklı tehditlerle hem de iklim değişikliğinin yarattığı zorluklarla başa çıkmada esneklik sunmaktadır (Rashid ve Hoque, 2022).

Polimerik ve polimer kompozit malzemeler, hafiflikleri ve iyi mekanik dayanımları nedeniyle savunma deposu ve malzemelerinin geliştirilmesinde sıkça tercih edilmektedir (Srivastava ve ark., 2024). Modern uçaklarda ise elektronik harp (EW) sistemlerinin güvenilir çalışması büyük önem taşır; bu sistemler yoğun sinyal ortamlarında elektromanyetik girişime (EMI) karşı savunmasız olduklarından yüksek performanslı koruma çözümlerine gereksinim duyar. Hibrit polimer kompozitler, bu tür kritik sistemler için etkin EMI koruması sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Özellikle havacılık ve askeri elektronik alanında, bu kompozitler hem performansı artırmak hem de ağırlığı azaltmak amacıyla geliştirilmektedir (Kalaycı ve İrez, 2025).

Ayrıca, elektronik harp sistemlerindeki elektromanyetik parazit korumasını iyileştirmeye yönelik çalışmalar, akrilonitril bütadien stiren (ABS) matrisi içinde altıgen bor nitrür (h-BN) ve karbon nanotüpler (CNT) ile güçlendirilmiş hafif, çok işlevli kompozitler geliştirmeye odaklanmıştır (Kalaycı ve İrez, 2025). Buna ek olarak, nano-enerjik malzemelerin yanma verimliliğini artırdığı, yanma hızlarını kontrol etmeye yardımcı olduğu ve hassasiyeti azaltabildiği; dolayısıyla patlayıcılar, itici gazlar ve roket tahrik sistemlerinin performansını iyileştirdiği bildirilmektedir (Jena ve Gupta, 2019).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Polimer kompozitler, günümüzün ve geleceğin savunma ihtiyaçlarını karşılamada stratejik bir malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Hem termoset hem de termoplastik matrisler; cam, karbon, aramid ve nano takviyeler gibi destekleyici içeriklerle bir araya gelerek, yüksek özgül mukavemet, enerji yutma, korozyon dayanımı ve tasarım açısından esneklik sunmaktadır. Bu çok yönlü özellikler, hafiflik gerektiren platformlardan kişisel koruyucu ekipmanlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde somut performans kazanımları sağlamaktadır.

Üretim yöntemleri, el ile yerleştirme, RTM, filament sarma, pultrüzyon ve otoklav kalıplamaya kadar her biri farklı ölçek, bütçe ve performans gereksinimlerine hitap etmektedir. Doğru üretim ve malzeme eşleştirmesi, istenen mekanik, termal, EMI özelliklerinin tutarlı biçimde elde edilmesinde belirleyici olacaktır. Bununla birlikte, termosetlerin geri dönüşüm zorlukları, termoplastiklerin işlemede enerji maliyetleri, takviye matris ara yüzey optimizasyonu ve çevresel bozunma gibi konular hâlen çözüm bekleyen alanlardır. Bu zorluklar, sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm açısından da ele alınmalıdır.

Savunma sanayi perspektifinden bakıldığında, polimer kompozit teknolojilerindeki ilerlemeler, hafif zırh, yapısal bileşenlerin ağırlık optimizasyonu, EMI/EMC koruması ve nano enerjik malzemler aracılığıyla itici güç sistemlerinde performans artışı gibi doğrudan faydalar sunmaktadır. Bununla birlikte, güvenilirlik, çevresel dayanım, test ve doğrulama metotları ile malzeme tedarik zinciri güvenliği gibi sistemsel konular da eş zamanlı olarak güçlendirilmelidir.

Sonuç olarak, polimer kompozitlerin savunma uygulamalarında daha geniş ve güvenilir biçimde kullanılabilmesi için çok disiplinli bir yaklaşımla malzeme bilimi, üretim teknolojileri, test doğrulama prosedürleri ve sürdürülebilirlik stratejilerinin aynı zamanda geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecek araştırmaların odak noktaları, geri dönüştürülebilir yada onarılabilir termoset alternatifleri, yüksek performanslı ancak ekonomik termoplastikler, takviye matris etkileşimlerinin nano ölçüde kontrolü, entegre yapısal fonksiyonel tasarımlar ve üretim ölçeklenebilirliğinin iyileştirilmesi olmalıdır. Bu yönde atılacak adımlar, savunma sistemlerinin etkinliğini ve dayanıklılığını artırırken aynı zamanda maliyetlerini düşürmeye de katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

Abenojar, J., Aparicio, G. M., Butenegro, J. A., Bahrami, M., ve Martínez, M. A. (2024). Decomposition kinetics and lifetime estimation of thermoplastic composite materials reinforced with rCFRP. Materials, 17(9), 2054. https://doi.org/10.3390/ma17092054

Alshammari, B. A., Alsuhybani, M. S., Almushaikeh, A. M., Alotaibi, B. M., Alenad, A. M., Alqahtani, N. B., & Alharbi, A. G. (2021). Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced

thermoplastic composites. Polymers, 13(15), 2474. https://doi.org/10.3390/polym13152474
Arabpour A, Shockravi A, Rezania H, Farahati R.(2020). Investigation of anticorrosive properties of novel silane-functionalized polyamide/GO nanocomposite as steel coatings. Surf Interfaces 2020;18:100453
Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. Butterworth-Heinemann.
Bag, D. S., Kumar, A., Bansiwal, J. Kr., Lal, G., Tripathi, D., & Namburi, E. P. (2024). Polymer Matrix Composites (PMCs) for Defence Applications (pp. 1–37). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9795-4_1
Barra, G., Guadagno, L., Raimondo, M., Santonicola, M.G., Toto, E., Vecchio Ciprioti, S. A. (2023). Comprehensive Review on the Thermal Stability Assessment of Polymers and Composites for Aeronautics and Space Applications. Polymers 2023, 15, 3786. https:// doi.org/10.3390/polym15183786
Bellais, R. (2013). Technology and the Defense Industry: Real Threats, Bad Habits, or New (Market) Opportunities? Journal of Innovation Economics & Management, 12(2), 59–78.
Bhatnagar, A. (2016). Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications. Woodhead Publishing.
Borda, F., Ingarao, G., Ambrogio, G., & Gagliardi, F. (2024). Cumulative energy demand analysis in the current manufacturing and end-of-life strategies for a polymeric composite at the component level. Journal of Cleaner Production, 449, 136152. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136152
Briggs, J. (1991). Hot Pressing: An Overview (pp. 219–222). Pergamon. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-034720-2.50063-0
Bukvić, M., Milojević, S., Gajević, S., Momčilo, Đ., & Stojanović, B. (2025). Production Technologies and Application of Polymer Composites in Engineering: A Review. Polymers, 17(16), 2187. https://doi.org/10.3390/polym17162187
Cahayaputri, O. T., Murniati, R., Aritonang, S., ve Oktaviana, A. T. (2023). A review of polymer composite materials in bulletproof vest to defense sector. https://doi.org/10.58524/app.sci.def.v1i3.296
Calabrese, E., Raimondo, M., Catauro, M., Vertuccio, L., Lamberti, P., Raimo, R., Tucci, V., ve Guadagno, L. (2023). Thermal and Electrical Characterization of Polyester Resins Suitable for Electric Motor Insulation. Polymers, 15(6), 1374. https://doi.org/10.3390/polym15061374
Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.
Cosse, R.L., van der Most, T., Voet, V.S.D., Folkersma, R., Loos, K. (2025). Improving the Long-Term Mechanical Properties of Thermoplastic Short Natural Fiber Compounds by Using Alternative Matrices. Biomimetics 2025, 10, 46. https://doi.org/10.3390/ biomimetics10010046
Czech, K., Oliwa, R., Krajewski, D., Bulanda, K., Oleksy, M., Budzik, G., ve Mazurkow, A. (2021). Hybrid Polymer Composites Used in the Arms Industry: A Review. Materials, 14(11), 3047. https://doi.org/10.3390/MA14113047
Deveci, C. N., Çapar, F. N., ve Tezel, G. B. (2025). Recent advances in carbon-based silicone composites for EMI shielding in defense ındustries: A Review.

International Advanced Researches and Engineering Journal, 9(2), 130–145. https://doi.org/10.35860/iarej.1632633

Doblies, A., Feiler, C., Würger, T., Schill, E., Meißner, R. (2021). Mechanical degradation estimation of thermosets by peak shift assessment: General approach using infrared spectroscopy . Polymer 221 (2021) 123585

Dushin, M. I., Khrul'kov, A. V., ve Mukhametov, R. R. (2014). The investigation of technological parameters of autoclave molding of parts made from polymer composite materials. Polymer Science Series D, 7, 196-200. https://doi.org/10.1134/S1995421214030058

Elkington, M. P., Bloom, D., Bloom, D., Ward, C., Chatzimichali, A., ve Potter, K. D. (2015). Hand layup: understanding the manual process. 1(3), 138–151. https://doi.org/10.1080/20550340.2015.1114801

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in Polymer Science, 37(11), 1552–1596. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

Gore, P., Kandasubramanian, B. (2018). Functionalized Aramid Fibers & Composites for Protective Applications: A Review, Industrial & Engineering Chemistry Research 57(49), DOI:10.1021/acs.iecr.8b04903

Grum, J. (2007). Book Review: Fundamentals of Composites Manufacturing, Materials, Methods and Applications, International Journal of Microstructure and Materials Properties, DOI:10.1504/IJMMP.2007.014308

Hannemann, C., Weintraut, D., Löpitz, D., ve Lies, C. (2021). Pultrusion method and pultrusion device for producing curved composite profiles.

Harmer, M. P. (1991). Hot Pressing: Technology and Theory (pp. 222–225). Pergamon. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-034720-2.50064-2

Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review, Composite Structures 262, 113640

Jena, S., ve Gupta, A. (2019). Nano-energetic Materials for Defense Application (pp. 81–108). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2_4

Kalayci, M., ve İrez, A. B. (2025). Development of Hybrid Polymer Composites for Electronic Warfare Casings and Investigation of Electromagnetic Interference Shielding Performance. Polymer Composites. https://doi.org/10.1002/pc.70306

Karsli, M., Sert, Y., ve Küçükömeroğlu, T. (2020). Tabanca Gövdeleri İçin Polimer Kompozit Malzeme Geliştirilmesi. 2(38), 131–157. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1356158

Kausar, A. (2019). Scope of Polymer/Graphene Nanocomposite in Defense Relevance: Defense Application of Polymer/Graphene (pp. 296–315). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7838-3.CH010

Kausar, A., Ahmad, I., & Bocchetta, P. (2022). High-Performance Corrosion-Resistant Polymer/Graphene Nanomaterials for Biomedical Relevance. Journal of Composites Science, 6(12), 362. https://doi.org/10.3390/jcs6120362

Korolev, A., Mishnev, M., Vatin, N.I. (2021). Ignatova, A. Prolonged Thermal Relaxation of the Thermosetting Polymers. Polymers 2021, 13, 4104. https://doi.org/ 10.3390/polym13234104

Mei, J., Liu, C., Yan, Y., Deng, D., Zhang, M., Zhang, X., & Xiao, L. (2009). High-precision composite steel plate oval-shaped corner guard cold compression molding method.

Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., & Akhatov, I. (2021). Thermoplastic Pultrusion: A Review. Polymers, 13(2), 180. https://doi.org/10.3390/POLYM13020180

Monsores, K. G. de C., Weber, R. P., & Monteiro, S. N. (2020). Influence of Degradation on the Ballistic Behavior of Aramid Fabric Reinforced Polymeric Armor Composites. Materials Science Forum, 1012, 43–48. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.1012.43

Morampudi, P., Namala, K.K., Gajjela,Y.K., Barath, M., Prudhvi, G. (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites, Materials Today: Proceedings 43 (2021) 314–319

Morgan, P. (2005). Carbon fibers and their composites. CRC Press.

Morici, E.; Dintcheva, N.T. (2022). Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity. Polymers 2022, 14, 4153. https://doi.org/ 10.3390/ polym14194153

Oladele, I. O., Omotosho, T.F., Adediran, A.A. (2020). Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Advanced Applications. Journal of Composite Materials, 8834518, 12. https://doi.org/10.1155/2020/8834518

Oliveira, I. R., Amico, S. C., Souza, J. Á., ve de Lima, A. G. B. (2013). Resin transfer molding process: A numerical and experimental investigation. International Journal of Multiphysics, 7(2), 125–134. https://doi.org/10.1260/1750-9548.7.2.125

Osswald, T. A., Turng, L.-S., ve Gramann, P. (2008). Injection Molding Handbook (3rd ed.). Hanser. pp 61-62

Park, S. J. (2018). Carbon Fibers (2nd ed.). Springer.

Post, W., Susa, A., Blaauw, R., Molenveld,K., Knoop, R.(2020) A Review on the Potential and Limitations of RecyclableThermosets for Structural Applications, Polymer Review, Vol. 60, No. 2, 359–388https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1673406

Purnomo, H., Soemardi, T. P., Budiono, H. D. S., Wibowo, H., ve Ibadi, M. (2023). The filament winding method's finishing process impact on high-fidelity specimens: homogenity of density, fiber volume fraction, outer surface roughness and tensile strength. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288025

Rajendran, S., Palani, G., Kanakaraj, A., Shanmugam, V., Veerasimman, A., Gądek, S., Korniejenko, K., ve Marimuthu, U. (2023). Metal and Polymer Based Composites Manufactured Using Additive Manufacturing—A Brief Review. Polymers, 15(11), 2564. https://doi.org/10.3390/polym15112564

Rashid, A.B., Hoque, M. E. (2022). Polymer nanocomposites for defense applications Advanced Polymer Nanocomposites Science, Technology and Applications Woodhead Publishing in Materials , Pages 373-414

Reis, J. P., de Moura, M., ve Samborski, S. (2020). Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair composites structures: A review. Materials, 13(24), 5832. https://doi.org/10.3390/ma1

Saba, N., Jawaid, M.(2018). A review on thermomechanical properties of polymers and fibers reinforced polymer composites. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 67 (2018) 1–11

Seers, B., Tomlinson, R., Fairclough, P. (2021). Residual stress in fiber reinforced thermosettingcomposites: A review of measurement techniques. Polymer Composites. 42:1631–1647

Sekido, T., Kitaoka, K., Odani, H., Nishiyama, S., ve Shimizu, M. (2003). Method of rtm molding. https://www.freepatentsonline.com/EP2644365.html

Siengchin, S. (2023). A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments. Defence Technology 24 (2023) 1-17

Sivasubramanian, P. Mayandi, K. Arumugaprabu, V. Rajini, N. ve Rajesh, S. (2021)History of Composites and Polymers Kalasalingam Academy of Research and Education, Polymer-Based Composites Book Chapter, DOI: 10.1201/9781003126300-1

Srivastava, J. N., Pandey, V., & Namburi, E. P. (2024). Polymeric Materials for Defence Stores in Extreme Cold Weather (pp. 93–131). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9795-4_4

Tiwari, A. S., & Yang, S. (2023). Energy Consumption Modeling of 3D-Printed Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Parts. Polymers, 15(5), 1290. https://doi.org/10.3390/polym15051290

Tomlinson, W. J., ve Holland, J. R. (1994). Pultrusion and properties of unidirectional glass fibre-polypropylene matrix composites. Journal of Materials Science Letters, 13(9), 675–677. https://doi.org/10.1007/BF00271231

Valente, M., Rossitti, I., Sambucci, M. (2023)Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter. Polymers 2023, 15, 242. https://doi.org/10.3390/ polym15010242

Vengatesan, M. R., Varghese, A.M. Mittal, V. (2018). Thermal properties of thermoset polymers. In H. Dodiuk & S. H. Goodman (Eds.), Handbook of thermoset plastics (4th ed., pp. 59–89). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00003-4

Wang, B., Fan, S., Chen, J., Yang, W., Liu, W., Li, Y. (2023). A review on prediction and control of curing process-induced deformation of continuous fiber-reinforced thermosetting composite structures. Composites: Part A 165 (2023) 107321

Wang, S., Chen, M., ve Cao, K. (2022). Polymer Composite with Enhanced Thermal Conductivity and Insulation Properties through Aligned Al_2O_3 Fiber. Polymers, 14(12), 2374. https://doi.org/10.3390/polym14122374

Weinert, K., & Kempmann, C. (2004). Cutting Temperatures and Their Effects on the Machining Behaviour in Drilling Reinforced Plastic Composites. Advanced Engineering Materials, 6(8), 684-689. https://doi.org/10.1002/adem.200400025

Wu, C., Xu, F., Wang, H., Liu, H., Yan, F., Ma, C. (2023) Manufacturing Technologies of Polymer Composites—A Review. Polymers 2023, 15, 712. https://doi.org/ 10.3390/polym15030712

Xue, s., Yu, Z., Tang, Z., Liu, Y., 2025. Simultaneous reinforcement and toughening methods and mechanisms of thermosets: a review. Materials Horizons. DOI: 10.1039/d5mh01385b

Young, W.B. (1994). A simplified flow model for resin transfer molding of polymer composites. Journal of Advanced Materials, 25(3), 60–64.

Yu, K., Taynton, P., Zhang, W., Dunn, M. L., ve Qi, H. J. (2014). Reprocessing and recycling of thermosetting polymers based on bond exchange reactions. RSC Advances, 4(19), 10108-10117.

Zeyrek, B. Y., Aydogan, B.,Dilekcan, E., Ozturk, F. (2022). Review of Thermoplastic Composites in Aerospace Industry. in International Journal on Engineering Technologies and Informatics. Volume 3 Issue 1

Zheng S, Bellido-Aguilar DA, Hu J, Huang Y, Zhao X, Wang Z. (2019). Waterborne bio-based epoxy coatings for the corrosion protection of metallic substrates 2019/ 11/01/. Prog Org Coat 2019;136:105265

Üretim ve İnceleme Faaliyetlerinin Ayrık Zamanlı, İnceleme Süresinin Stoksuzluğu Elimine Süresinden Büyük Olduğu ve Stoksuzluğa İzin Veren Bir Ekonomik Üretim Miktarı Modeli

Abdullah EROĞLU[1]
Harun SULAK[2]

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, abdullaheroglu@sdu.edu.tr, Isparta, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-3035-8682
2 Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, harunsulak@sdu.edu.tr, Isparta, Türkiye. ORCID No: 0000-0001-8286-1813
Sorumlu yazar: harunsulak@sdu.edu.tr

ÖZET

Stok kontrol modellerinde üretimde belli bir oranda kusurlu ürün üretilmesi durumu üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır. Ekonomik Üretim Miktarı modelleri ile ilgili kusurlu ürün durumunu ele alan çalışmalarda; belli bir oranda kusurlu üretimin olması, kusurlu üretim oranının belli bir olasılık dağılımına uyması; kusurlu ürünlerin de kendi içinde hurda, tamir edilebilir ve defolu (düşük fiyattan satılması) gibi varsayımlar göze çarpmaktadır. Literatürdeki kusurlu ürün içeren EPQ modellerindeki varsayımlardan biri üretim ve inceleme işlemlerinin eş zamanlı olmasıdır. Üretim sırasında ortaya çıkan kusurlu ürünleri sağlam ürünlerden ayırma sürecindeki ayırma hızının, üretim hızından büyük veya küçük olma durumlarına göre yapılan Ekonomik Üretim Miktarı modelleri ile ilgili çalışmalar literatürde yer bulmuştur. Wee vd. (2014) üretim süresinin, ertelenen talebi elimine etmek için gerekli süreden büyük ve küçük olduğu durumları ele alan farklı Ekonomik Üretim Miktarı modelleri önermişlerdir. Modellerinde maksimum stoksuzluğa ulaşıldığı anda üretim, muayene ve stoksuzluğu elimine faaliyetleri başlamaktadır. Bu çalışmanın ise önceki çalışmalardan farkı üretim işlemi ile inceleme işleminin ayrık zamanlı olması varsayımının ele alınmasıdır. Yani, üretilen ürünlerin incelenmesi ve stoksuzluğun elimine edilme süreci üretim faaliyetinin tamamlanmasından sonra başlamaktadır. Bu varsayımın temel amacı üretimdeki işgücü ile inceleme işleminin yapılmasıdır. İşgücünün verimli kullanımı açısından bu varsayım önemlidir. Çalışmanın diğer bir varsayımı ise inceleme süresinin stoksuzluğu elimine süresinden büyük olmasıdır. Oluşturulan modelin işleyişi örneklerle açıklanmış ve duyarlılık analizleri ile değişen parametrelerin optimal sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnceleme Süresi, Ekonomik Üretim Miktarı Modeli, Stoksuzluk, Kusurlu Ürün, Yeniden İşleme.

GİRİŞ

Klasik Ekonomik Üretim Miktarı modellerindeki temel varsayımlardan biri, üretimde belli bir oranda kusurlu ürün üretilmesidir. Üretim sürecinde, hatalı ürünler yeniden işlenerek veya onarılarak kusursuz hale getirilebilir veya daha düşük bir fiyata defolu olarak satılabilir veya tamamen kullanılamaz hale gelenler hurdaya çıkarılabilir. Bu konudaki çoğu çalışmada, optimum ekonomik üretim miktarının bulunması, sürecin optimum izleme ve bakım planlamasıyla birlikte değerlendirilir. Ekonomik üretim miktarı modellerinde, üretim sürecinde ortaya çıkan kusurlu ürünler belli bir inceleme sürecinden geçirilerek tespit edilir. Bu süreçte geçen sürenin üretim süresinden kısa veya uzun olması farklı modellerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır.

Rosenblatt ve Lee (1986), üretim sırasında rastgele değişken bir süre boyunca kusursuz ürünler üretildiği, ancak daha sonra belirli bir oranda hatalı ürünler üretmeye başlandığı ve üretim belirli bir maliyetle devam ederken hatalı ürünlerin yeniden işlendiği varsayımını ele almışlardır. Salameh ve Jaber (2000), hatalı ürünler için bir EOQ modeli önermiştir. Alınan partilerin belirli bir oranda hatalı ürün içerdiğini ve hata oranının rastgele ve düzgün bir dağılım izlediğini varsaymışlardır. Modelde, %100 muayene süreci gerçekleştirilmekte ve tespit edilen hatalı ürünler daha düşük bir fiyattan satılmaktadır. Salamah ve Jaber (2000) modeli üzerine literatürde birçok çalışma yapılarak önerdikleri model yeniden ele alınarak geliştirilmiştir. Goyal ve Cardenes-Baron (2002), Salameh ve Jaber'in modeli üzerinde çalışarak ve optimum sipariş miktarını bulmak için uygulanması daha kolay ve hesaplama adımları daha basit olan yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Papachristos ve Konstantaras (2006), Salameh ve Jaber'in modelini yeniden ele alıp elde edilen modellerde stok tükenmesi durumuna düşmemesini sağlamak için gerekli ve yeterli koşulları ortaya koymuşlartdır. Maddah ve Jaber (2008), Salameh ve Jaber'in modelindeki eksiklikleri ve hataları düzeltmişlerdir. Khan vd. (2011), Salameh ve Jaber'in modelindeki hatalı ürünlerle EOQ modelinin uzantılarını özetlediler. Hayek ve Salameh (2001) hatalı üretim durumunu incelemişler, kusurlu ürün oranının tekdüze dağılım izlediğini ve kusurlu ürünlerin sağlam haline gelmesi için yeniden işlendiğini varsaymışlardır. Geliştirdikleri model talebin sonradan karşılanmasına ve stoksuzluğa izin vermektedir. Chan vd. (2003) kusurlu üretim durumunda üç farklı varsayım altında ekonomik üretim miktarı modelleri önermişlerdir. Modellerinde üretilen ürünler %100 incelemeye tabi tutulmakta ve üretilen ürünler; kusursuz ürün, kusurlu ürün ve defolu ürün olarak ayrılmaktadır. Konstantaras vd. (2007) parti büyüklüğü ve muayene politikasının incelendiği bir envanter modeli geliştirmiştir. Modelde sipariş edilen parti, talebi karşılamak için kullanılamayacak rastgele bir oranda kusurlu ürün içermektedir. Bu ürünler talebi karşılamak için satış için yeniden işlenebilmekte veya tek seferde indirimli fiyattan satılabilmektedir. Taleizadeh vd. (2014) hurda ve yeniden işlenebilir ürünler için kusurlu üretim sürecini incelemiştir. Stok modellerinde talebin sonradan karşılanması ve stoksuzluğa da izin verilmiştir. Ouyang vd. (2002), Cárdenas-Barrón (2009) ve Eroğlu ve Özdemir (2007) stoksuzluk durumu altında Ekonomik Sipariş Miktarı modellerini incelemişlerdir. Sarkar vd. (2014) yeniden işleme süreci ve talebin sonradan karşılanması durumunda kusurlu ürünler için envanter modelleri geliştirmişlerdir. Geliştirilen modellerde, kusurlu ürün oranı olasılık dağılımları tekdüze, üçgensel ve beta olan bir rastgele değişkendir. Moussawi-Haidar vd. (2016) talebin sonradan karşılanmasına izin verilmeyen ve defolu ürünlerin inceleme süreci sonunda daha düşük fiyatlardan satıldığı veya defolu ürünlerin yeniden işlendiği farklı ekonomik üretim modelleri geliştirmişlerdir. Stoksuzluğa izin verilmeyen modelde üretim döneminde, düşük inceleme hızı altında sadece talebi karşılayacak kadar sağlam ürünün

elde edilmesini ele almışlar, normal inceleme faaliyetinin ise üretim bittikten sonra yapıldığı varsayımını yapmışlardır. Nobil vd. (2020) defolu ürünler için talebin sonradan karşılanmasına izin veren bir model geliştirmişlerdir. Sağlam ürünleri yüksek veya düşük kaliteli olarak, defolu ürünleri ise yeniden işlenebilir veya hurda olarak sınıflandırmışlardır. Karagül ve Eroğlu (2022) yeniden işlenebilir defolu ürünler için bir stok kontrol modeli önermişlerdir. Modelde talebin sonradan karşılanmasına izin verilmekte, tüm defolu ürünler yeniden işlenebilmekte ve yeniden işleme sonrasında sağlam ürünlere dönüşmektedir.

Literatür incelendiğinde, defolu ürün, inceleme ve yeniden işleme süreciyle ilgili tüm çalışmalarda, izin verilen stoksuzluk durumu altında, sağlam ve kusurlu ürünleri ayırmak için gereken inceleme süresinin, talebin sonradan karşılanması için gereken süreden yeterince uzun olduğu varsayılmaktadır. Wee vd. (2014) üretim süresinin, stoksuzluğu elimine etmek için gerekli süreden büyük ve küçük olduğu durumları ele alarak iki farklı Ekonomik Üretim Miktarı modeli önermişlerdir. Geliştirdikleri modellerde maksimum stoksuzluğa ulaşıldığı anda üretim, muayene ve stoksuzluğu elimine faaliyetleri başlamaktadır.

Bu çalışmanın ise önceki çalışmalardan farkı üretim işlemi ile inceleme işleminin ayrık zamanlı olması varsayımını ele almasıdır. Yani, üretilen ürünlerin incelenmesi ve stoksuzluğu elimine faaliyetleri üretim faaliyetinin tamamlanmasından sonra başlamaktadır. Bu varsayımın temel amacı üretimdeki işgücü ile inceleme işleminin yapılmasıdır. İşgücünün verimli kullanımı açısından bu varsayım önemlidir. Çalışmanın diğer bir varsayımı ise inceleme süresinin stoksuzluğu elimine süresinden büyük olmasıdır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında modelin matematiksel olarak elde edilişi ele alınacak modelin geçerliliği için sayısal örnekler verilecektir. Modelde kullanılan temel değişkenlerdeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile incelenecektir.

MODELİN ELDE EDİLİŞİ

Tek kalem ürün; α üretim hızı ile üretilmektedir. Üretim bittiğinde maksimum stoksuzluğa ulaşılmaktadır. Daha sonra x hızı ile muayene (inceleme) yapılarak kusurlu ürünler ile sağlam ürünler birbirinden ayrılmaktadır. Stoksuzluğu elimine süresinin inceleme süresinden küçük olduğu varsayılmaktadır. Üretim döneminde inceleme işlemi olmadığı

varsayımından hareketle talep karşılanamamakta dolayısıyla stoksuzluk oluşmaktadır.

Geliştirilen matematiksel modelin notasyonları ve yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

Notasyonlar

Önerilen modelde aşağıdaki simgeler kullanılmaktadır:

q Bir çevrim süresindeki üretim miktarı

w İzin verilen maksimum stoksuzluk miktarı

β Birim zamandaki talep hızı

α Birim zamandaki üretim hızı

α_1 Birim zamandaki tamir hızı

x Birim zamandaki inceleme oranı

p Kusurlu ürün oranı

K Hazırlık maliyeti

h Sağlam ürünler için birim stok bulundurma maliyeti

h_1 Kusurlu ürünler için birim stok bulundurma maliyeti

b Birim stoksuzluk maliyeti

c Birim üretim maliyeti

d Birim inceleme maliyeti

c_r Birim tamir (yeniden işleme) maliyeti

$E[.]$ Beklenen değer operatörü

$t_1 + t_2$ Stoksuzluğa izin verilen süre

t_2 Bir çevrimde q miktar ürün elde etmek için gerekli süre

t_3 Stoksuzluğu elimine etmek için gerekli süre

$t_3 + t_4$ q miktar ürünü incelemek için gerekli inceleme süresi

t_5 pq miktar kusurlu ürünü tamir etmek için gerekli tamir süresi

t_6 z_3 miktar sağlam ürün ile talebi karşılamak için gerekli süre

z_1 Stoksuzluğun elimine edildiği andaki stok miktarı (sağlam ve kusurlu ürünlerden oluşmaktadır)

z_2 İnceleme işleminin bittiği andaki stok miktarı (sadece sağlam ürünlerden oluşmaktadır)

z_3 Tamir işleminin bittiği andaki stok miktarı (sadece sağlam ürünlerden oluşmaktadır)

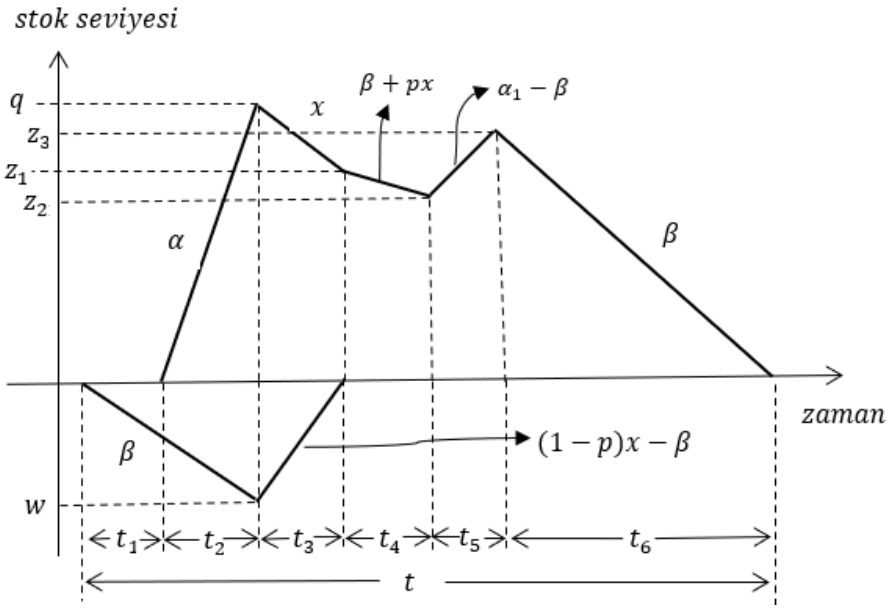
z_4 İnceleme işleminin bittiği andaki stok miktarı (sadece kusurlu ürünlerden oluşmaktadır)

Varsayımlar

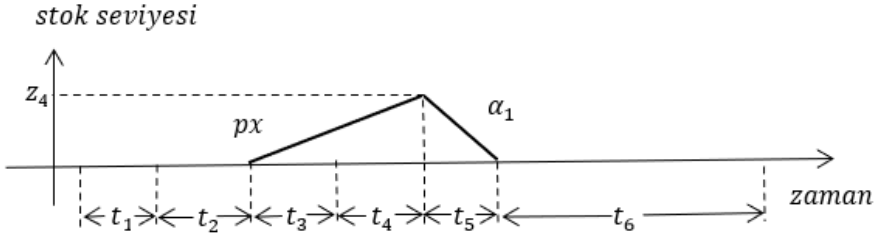
Önerilen modelin varsayımları şu şekildedir:

- Talep, tamir (yeniden işleme) ve inceleme oranları sabit ve bilinmektedir.
- Üretim süresince p oranında kusurlu ürün ortaya çıkmaktadır. Kusurlu ürün oranı, p olasılık fonksiyonu $f(p)$ olan rassal bir değişkendir.
- Üretim bittikten sonra üretilen ürünler birim zamanda x inceleme oranı ile %100 muayene sürecinden geçirilmektedir. İnceleme süreci sonunda ortaya çıkan kusurlu ürünler α_1 tamir hızı ile yeniden işlenmekte ve sağlam ürünler haline gelmektedir.
- Tamir veya yeniden işleme hızı, talep hızından büyüktür.
- Stoksuzluğa izin verilmektedir. İzin verilen stoksuzluk miktarı tamamen sağlam ürünlerden karşılanmaktadır. İnceleme süresi sonunda, ortaya çıkan kusurlu ürünler yeniden işlenerek sağlam ürün haline gelmektedir.
- İnceleme veya muayene süresi, sonradan karşılanacak talebi elimine etmek için gereken süreden daha uzundur.

Sağlam ve kusurlu ürün stoklarının grafiği sırasıyla Şekil 1 ve 2 ile verilmektedir.



Şekil 1: Kusursuz ürünler için stok seviyesinin zamana göre değişimi



Şekil 2: Kusurlu ürünler için stok seviyesinin zamana göre değişimi

Önerilen modelin formülasyonu için Şekil 1 ve Şekil 2 kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir:

$t_1 + t_2$ süresi boyunca β talep hızı ile w miktar stoksuzluk oluşmakta ve t_2 üretim süresi boyunca α üretim hızı ile q miktar ürün üretilmektedir. Buradan;

$$t_1 + t_2 = \frac{w}{\beta} \tag{1}$$

$$t_2 = \frac{q}{\alpha} \tag{2}$$

$$t_1 = \frac{w}{\beta} - t_2 = \frac{w}{\beta} - \frac{q}{\alpha} \tag{3}$$

eşitlikleri yazılabilir.

t_3 süresi boyunca x muayene (inceleme) hızı ile kusurlu ile sağlam ürünler birbirinden ayrılmaktadır. İnceleme işlemindeki sağlam ve kusurlu ürün hızları sırasıyla $(1-p)x$ ve px dir. Bu dönem boyunca sağlam ürünlerden β hızı ile talep karşılanmakta, $[(1-p)x-\beta]$ hızı ile stoksuzluk elimine edilmekte ($(1-p)x = \beta + [(1-p)x-\beta]$) ve px hızı ile kusurlu ürün stoku oluşmaktadır. Dolayısıyla aşağıdaki eşitliklere ulaşılır:

$$t_3 = \frac{w}{(1-p)x-\beta} = \frac{q-z_1}{x} \tag{4}$$

$$z_1 = q - \frac{wx}{(1-p)x-\beta} = q - \frac{w}{1-p-\frac{\beta}{x}} = q - \frac{w}{A} \tag{5}$$

$$A = (1-p-\beta/x) \tag{6}$$

t_4 süresi boyunca x hızı ile inceleme yapılmaktadır, ($x = (1-p)x + px$). Bu dönemde β hızı ile talep karşılanmakta, px hızı ile kusurlu ürün oluşmaktadır. $(t_3 + t_4)$ döneminde q miktar ürün x hızı ile incelendiğinden aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$t_4 = \frac{z_1-z_2}{\beta-px} \tag{7}$$

$$t_3 + t_4 = \frac{q}{x} \tag{8}$$

$$t_4 = \frac{q}{x} - \frac{w}{xA} \tag{9}$$

$$z_2 = Aq - w \tag{10}$$

t_5 döneminde kusurlu ürünler α_1 hızı ile tamir edilerek sağlam ürün haline getirilmektedir.

$$t_5 = \frac{z_3 - z_2}{\alpha_1 - \beta} = \frac{pq}{\alpha_1} \tag{11}$$

$$z_3 = \left[1 - \beta\left(\frac{1}{x} + \frac{p}{\alpha_1}\right)\right] q - w \tag{12}$$

t_6 döneminde z_3 miktar sağlam ürün β hızı ile talep karşılanmaktadır.

$$t_6 = \frac{z_3}{\beta} = \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{x} - \frac{p}{\alpha_1}\right) q - \frac{w}{\beta} \tag{13}$$

$$t = \sum_{i=1}^{6} t_i = \frac{q}{\beta} \tag{14}$$

Böylece bir çevrimdeki toplam maliyet (TC), aşağıdaki eşitlik ile elde edilir:

$$TC = cq + dq + c_r pq + K + h\left[\frac{qt_2}{2} + \frac{(q+z_1)t_3}{2} + \frac{(z_1+z_2)t_4}{2} + \frac{(z_2+z_3)t_5}{2} + \frac{z_3 t_6}{2}\right] + h_1\left[\frac{z_4(t_3+t_4+t_5)}{2}\right] + b\left[\frac{t_1+t_2+t_3}{2}\right] w \tag{15}$$

$$TC = (c + d + c_r p)q + K + \left[\frac{h}{2}\left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{(h_1-h)}{2}\left(\frac{p}{x} + \frac{p^2}{\alpha_1}\right)\right] q^2 - \frac{hwq}{\beta} + \frac{(h+b)}{2}\left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{xA}\right) w^2 \tag{16}$$

Çevrim başına toplam maliyetin beklenen değeri, ETC , (16) eşitliği dikkate alınarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$ETC = \{c + d + c_r E[p]\}q + K + \left[\frac{h}{2}\left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{(h_1-h)}{2}\left(\frac{E[p]}{x} + \frac{E[p^2]}{\alpha_1}\right)\right] q^2 - \frac{hwq}{\beta} + \frac{(h+b)}{2}\left\{\frac{1}{\beta} + \frac{1}{x} E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right]\right\} w^2 \tag{17}$$

Birim zamandaki toplam maliyetin beklenen değeri , $ETCU$, ise çevrim başına beklenen toplam maliyetin, çevrim süresine oranlanması ile aşağıdaki gibi elde edilir:

$$ETCU = \frac{ETC}{t} = \frac{\beta(ETC)}{q} = m_1 + \frac{K\beta}{q} + m_2 q - hw + \frac{m_3 w^2}{q} \tag{18}$$

Burada:

$$m_1 = \beta(c + d + c_r E[p])$$

$$m_2 = \left\{\frac{h}{2}\left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) + \frac{(h_1 - h)\beta}{2}\left(\frac{E[p]}{x} + \frac{E[p^2]}{\alpha_1}\right)\right\}$$

$$m_3 = \frac{(h+b)}{2}\left\{1 + \frac{\beta}{x}E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right]\right\}$$

Optimum üretim ve maksimum stoksuzluk miktarlarını bulmak için; $ETCU$ fonksiyonunun karar değişkenlerine göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlemek gerekir.

$$\frac{\partial ETCU}{\partial w} = -h + \frac{2m_3 w}{q} = 0$$

$$\frac{\partial ETCU}{\partial q} = -\frac{K\beta}{q^2} + m_2 - \frac{m_3 w^2}{q^2} = 0$$

Aşağıdaki optimum üretim ve maksimum stoksuzluk miktarlarına ulaşılır:

$$q = \sqrt{\frac{4m_3 K\beta}{4m_2 m_3 - h^2}} \tag{19}$$

$$w = \sqrt{\frac{K\beta h^2}{4m_2 m_3^2 - m_3 h^2}} \tag{20}$$

Kusurlu ürün oranı (p) rassal değişken olduğundan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$E[z_1] = q - wE\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right] \tag{21}$$

$$E[z_2] = \{1 - E[p] - \beta/x\}q - w \tag{22}$$

$$E[z_3] = \left\{1 - \beta\left(\frac{1}{x} + \frac{E[p]}{\alpha_1}\right)\right\}q - w \tag{23}$$

$$E[z_4] = qE[p] \tag{24}$$

$$E[t_1] = \frac{w}{\beta} - \frac{q}{\alpha} \tag{25}$$

$$E[t_2] = \frac{q}{\alpha} \tag{26}$$

$$E[t_3] = \left\{\frac{1}{x}E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right]\right\}w \tag{27}$$

$$E[t_4] = \frac{q}{x} - \left\{\frac{1}{x} E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right]\right\} w \quad (28)$$

$$E[t_5] = \left\{\frac{1}{\alpha_1} E[p]\right\} q \quad (29)$$

$$E[t_6] = \frac{1}{\beta} E[z_3] \quad (30)$$

Sayısal Örnek

Bir ürüne ilişkin aylık talep miktarı 1000 adet ve aylık üretim kapasitesi 5000 adettir. Üretimdeki kusurlu oranının sürekli tekdüze dağılıma uyduğu bilinmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$f(p) = \begin{cases} 12.5, & 0.02 \le p \le 0.1 \\ 0, & diğer\ durumlarda \end{cases}$$

Aylık inceleme ve tamir kapasiteleri sırasıyla 3000 adet ve 4000 adettir. Birim üretim ve inceleme maliyetleri sırasıyla 50 TL 2 TL'dir. Birim tamir maliyeti 8 TL ve birim stoksuzluk maliyeti 3TL'dir. Kusurlu ve kusursuz ürünlerin birim stok maliyetleri ise sırasıyla 2.5 TL ve 2 TL'dir. Hazırlık maliyeti 8000 TL'dir. Bu durumda parametreler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\beta = 1000, \alpha = 5000, x = 3000, \alpha_1 = 4000, c = 50, d = 2, c_r = 8, b = 3,$$

$$h_1 = 2.5, h = 2, K = 8000$$

Öncelikle yukarıdaki parametreler dikkate alınarak modeldeki beklenen değerlerin bulunması gerekir.

$$E[p] = \int_{0.02}^{0.1} p f(p) dp = 0.06$$

$$E[p^2] = 0.004133$$

$$E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right] = 1.650747$$

Daha sonra (18), (19) ve (20) eşitliklerinden,

$q = 2906.14$ adet

$w = 749.85$ adet

$ETCU = 57985.59$ TL

elde edilir. (21) ve (30) arası denklemlerden aşağıdaki ifadelere ulaşılır:

$$E[z_1] = 1668.32 \qquad E[t_1] = 0.168623$$

$E[z_2] = 1013.21$ $E[t_2] = 0.581227$
$E[z_3] = 1143.98$ $E[t_3] = 0.412604$
$E[z_4] = 174.37$ $E[t_4] = 0.556108$
$E[t_5] = 0.043592$
$E(t) = 2.906137$ gün $E[t_6] = 1.143982$

Duyarlılık Analizi

Bu kısımda önerilen modelin temel parametrelerindeki değişimin optimal değerler ile toplam maliyet üzerindeki etkisi duyarlılık analizi kullanılarak incelenecektir. Bu bağlamda, stok bulundurma, stoksuzluk ve hazırlık maliyetleri ile kusurlu ürün oranının beklenen değerindeki değişmelerin optimal üretim miktarı, izin verilen maksimum stoksuzluk miktarı ve toplam maliyet üzerindeki etkileri analiz edilecektir.

Tablo 1: Sağlam ürünlerin stok bulundurma maliyetindeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi

h	$ETCU$	q	w	Olursuzluk nedeni	Çözüm türü
0.5	55568.02	5181.32	477.46	$E[t_1] < 0$	Olursuz (infeasible)
1.0	56618.18	3866.43	623.52	$E[t_1] < 0$	
1.5	57376.54	3267.62	702.60		Olurlu (feasible)
2.0	57985.59	2906.14	749.85		
4.0	59739.79	2203.92	**812.38**		
8.0	62056.01	1670.84	783.85		
15.0	64921.13	1286.06	691.32		
35.0	70600.39	882.98	524.61		
46.0	73043.69	778.07	471.17		
47.0	73251.27	770.29	467.07	$E[z_1], E[t_4] < 0$	Olursuz
55.0	74841.63	715.51	437.67	$E[z_1], E[z_2], E[t_4] < 0$	
65.0	76681.31	661.12	407.65	$E[z_1], E[z_2], E[t_4] < 0$	

Birim stok maliyeti (h) arttıkça; birim zamandaki beklenen toplam maliyet ($ETCU$) artarken, ekonomik üretim miktarı (q) azalmakta ve maksimum stoksuzluk seviyesi (w) içbükey bir yapı sergilemektedir.

Tablo 2: Kusurlu ürünlerin stok bulundurma maliyetindeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi

h_1	$ETCU$	q	w
2	57970.29	2914.24	751.94
2.5	57985.59	2906.14	749.85
4	58031.25	2882.24	743.68
10	58210.23	2792.21	720.45
40	59032.22	2441.92	630.07
50	59284.18	2351.50	606.74

Kusurlu ürünlerin birim stok maliyeti (h_1) arttıkça; birim zamandaki beklenen toplam maliyet ($ETCU$) artarken, ekonomik üretim miktarı (q) ve maksimum stoksuzluk seviyesi (w) azalmaktadır.

Tablo 3: Stoksuzluk maliyetindeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi

b	$ETCU$	q	w	Olursuzluk nedeni	Çözüm türü
1.0	57460.67	3212.42	1381.46		Olurlu
2.0	57794.82	3010.45	970.96		
3.0	57985.59	2906.14	749.85		
4.0	58109.18	2842.33	611.16		
4.4	58147.25	2823.24	569.11		
4.5	58156.00	2818.89	559.49	$E[t_1] < 0$	Olursuz
5.0	58195.82	2799.25	515.91	$E[t_1] < 0$	
15.0	58491.64	2661.50	201.98	$E[t_1] < 0$	

Birim stoksuzluk maliyeti (b) arttıkça; birim zamandaki beklenen toplam maliyet ($ETCU$) artarken, ekonomik üretim miktarı (q) ve maksimum stoksuzluk seviyesi (w) azalmaktadır.

Tablo 4: Hazırlık maliyetindeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi

K	$ETCU$	q	w
500	53856.40	726.53	187.46
2000	55232.80	1453.07	374.93
5000	56832.55	2297.50	592.81
8000	57985.59	2906.14	749.85
18000	60738.39	4359.21	1124.78
30000	63141.53	5627.71	1452.08
40000	64790.87	6498.32	1676.72
50000	66243.98	7265.34	1874.63

Hazırlık maliyeti (K) arttıkça; birim zamandaki beklenen toplam maliyet ($ETCU$), ekonomik üretim miktarı (q) ve maksimum stoksuzluk seviyesi (w) artmaktadır.

Tablo 5: Kusurlu ürün oranının beklenen değerindeki değişimin optimal değerler üzerindeki etkisi

f	g	$E[p]$	$ETCU$	q	w	Olursuzluk nedeni	Çözüm türü
0.02	0.10	0.06	57985.59	2906.14	749.85		Olurlu çözümler
0.08	0.16	0.12	58510.11	2882.82	715.85		
0.14	0.22	0.18	59039.65	2857.32	677.70		
0.20	0.28	0.24	59575.05	2829.33	634.54		
0.26	0.34	0.30	60117.43	2798.46	585.23		
0.32	0.40	0.36	60668.37	2764.17	528.22	$E[t_1] < 0$	Olursuz çözümler
0.38	0.46	0.42	61230.09	2725.68	461.32	$E[t_1] < 0$	
0.64	0.72	0.68	----------	---------	--------	İllegal fonksiyon*	

$$* \; E\left[\frac{1}{1-p-\beta/x}\right] = \frac{\ln\left(1-f-\frac{\beta}{x}\right)-\ln\left(1-g-\frac{\beta}{x}\right)}{g-f} = \frac{ln(0.027)-ln(-0.0533)}{0.08}$$

Sürekli tekdüze dağılım için kusur oranı aralığı ($g - f = .08$) sabit kalmak şartıyla ortalama kusur oranı ($E[p]$) arttıkça; birim zamandaki beklenen toplam maliyet ($ETCU$) artarken, ekonomik üretim miktarı (q) ve maksimum stoksuzluk seviyesi (w) azalmaktadır.

SONUÇ

Ekonomik sipariş ve üretim miktarı modellerinde hatalı ürün, talebin sonradan karşılanması ve yeniden işleme (kusurlu ürünlerin tamiri) durumları üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Ekonomik üretim miktarı modellerinde, üretim sırasında ortaya çıkan kusurlu ürünler belli bir inceleme sürecinden geçirilerek tespit edilmektedir. Bu süreçte geçen sürenin üretim süresinden veya stoksuzluğu elimine süresinden küçük veya büyük olması farklı modellerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Bu çalışmada, talebin sonradan karşılanmasına izin verilen ve tüm hatalı ürünlerin yeniden işleme sürecinden sonra sağlam ürüne dönüştüğü durum için bir ekonomik sipariş miktarı modeli geliştirilmiştir. Kusurlu ve kusursuz ürünleri ayırmak için tüm ürünler üretim süreci tamamlandıktan sonra incelenir ve taranır. İnceleme süreci tamamlandıktan sonra, hatalı ürünler sabit bir oranda yeniden işlenir. Önerilen modelde, kusurlu ve kusursuz ürünleri ayırmak için gereken inceleme süresinin, ertelenen talebin karşılanma süresinden daha uzun olduğu varsayılmaktadır. Modelin işleyişini göstermek için sayısal bir örnek verilmiş ve optimal değerler elde edilmiştir. Stok bulundurma, stoksuzluk, hazırlık maliyetleri ile kusurlu ürün oranının beklenen değerindeki değişimin optimal değerlere etkisi analiz edilmiştir. Stok bulundurma maliyetleri ile kusurlu ürün oranının beklenen değeri arttıkça toplam maliyet artmakta, optimal üretim ve stoksuzluk miktarı azalmaktadır. Diğer taraftan hazırlık maliyeti arttıkça, toplam maliyet, optimal üretim miktarı ve maksimum stoksuzluk miktarı artmaktadır. Gelecek çalışmalarda ödemelerde gecikmeye izin verilmesi, talebin kısmen ertelenmesi ve öğrenme etkileri dikkate alınarak yeni modeller geliştirilebilir.

Ek 1: ***ETCU fonksiyonunun dışbükeyliğinin ispatı***

Aşağıdaki Hessian (H) matrisi göz önüne alalım:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 ETCU}{\partial q^2} & \frac{\partial^2 ETCU}{\partial q \partial w} \\ \frac{\partial^2 ETCU}{\partial w \partial q} & \frac{\partial^2 ETCU}{\partial w^2} \end{bmatrix}$$

Eğer,

$$[q \quad w] \times H \times \begin{bmatrix} q \\ w \end{bmatrix} > 0, \;\; q, w \neq 0$$

ise $ETCU$ fonksiyonu kesinlikle dışbükeydir.

$H = \begin{bmatrix} \frac{2K\beta + 2m_3 w^2}{q^3} & -\frac{2m_3 w}{q^2} \\ -\frac{2m_3 w}{q^2} & \frac{2m_3}{q} \end{bmatrix}$ ve $[q \quad w] \times H \times \begin{bmatrix} q \\ w \end{bmatrix} = \frac{2K\beta}{q} > 0.$

olduğundan $ETCU$ fonksiyonu kesinlikle dışbükeydir. Dolayısıyla bu fonksiyonu minimum yapan optimal y ve w değerleri tektir.

Ek 2: ***Beklenen değer formülleri***

$$f(p) = \begin{cases} \frac{1}{g-f} & , \quad f \leq p \leq g \\ 0 & , \quad diğer\ durumlar \end{cases}$$ için

$$E[p] = \frac{f+g}{2}$$

$$E[p^2] = \frac{f^2+g^2+fg}{3}$$

$$E\left[\frac{1}{1-p-\frac{\beta}{x}}\right] = \frac{ln\left(1-f-\frac{\beta}{x}\right) - ln\left(1-g-\frac{\beta}{x}\right)}{g-f}$$

REFERANSLAR

Cardenas-Barron, L. E. (2009). Economic production quantity with rework process at a single-stage manufacturing system with planned backorders. *Computers and Industrial Engineering*, 57, 1105-1113.

Chan, W. M., Ibrahim, R.N. ve Lochert, P.B. (2003). A new EPQ model: integrating lower pricing, rework and reject situations. *Production Planning and Control*, 14(7), 588-595.

Eroğlu, A. ve Özdemir, G. (2007). An economic order quantity model with defective items and shortages. *International Journal of Production Economics*, 106 (2), 544-549.

Goyal, S. K. ve Cardenes-Barron, L. E. (2002). Note on: economic production quantity model for items with imperfect quality-a practical approach. *International Journal of Production Economics*, 77, 85-87.

Hayek, P. A. ve Salameh, M. K., (2001). Production lot sizing with the reworking of imperfect quality items produced. *Production Planning and Control*, 12 (6), 584-590.

Karagül N. ve Eroğlu A. (2022). Production lot sizing with quality screening, rework and shortages backordered. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28(4), 604-612.

Khan, M., Jaber, M. Y. ve Bonney, M. (2011). An economic order quantity (EOQ) for items with imperfect quality and inspection errors. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 113–118.

Konstantaras, I., Goyal, S. K. ve Papachristos, S. (2007). Economic ordering policy for an item with imperfect quality subject to the in-house inspection. *International Journal of Systems Science*, 38(6), 473–482.

Maddah, B. ve Jaber, M. Y. (2008). Economic order quantity for items with imperfect quality: revisited. *International Journal of Production Economics*, 112 (2), 808–815.

Moussawi-Haidar L., Salameh M. ve Nasr W. (2016). Production lot sizing with quality screening and rework. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 3242-3256.

Nobil A., Afshar-Sedigh A. ve Afshar-Nadjafi B. (2020). Lot-sizing problem for a defective processing system with categorized items, backordering and pricing policy. *Journal of Revenue Pricing Management*, 19, 255-265.

Ouyang, L. Y., Chen, C. K. ve Chang, H. C. (2002). Quality improvement, setup cost and lead-time reductions in lot size reorder point models with an imperfect production process. *Computer and Operations Research*, 29, 1701-1717.

Papachristos, S. ve Konstantaras, I., (2006). Economic ordering quantity models for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, 100(1), 148-156.

Rosenblatt, M. J. ve Lee, H. L., (1986). Economic production cycles with imperfect production process. *IIE Transactions*, 18, 48-55.

Salameh, M. K. ve Jaber, M. Y. (2000). Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, 64, 59-64.

Sarkar B., Cardenas-Barron L.E., Sarkar M. ve Singgih M.L. (2014). An economic production quantity model with random defective rate, rework process and backorders for a single stage production system. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 423-435.

Taleizadeh, A. A., Cárdenas-Barrón, L. E. ve Mohammadi, B. (2014). A deterministic multi product single machine EPQ model with backordering, scraped products, rework and interruption in manufacturing process. *International Journal of Production Economics*, 150, 9-27.

Wee H.M., Wang W.T., Kuo T.C., Cheng Y.L. ve Huang Y.D., (2014), An Economic Production Quantity Model with non-synchronized screening and rework, Applied Mathematics and Computation, 233, 127-138

Boşanmayı Etkileyen En Önemli Faktörlerin Gri Kurt Optimizasyonu ile Belirlenmesi

Hatem DUMLU[1]
Gürcan YAVUZ[2]
Pınar ÖZEN[3]

1- Arş. Gör.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. hatem.dumlu@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9056-4437
2- Doç. Dr.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. gurcan.yavuz@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-2540-1930
3- Dr.Öğr.Üyesi.; Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. pinar.ozen@dpu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9884-2860

ÖZET

Bu çalışma, boşanma veriseti üzerinde özellik seçimi yapmak amacıyla Gri Kurt Algoritması (GWO - Gray Wolf Optimization) ve k-En Yakın Komşu (k-NN - k-Nearest Neighbors) yöntemlerini kullanmaktadır. Boşanma, toplumsal ve bireysel düzeyde önemli sonuçlar doğuran karmaşık bir olgudur. Bu çalışmada, boşanma olgusunu daha iyi anlamak ve tahmin etmek için önemli özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gri Kurt Algoritması, özellik seçimi sürecinde optimal özellik alt kümelerini belirlemek için kullanılmıştır. Ardından, seçilen bu özellikler k-NN algoritması kullanılarak sınıflandırma işlemlerinde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada boşanma verisetinin 54 tane özelliği 4 özelliğe düşürülerek en iyi sonuçlarda %100 doğruluk değeri elde edilmiştir. Ortalama sonuçlarda ise doğruluk değeri %99.12 bulunmuştur. Ayrıca seçilen özelliklerin tutarlılığının teyiti için aynı veriseti ReliefF, Kruskal Wallis özellik seçme yöntemleri ile denenmiş ve Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN ile seçilen özelliklerin aynı zamanda ReliefF ve Kruskal Wallis yöntemlerinin de yüksek oranlarda tercih ettiği özellikler arasında olduğu görülmüştür. Sonuçlar, GWO'nun etkili bir özellik seçimi aracı olduğunu ve k-NN ile birlikte kullanıldığında boşanma tahmininde yüksek doğruluk oranlarına ulaşıldığını göstermektedir. Bu çalışma, boşanma ile ilgili veri analizi ve tahmin çalışmalarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler – Gri Kurt Optimizasyonu, k-NN, Boşanma, Özellik Seçimi, Relieff, Kruskal Wallis.

GİRİŞ

Boşanma, modern toplumlarda giderek artan bir yaygınlığa sahip olan ve bireyler üzerinde derin etkiler bırakan bir süreçtir (Zahl-Olsen, 2022:60). Evlilik ilişkilerinde yaşanan sorunlar, duygusal ve psikolojik travmaların yanı sıra ekonomik ve sosyal sonuçlar da doğurur. Boşanma sürecini anlamak ve önceden tahmin edebilmek, hem bireyler hem de toplumlar için büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle, boşanma ile ilgili veri analizi ve özellik seçimi üzerine yapılan çalışmalar, hem akademik hem de uygulamalı araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır.Boşanma ile ilgili veri analizi, boşanma nedenlerini, risk faktörlerini ve tahmin modellerini anlamak için kritik bir araçtır. Ancak, boşanma olgusunun çok boyutlu ve karmaşık doğası, bu alanda yapılacak çalışmaların dikkatli bir şekilde tasarlanmasını gerektirir. Özellikle, verisetindeki fazla sayıda değişken arasından hangilerinin boşanma olasılığını en iyi şekilde öngörebileceğini belirlemek önemlidir. Bu noktada, özellik seçimi teknikleri devreye girer.

Özellik seçimi, makine öğrenmesi ve veri madenciliği süreçlerinde kritik bir adım olup, modelin performansını artırmak ve veri boyutunu azaltmak için kullanılır. Özellik seçimi, gereksiz veya alakasız özelliklerin çıkarılmasını sağlayarak, daha hızlı ve daha verimli modellerin oluşturulmasına olanak tanır. Bu çalışmada, özellik seçimi için biyolojik ilhamlı bir algoritma olan Gri Kurt Algoritması (GWO) kullanılmıştır. GWO, avcılık ve sosyal hiyerarşi gibi kurtların doğal davranışlarını taklit ederek, optimal çözüm arayışında etkili bir yöntem sunmaktadır. GWO'nun boşanma veriseti üzerinde uygulanması, hangi özelliklerin boşanma tahmininde en etkili olduğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Gri Kurt Algoritması, doğadaki kurtların avlanma ve lider takip etme davranışlarını model alır. Bu algoritmada, kurtların alfa, beta, delta ve omega olarak sınıflandırılan sosyal hiyerarşisi, çözüm arayışında kullanılır. Alfa kurtlar, en iyi çözümleri temsil ederken, beta ve delta kurtlar alt seviyelerdeki iyi çözümleri ifade eder. Omega kurtlar ise popülasyondaki diğer bireylerdir. Bu hiyerarşik yapı, algoritmanın global ve lokal arama yeteneklerini dengeler ve optimal çözüme ulaşmayı sağlar.

Seçilen özelliklerin sınıflandırma performansını değerlendirmek için k-En Yakın Komşu (k-NN) algoritması kullanılmıştır. k-NN, basit ama etkili bir sınıflandırma algoritması olup, veri noktalarının birbirine olan uzaklıklarını kullanarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirir. k-NN algoritması, özellikle küçük ve orta ölçekli veriseti boyutlarında başarılı sonuçlar verir ve uygulanması kolaydır. GWO ile seçilen özelliklerin k-NN ile değerlendirilmesi, boşanma tahmininde kullanılan modelin doğruluk oranını ve genel performansını ortaya koymuştur. Ayrıca alınan sonuçlar kapsamında seçilen özelliklerin istatistiksel yöntemler ile de tutarlılığı kontrol edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, boşanma veriseti üzerinde GWO ve k-NN kullanarak etkili bir özellik seçimi ve sınıflandırma yöntemi geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, boşanma ile ilişkili verilerdeki önemli özellikler belirlenmiş ve bu özellikler kullanılarak sınıflandırma modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, boşanma tahmininde önemli özelliklerin belirlenmesi ve bu özelliklerin sınıflandırma performansına katkıları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışma, boşanma ile ilgili veri analizi ve tahmin çalışmalarına katkı sağlamayı hedeflemekte olup, gelecekteki araştırmalar için de temel bir referans olma potansiyeline sahiptir.

LİTERATÜR TARAMASI

El-Behadili ve Ku-Muhamud, yargıçların boşanma vakalarında kullanabilecekleri, boşanma üzerindeki gerçek sebepleri belirleyecek bir hibrit sınıflandırıcı tanıtmışlardır (AL-Behadili ve Ku-Mahamud, 2021:1447). Bu sınıflandırıcı parçacık sürü algoritmasını ve k-NN sınıflandırıcısını kullanarak boşanma veriseti üzerinden %99.41'lik doğruluk oranı elde etmiştir. Alınan sonuçlar farklı sınıflandırma yöntemleri ile de karşılaştırılmıştır.

A.Sahle ve M.Yibre boşanmanın öngörülmesinde, erken evlilik sıkıntısının tespitinde ve kişiselleştirilmiş müdahaleler için AdaBoost, Gradient Boosting, Bagging, Stacking, XGBoost ve Random Forest ile Jaya ve Whale Optimizasyonunu içeren bir Hibrit Yaklaşım önermişlerdir(Sahle ve Yibre, 2024:242) .

Moumen ve diğerleri boşanma tahmini ölçeğini (Divorce Predictor Scale-DPS) ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak boşanmayı %96.61 ile tahmin edebilen bir çalışma ortaya koymuşlardır (Moumen vd, 2024:502). Bu çalışmanın vaka formülasyonu ve müdahale planı geliştirme sürecinde aile danışmanlarına ve terapistlere yardımcı olabileceğini öngörmüşlerdir.

Satu ve diğerleri Kaliforniya Üniversitesi Irvine (UCI) makine öğrenimi kaynağından alınan boşanma veriseti üzerinde Shapley Additive Explanations (SHAP) analizi kullanarak özellik seçme yaparak destek vektör makinelerini ile boşanma tahmini yapmışlardır (Satu vd, 2024:49).

MATERYAL ve METOT

Gri Kurt Optimizasyon Algoritması

Gri Kurt Optimizasyon (Grey Wolf Optimization, GWO) algoritması, doğadan esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır ve gri kurtların avlanma davranışlarından ilham alır. GWO, Mirjalili ve arkadaşları tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Mirjalili vd, 2014:46). Algoritmanın temelinde, gri kurtların hiyerarşik sosyal yapıları ve avlanma stratejileri yatmaktadır. Gri kurtlar, avlanma sırasında hiyerarşik bir yapı izlerler. Bu hiyerarşide alfa, beta, delta ve omega olmak üzere dört tür kurt bulunur. Alfa kurtlar liderlik rolünü üstlenir ve kararları verir. Beta kurtlar alfa kurtlara yardım eder ve ikinci sıradadır. Delta kurtlar beta kurtlara yardım ederken, omega kurtlar en alt

sırada yer alır ve diğer kurtların kararlarına uyar. GWO, temel olarak üç ana aşamadan oluşur: avı çevreleme, avlanma ve avı yakalama.

Avı Çevreleme

Kurtlar, avı çevreleyerek avın kaçmasını engeller. Bu davranış, aşağıdaki denklemlerle modellenir:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Burada t mevcut iterasyonu; $\vec{X}_p$ avın konumunu, $\vec{X}(t)$ kurdun konumunu; $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ vektördür ve aşağaıdaki formüllerle hesaplanır.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

Burada $\vec{a}$, lineer olarak 2'den 0'a doğru azalır ve $\vec{r}_1$ ve $\vec{r}_2$ [0, 1] aralığında rastgele vektörlerdir.

Avlanma

Kurtlar, avı yakalamak için alfa, beta ve delta kurtlarının konumlarını referans alarak hareket ederler. Bu hareketler aşağıdaki şekilde modellenir:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (6)$$

Sonrasında, kurtların yeni konumu şu şekilde güncellenir:

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

Avı Yakalama

$\vec{a}$ değeri sıfıra yaklaştıkça, kurtlar avın çevresini daha sıkı sarar ve sonunda avı yakalarlar. Bu, algoritmanın yakınsama kriterini oluşturur.Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasının sözde kodu Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1: Gri Kurt Optimizasyon Algoritması Sözde Kodu

Gri Kurt Popülasyonunu oluştur.
$\vec{a}$, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ 'yi belirle
Her arama ajanının fitness değerini hesapla
$\vec{X}_\alpha$ = en iyi arama ajanı
$\vec{X}_\beta$ = ikinci en iyi arama ajanı
$\vec{X}_\delta$ = üçüncü en iyi arama ajanı
while (t < Maksimum iterasyon sayısı)
    for her arama ajanı için
        Mevcut arama ajanının pozisyonunu denklem (7) ile güncelle
    end for
    $\vec{a}$, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ 'yi güncelle
    Tüm arama ajanlarının fitness değerini hesapla
    $\vec{X}_\alpha$, $\vec{X}_\beta$ ve $\vec{X}_\delta$ 'yı güncelle
    t = t + 1
end while
return $\vec{X}_\alpha$

K-En Yakın Komşuluk

K-En Yakın Komşuluk (K-NN-Nearest Neighbors) denetimli öğrenme yöntemlerinden biri olup, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılan basit ve etkili bir algoritmadır (Samad vd, 2024:2021). KNN'nin çalışması oldukça basittir. İlk olarak, eğitim veri seti bellekte saklanır. Yeni bir veri noktası sınıflandırılmak istendiğinde, bu noktaya en yakın k komşu bulunur. k genellikle tek bir pozitif tam sayı olarak seçilir. Örneğin, k=5 olarak seçilmişse, en yakın 5 komşunun sınıfına bakılır ve en çok görülen sınıf, yeni veri noktasının sınıfı olarak atanır.

KNN'nin en büyük avantajlarından biri, kolay anlaşılabilir ve uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca, parametrik olmayan bir yöntem olduğundan, veri dağılımı hakkında önceden bir bilgi gerektirmez. Bununla birlikte, KNN'nin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, büyük veri kümeleri için hesaplama maliyeti yüksek olabilir ve bellekte çok fazla yer kaplayabilir. Ayrıca, KNN, ölçeklendirilmemiş verilerde düşük performans gösterebilir, bu nedenle verilerin normalleştirilmesi veya standartlaştırılması gerekebilir.

KNN, örüntü tanıma, görüntü işleme ve öneri sistemleri gibi birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır (Larijani vd, 2019:3922; Samad vd 2024:2021). Özellikle, sınıflandırma problemlerinde kolaylığı ve etkili performansı nedeniyle tercih edilir. Ancak, KNN'nin performansı, komşu sayısının (k) ve mesafe ölçüm metodunun doğru bir şekilde seçilmesine

bağlıdır. Doğru ayarlarla, KNN, güçlü ve güvenilir bir sınıflandırma algoritması olabilir.

ReliefF

ReliefF, özellik seçimi algoritmaları arasında yaygın olarak kullanılan ve orijinal Relief algoritmasının geliştirilmiş bir versiyonudur (Xue vd, 2023). ReliefF, özelliklerin sınıflandırma başarısına olan katkılarını değerlendirerek önemli özellikleri seçer. ReliefF veri kümesinden rastgele bir örnek seçer. Seçilen örnek için aynı sınıftan k en yakın komşuyu ve her bir farklı sınıftan k en yakın komşuyu bulur. Seçilen örnek ile aynı sınıftan olan komşuları arasındaki özellik farkları hesaplanır. Eğer özellik farkı küçükse, o özelliğin sınıflandırma başarısına katkısının büyük olduğu varsayılır ve ağırlığı arttırılır. Ya da özellik seçmede kullanılabilir varsayımı ile diğer özellikler arasında başarı puanı (rank score) artırılır. Bu durum veri kümesindeki tüm örnekler tamamlanana kadar devam eder. Ağırlık güncellemeleri tamamlanınca tüm ağırlıklar normalize edilir.

ReliefF Algoritması çok sınıflı problemleri etkin bir şekilde ele alabilir. Özelliklerin bağımsızlığı varsayımını gerektirmez ve gürültülü verilerle çalışabilir. Bunun yanında büyük verileri ile çalışırken maliyeti yüksektir.

Kruskal Wallis

Kruskal-Wallis testi, parametrik olmayan bir istatistiksel test olup, üç veya daha fazla grubun median değerlerinin birbirinden farklı olup olmadığını belirlemek için kullanılır (Choi vd, 2003:1029). ANOVA'nın parametrik olmayan bir versiyonu olarak da düşünülebilir ve verilerin normal dağılım göstermediği veya varyansların homojen olmadığı durumlarda tercih edilir. Kruskal-Wallis testi, özellikle sıralı veya sürekli verilerin analizinde kullanılır.

Kruskal-Wallis testi, bağımsız değişkenin iki veya daha fazla düzeyi olduğunda ve bağımlı değişkenin sürekli veya sıralı olduğu durumlarda kullanışlıdır. Testin avantajları arasında normal dağılım varsayımına gerek olmaması ve küçük örneklem büyüklükleriyle bile uygulanabilmesi bulunur. Kruskal-Wallis testi, deneysel ve gözlemsel araştırmalarda grup medianlarını karşılaştırmak için güçlü bir araçtır ve özellikle parametrik testlerin uygun olmadığı durumlarda tercih edilir.

Veriseti

Çalışmada kullanılan veriseti boşanma veriseti olup 54 özelliği mevcuttur. Boşanmış ve evliliğini devam ettiren çiftler arasında yapılan bir anket çalışmasına dayanmaktadır. Çiftlere ve boşanmış çiftlere 54 farklı soru sorulmuş ve 1'den 5' e kadar puanlanması istenmiştir. 170 kişi üzerinden

yapılan bir çalışma olan boşanma veriseti UCI(UC Irvine Machine Learning Repository)'den elde edilmiştir. Katılımcıların %49'u boşanmış %51'i ise evliliğini sürdüren çiftlerden oluşmuştur. Çiftlere yöneltilen sorular Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1: Boşanma Veriseti Özellikleri

1	Tartışmalarımız kötü bir yöne gittiğinde, özür dileyen biri olduğunda sorun uzamaz.
2	Zor zamanlar olsa bile, farklılıklarımızı görmezden gelebileceğimizi biliyorum.
3	Gerek duyduğumuzda, eşimle tartışmalarımızı baştan alabilir ve düzeltebiliriz.
4	Eşimle tartıştığımda, eninde sonunda onunla iletişime geçmek benim için işe yarar.
5	Eşimle geçirdiğim zaman bizim için özeldir.
6	Evde eşler olarak zamanımız yok.
7	Evde aileden ziyade aynı ortamı paylaşan iki yabancı gibiyiz.
8	Eşimle tatillerimizden keyif alıyorum.
9	Eşimle seyahat etmekten keyif alıyorum.
10	Eşimle hedeflerimizin çoğu ortaktır.
11	Gelecekte,geçmişe baktığımda, eşimle uyum içinde olduğumuzu göreceğimi düşünüyorum.
12	Eşimle kişisel özgürlükler konusunda benzer değerlere sahibiz.
13	Eşimle benzer eğlencelerimiz var.
14	İnsanlar (çocuklar, arkadaşlar vb.) için hedeflerimizin çoğu aynıdır.
15	Eşimle yaşamayı hayal ettiğimiz rüyalar benzer ve uyumludur.
16	Eşimle aşkın ne olması gerektiği konusunda uyumluyuz.
17	Eşimle hayatta mutlu olma konusunda aynı görüşleri paylaşıyoruz.
18	Eşimle evliliğin nasıl olması gerektiği konusunda benzer fikirlere sahibiz.
19	Eşimle evlilikte rollerin nasıl olması gerektiği konusunda benzer fikirlere sahibiz.
20	Eşimle güven konusunda benzer değerlere sahibiz.
21	Eşimin neyi sevdiğini tam olarak biliyorum.
22	Eşim hastayken nasıl ilgilenilmek istediğini biliyorum.
23	Eşimin en sevdiği yemeği biliyorum.
24	Eşimin hayatında ne tür streslerle karşılaştığını anlatabilirim.
25	Eşimin iç dünyası hakkında bilgi sahibiyim.
26	Eşimin temel kaygılarını biliyorum.
27	Eşimin mevcut stres kaynaklarını biliyorum.
28	Eşimin umutlarını ve dileklerini biliyorum.
29	Eşimi çok iyi tanıyorum.
30	Eşimin arkadaşlarını ve onların sosyal ilişkilerini biliyorum.
31	Eşimle tartıştığımda saldırgan hissediyorum.
32	Eşimle tartışırken genellikle "sen hep" veya "sen hiç" gibi ifadeler kullanırım.
33	Tartışmalarımız sırasında eşimin kişiliği hakkında olumsuz ifadeler kullanabilirim.
34	Tartışmalarımız sırasında saldırgan ifadeler kullanabilirim.

35	Tartışmalarımızı hakaret edebilirim.
36	Tartıştığımızda aşağılayıcı olabilirim.
37	Eşimle tartışmam sakin geçmez.
38	Eşimin konuyu açma biçiminden nefret ediyorum.
39	Kavgalar genellikle aniden çıkar.
40	Neler olduğunu anlamadan kavga etmeye başlıyoruz.
41	Eşimle bir şey hakkında konuşurken sakinliğim birden bozulur.
42	Eşimle tartıştığımda bir anda çeker giderim ve tek kelime etmem.
43	Çevreyi biraz olsun yatıştırmak için çoğunlukla susarım.
44	Bazen bir süreliğine evden ayrılmanın benim için iyi olduğunu düşünüyorum.
45	Eşimle tartışmaktansa sessiz kalmayı tercih ederim.
46	Tartışmada haklı olsam bile karşı tarafı üzmemek için susarım.
47	Eşimle tartıştığımda, öfkemi kontrol edememekten korktuğum için sessiz kalırım.
48	Tartışmalarımızda kendimi haklı hissediyorum.
49	Suçlandığım şeylerle ilgim yok.
50	Suçlandığım konuda aslında suçlu olan ben değilim.
51	Evdeki sorunlarda yanlış olan ben değilim.
52	Eşimin yetersizliklerini ona söylemekte tereddüt etmem.
53	Tartışırken, eşimin yetersiz olduğu konuları ona hatırlatırım.
54	Eşimin beceriksizliklerini ona söylemekten korkmam.

DENEYLER VE BULGULAR

Bu bölümde deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan boşanma veriseti, Gri Kurt Optimizasyonu ve kNN sınıflandırıcı ile özellik seçimi yapılarak sınıflandırılmıştır. Kullanılan yöntemin parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Deney ortamı olarak Windows 10 işletim sistemi, Matlab 2022a, Intel i5 13600k işlemci, 32gb DDR5 ram kullanılmıştır.

Tablo 2 : Deney ortamı parametre değerleri

Parametre	Değer
İterasyon Sayısı	20
Bağımsız Çalıştırma Sayısı	20
Populasyon Sayısı	100
k Değeri (k-NN sınıflandırıcı)	5
K Değeri (K-fold validasyonu)	10

Bu çalışma kapsamında kullanılan boşanma verisetinde 54 özellik bulunmaktadır. Veri setindeki 1 ve 5 arasında tamsayı olarak değişen değerler, 0 ve 1 arasında değerlere normalize edilmiştir. 54 özellikten hangi özelliklerin boşanma üzerindeki etkisinin fazla olduğunu saptamak adına Gri Kurt Optimizasyonu ve kNN sınıflandırıcı birlikte kullanılarak özellik seçimi yapılmıştır. Bu sonuçları göre 54 özellik arasından 4 özellik (26,40,42,49) seçilerek en iyi değerlerde %100 doğruluk değeri elde edilmiştir. Ayrıca en iyi değerlerde diğer metriklerde de %100 başarı sözkonusudur. Ortalama değerlerde de %99.12 lik doğruluk değeri göze çarpmaktadır. Bu çalışmayla en iyi değerlerde alınan %100 doğruluk değeri ile El-Behadili ve Ku-Muhamud'in aynı veriseti ile almış olduğu %99.41'lik başarı geride bırakılmıştır (AL-Behadili vd, 2021:1447). Bu çalışma kapsamında alınan sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN ile yapılan özellik seçmenin ardından yapılan sınıflandırma sonuçları

GWO-kNN	Kesinlik	Duyarlılık	Doğruluk	Özgüllük	F1 Skoru
1. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
2. Çalıştırma	1	0.9663	0.9824	1	0.9829
3. Çalıştırma	1	1	1	1	1
4. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
5. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
6. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
7. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
8. Çalıştırma	1	1	1	1	1
9. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
10. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
11. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
12. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
13. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
14. Çalıştırma	1	0.9663	0.9824	1	0.9829
15. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
16. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
17. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
18. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
19. Çalıştırma	1	0.9773	0.9882	1	0.9885
20. Çalıştırma	1	0.9885	0.9941	1	0.9942
En İyi	1	1	1	1	1
Ortalama	1	0.9830	0.9912	1	0.9914
En Kötü	1	0.9663	0.9824	1	0.9829

Bu çalışma kapsamında 54 özellikten sadece 4 özellik seçerek elde edilen %100 doğruluk değeri istatistiksel yöntemlerle de tutarlı olmak zorundadır. Bu sebeple iki farklı özellik seçme yöntemi olan ReliefF ve Kruskal Wallis yöntemleri ile de boşanma veriseti üzerinden özellik seçimi yapılmıştır. Bu yöntemler 54 özelliği önem derecesine göre 1'den 54'e kadar sıralayarak hangi özelliklerin sonuçlara daha fazla etki ettiğini göstermektedir. Bu kapsamda ReliefF yöntemi, bu çalışma kapsamında sınıflandırma için seçilen 4 özellikten biri olan 40. özelliği, 54 özellik arasından ilk sırada, yani en önemli özellik olarak değerlendirmiştir. Benzer şekilde Kruskal Wallis yöntemi 40. özelliği 54 özellik arasından 3. sırada değerlendirmiştir. Bu çalışma kapsamında sınıflandırma için seçilen 4 özellikten bir diğeri olan 26.

Özellik ise ReliefF yöntemi ile 54 özellik arasından 6. Sırada yer almıştır. Kruskal Wallis yöntemine göre ise 26. Özellik üst sıralardadır. Bu çalışma kapsamında sınıflandırma için seçilen 42. ve 49. Özelliklerin de ReliefF ve Kruskal Wallis yöntemleri ile yapılan özellik seçmede üst sıralarda yer aldığı görülmektedir. Bu durum Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN sınıflandırıcı ile yapılan bu çalışmada alınan sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada son yıllarda artan ve toplum bilimcilerin sebeplerini en çok araştırdığı bir konu olan boşanma üzerinde bir özellik seçimi yapılmıştır. Belirlenen veri seti üzerinde Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN sınıflandırıcı ile özellik seçimi yapılmış ve 54 özellikten sadece 4'ü seçilerek en iyi değer olarak %100 doğruluk bulunmuştur. Ortalama doğruluk değeri ise %99.12 bulunmuştur. Sınıflandırma doğruluğu düşünüldüğünde, bu sınıflandırma için seçilen özelliklerin tutarlılığı istatistiksel yöntemlerle de test edilmiştir. Bunun sonucunda Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN sınıflandırıcı ile özellik seçimi sonucu kullanılan dört özellikten (26,40,42,49) birisi olan 40. Özellik, ReliefF ile özellik seçimi yapıldığında 54 özellik arasından 1. Sırada yer alırken, Kruskal Wallis ile özellik seçimi yapıldığında ise 54 özellik arasından 3. sırada yer almıştır. Ayrıca aynı şekilde 26. Özellik ReliefF ile özellik seçimi yapıldığında 54 özellik arasından 6. sırada yer alırken Kruskal Wallis ile özellik seçiminde de üst sıralarda olduğu göze çarpmaktadır. 42. ve 49. Özelliklerin de ReliefF ve Kruskal Wallis kullanılarak yapılan özellik seçimlerinde üst sıralarda yer almaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN sınıflandırıcı ile yapılan özellik seçiminde, alınan %100 başarının istatistiksel yöntemler de uyumlu olduğu ve istatistiksel sonuçlarla çelişmediği görülmüştür.

Yapılan deneylerde Gri Kurt Optimizasyonu ve k-NN sınıflandırıcı ile yapılan özellik seçiminde bazı özelliklerin (40,26 gibi) her zaman seçildiği diğer seçilenlerin ise değişebildiği görülmüştür. Bunun sebebi veri setindeki özelliklerin 1 ile 5 arasında tam sayı değer alarak değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna binaen İstatistiksel yöntemlere bakıldığında da bazı özelliklerin sıralama skorlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Gelecek çalışmalarda bu yöntemin farklı boşanma veri seti ile sonuçlarına bakılabilir ya da bu çalışma ile elde edilen sonuçlar aynı veri seti ile elde edilen başka optimizasyon algoritmaları ile de karşılaştırılabilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

REFERANSLAR

AL-Behadili, H. N. K. ve Ku-Mahamud, K. R. (2021). Hybrid k-nearest neighbour and particle swarm optimization technique for divorce classification. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, *11*(4), 1447-1454.

Choi, W., Lee, J. W., Huh, M.-H. ve Kang, S.-H. (2003). An Algorithm for Computing the Exact Distribution of the Kruskal–Wallis Test. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, *32*(4), 1029-1040.

Larijani, M. R., Asli-Ardeh, E. A., Kozegar, E. ve Loni, R. (2019). Evaluation of image processing technique in identifying rice blast disease in field conditions based on KNN algorithm improvement by K-means. *Food Science & Nutrition*, *7*(12), 3922-3930.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, *69*, 46-61.

Moumen, A., Shafqat, A., Alraqad, T., Alshawarbeh, E. S., Saber, H. ve Shafqat, R. (2024). Divorce prediction using machine learning algorithms in Ha'il region, KSA. *Scientific Reports*, *14*(1), 502.

Sahle, K. A. ve Yibre, A. M. (2024). Hybrid of Ensemble Machine Learning and Nature-Inspired Algorithms for Divorce Prediction. T. G. Debelee, A. Ibenthal, F. Schwenker ve Y. Megersa Ayano (Ed.), *Pan-African Conference on Artificial Intelligence* içinde (ss. 242-264). Cham: Springer Nature Switzerland.

Samad, A., Taze S. Uçar M.K. (2024). Enhancing Milk Quality Detection with Machine Learning: A Comparative Analysis of KNN and Distance-Weighted KNN Algorithms, 9, 2021-2029.

Satu, Md. S., Riyad, Md. M. H. ve Rony, M. A. T. (2024). Developing an Interpretable Machine Learning Model for Divorce Prediction. M. S. Arefin, M. S. Kaiser, T. Bhuiyan, N. Dey ve M. Mahmud (Ed.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Big Data, IoT and Machine Learning* içinde (ss. 49-61). Singapore: Springer Nature Singapore.

Xue, Y., Zhu, H. ve Neri, F. (2023). A feature selection approach based on NSGA-II with ReliefF. *Applied Soft Computing*, *134*, 109987.

Zahl-Olsen, R. (2022). Understanding Divorce Trends and Risks: The Case of Norway 1886–2018. *Journal of Family History*, *48*(1), 60-80.

Deprem Sonuçları Açısından Ahşap ve Diğer Yapı Sistemlerinin Karşılaştırılması

İbrahim BEKTAŞ[1]
Gonca DÜZKALE SÖZBİR[2]

1- Prof. Dr.; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği, Bölümü. ibektas063@gmail.com ORCID No: 10000-0002-0617-6926, Sorumlu yazar.
2- Doç. Dr.; Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Malzeme ve Malzeme, İşleme Teknolojileri Bölümü. goncaduzkale@gmail.com ORCID No: 0000-0002-0728-841X

ÖZET

Türkiye coğrafi konumu açısından, dünyanın en aktif deprem bölgelerinden biri üzerinde konumlanmıştır. Bu nedenle, Türkiye'de özellikle sismik fay hatları üzerinde yer alan deprem bölgelerinde inşa edilen yapıların dinamik performansı büyük önem taşımaktadır. Depremler, yapısal hasar ve can kaybı açısından doğal afetler içinde en yıkıcı olanların başında gelmektedir. Bu yıkımın temel nedenlerinden biri, tercih edilen yapı sistemlerinin sismik düzeyi yüksek deprem yüklerine karşı standartların ön gördüğü performansı gösterememesidir. Son dönemde konu ile ilgili yapılan çalışmalar, farklı yapı türlerinin sismik performanslarının istenen düzeyde ortaya konmasının, afet yönetimi, risk azaltma stratejileri ve güvenli yapılaşma açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle ahşap yapılar, sahip oldukları hafiflik, esneklik ve enerji tutma kapasiteleri sayesinde, geleneksel betonarme ve yığma yapılara kıyasla avantajlı bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, bu yapılar da yüksek deprem şiddetine sahip depremlerde sınırlı dayanıma sahip olduklarından dolayı kullanımlarında dikkatli olmak ve gerekli standartlara uymak büyük önem arz etmektedir. Bununla birlikte, yapıların deprem performansı yalnızca kullanılan malzeme türüne değil, aynı zamanda uygulama kalitesi, mühendislik detayları ve yürürlükteki yapı yönetmeliklerine uygunluğa da bağlıdır. Bu değerlendirmelerden hareketle, bu çalışmada ortaya konan verilerin, sismik bölgelerde tesis edilecek yapılaşmalarda dikkate alınmasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda, Yerkürenin ve özellikle Türkiye'nin önemli bir bölümünün yüksek sismik tehlike altında yer almakta olması nedeni ile, söz konusu coğrafyalarda yaşamakta olan bireylerin ve görevli kurumların, başta depremler olmak üzere her türlü afete karşı hazırlıklı olmasının ve gerekli sorumluluğu üstlenilmesin gereği de vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler – Deprem, Ahşap Yapı, Betonarme, Çelik, Yığma, Hasar Sınıflandırması.

GİRİŞ

Yer kürenin ve Türkiye'nin önemli bir bölümü coğrafi olarak, sismik hareketliliğin yoğun yaşandığı bir konumdadır. Depremlerin ve diğer doğal afetlerin etkilediği bölgelerde yaşamanın, diğer coğrafyalara göre taşınması gereken biraz daha yüksek sorumlulukları vardır. Bu konumlarda yaşamak, fertlerin, toplumların ve ülkelerin daha fazla duyarlı olmalarını gerektirir. Bu sorumlulukların başında, deprem ve diğer doğal afetlere hazırlıklı olmak için gerekli hassasiyeti göstermek gelir.

Deprem felaketi, özellikle can kaybına yol açmadaki yıkıcı gücü açısından tüm doğal afetler arasında hala birinci sıradadır (Xie vd.

2007:279). Genel olarak, depremlerde can ve mal kaybına neden olan temel nedenin yapıların çökmesi ve hasar görmesi olduğu kabul edilmektedir (Coburn ve Spence, 2002:1-36).

Şu anda, ne sismik tehlike analizleri ne de sismik tasarım yönetmelikleri, deprem kayıplarının sismik tasarım yükünün etkin bir maliyetle seçilmesiyle nicel olarak kontrol edilebileceğinden bahsetmemektedir (Xie vd. 2007: 280)

Depremler, dünyanın pek çok bölgesinde yaşanan doğal afetler arasında en yıkıcı etkilerden birine sahip olduğuna göre, bu noktada, özellikle yapıların dayanıklılığı, can kayıpları ve ekonomik zararların boyutunu belirleyen en önemli faktörlerdendir (USGS, 2019). Bu çerçevede, farklı yapı sistemlerinin depreme karşı gösterdiği performansın karşılaştırılması; afet yönetimi stratejilerinin oluşturulması, risk azaltma planlarının geliştirilmesi ve güvenli şehirlerin inşası açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda özellikle ahşap yapılar, sahip oldukları esneklik, hafiflik ve enerji emici özellikler sayesinde, geleneksel betonarme veya yığma yapılara kıyasla depreme karşı daha avantajlı bir alternatif olarak öne çıkmakta olduğu ve bu alanda artan bir ilgi gördüğü söylenebilir.

Ahşap yapılar, hafiflikleri ve esneklikleri nedeniyle deprem yüklerine karşı avantaj sağlarlar. Bu özellikleri sayesinde enerji sönümleme kapasiteleri yüksek olup, deprem sırasında hasar görme riskleri azalır (FEMA-306, 1998: 4). Buna karşın, betonarme ve çelik gibi diğer yapı sistemleri, malzeme dayanımı ve rijitlik açısından farklı avantajlar sunmakla birlikte, yapısal davranışları sebebiyle özellikle büyük depremlerde ciddi hasarlarla karşılaşabilmektedir (Seneviratna ve Krawinkler, 1997: 181-190). Tarihsel veriler, farklı yapı türlerinin depremlerde nasıl performans gösterdiğine dair önemli bilgiler sağlamaktadır. Örneğin, 2011 Japonya Tōhoku depreminde ahşap yapılar büyük dalgalanmalara rağmen ciddi yapısal hasar görmezken, betonarme yapılar daha fazla hasar almıştır (EERI, 2011: 35). Benzer şekilde, Kahramanmaraş (6 Şubat 2023) depremlerinde, ahşap Cross-Laminated Timber (CLT) yapılar nispeten az hasar alırken, betonarme yapılar çok sayıda yıkıma ve can kaybına neden olmuştur (Tonyalı ve ark., 2024: 59). Söz konusu çalışmada, 6 Şubat 2023'te Türkiye'de meydana gelen son Kahramanmaraş depremleri, bölgedeki mevcut yapıların, özellikle de betonarme yapıların endişe verici durumunu açıkça ortaya koyduğu belirtilmektedir. Betonarme malzemenin aksine, ahşabın hafifliği, yüksek mukavemeti ve sürdürülebilirlik özellikleri, inşaat sektöründe giderek daha fazla tercih edilmesine ve deprem bölgelerinde CLT gibi yenilikçi ahşap ürünlerinin kullanımının artmasına katkıda bulunmaktadır. Düşey ve yatay taşıyıcı elemanlar arasında etkili iletişimin sağlandığı CLT yapılarda, ahşap malzemenin kendine özgü özelliği sayesinde deprem sırasında yüksek oranda enerji emilir. Fakat, aynı araştırma kapsamında yapılan similasyon denemelerinde, Eurocode 8 baz alınarak yapılan CLT yapıların da, Pazarcık (Kahramanmaraş) merkezli 7.8

büyüklüğünde oluşan sismik yüklere karşı yeterli dayanımı ortaya koyamadığı belirlenmiştir. Ancak, Lekkas vd. (2011: 102), depremler sonrasında yaşanan tsunamilerde yapıların ortaya koydukları mukavemetlerin, doğrudan sismik yüklemelere göre önemli farklılıklar olduğunu kaydetmektedir. Buraya bu yayından alıntılar yapılacak.

Depremlerdeki hasarların boyutu sadece yapı sistemleri ile değil, aynı zamanda yapı kalitesi, inşaat standartları ve uygulama süreçleriyle de yakından ilişkilidir. Örneğin, 300 binden fazla kişinin hayatını kaybettiği 7.0 şiddetindeki Haiti (2010) depremine maruz kalan bölgelerde, yetersiz inşaat standartları ve denetim eksikliği, betonarme yapıların bile dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir (USGS, 2019). Deprem, Port-au-Prince metropol bölgesindeki binalarda ve şehrin batı ve güneyindeki kırsal alanlarda ve kasabalarda büyük hasara yol açtı. Ciddi hasar ve çökmelerin neredeyse tamamı, depremin etkileri göz önünde bulundurulmadan inşa edilmiş binalarda meydana geldi. Depremlere dayanıklı olarak tasarlanmış ve iyi inşa edilmiş binaların çoğu depremde çökmedi. Aynı zamanda, etkili bir yapı yönetmeliğinin olmaması, yetersiz sismik oranlama ve detaylandırma, kalitesiz inşaat malzemeleri ve kalite kontrol eksikliği, depremden etkilenen bölgedeki yapıların düşük performansına ve hasarın artmasına katkıda bulunmuştur. (DesRoches vd. (2011: S8). Bu durum, 2023 Kahramanmaraş ve 1999 Kocaeli depremlerinde de açık bir şekilde yaşanmıştır. Bu tespitlerden, sadece kullanılan yapı malzemesinin değil, aynı zamanda uygulama kalitesinin de hayati önem taşıdığı anlaşılabilir.

Ahşap yapı sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajları vardır. Yenilenebilir bir kaynak olan ahşap, karbon depolama kapasitesi ile çevresel etkileri azaltır ve düşük karbon ayak izi ile modern yapı sektöründe tercih edilmeye başlanmıştır. Bu çevresel avantaj, depreme dayanıklılık ve ekonomik performansla birleştiğinde, ahşap yapıların önümüzdeki dönemde daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir.

Masif ahşap yapı (MAY), önceki paragrafta sayılan özelliklerinden dolayı, modern binaların artan yükseklik, inşaat hızı ve yangına dayanıklılık gibi taleplerini karşılamak için potansiyel olarak uygulanabilir bir alternatif olarak görülmektedir. (Crawford ve Cadorel, 2017: 838). Ancak, ahşap yapılarla ilgili bazı sınırlamalar da vardır. Yangın riski ve rutubet gibi çevresel etkenler, ahşap yapıların performansını olumsuz etkileyebilir ve bu nedenle uygun koruma ve bakım önlemleri gerektirir (FPL, 2010:1.1,18.8,17.9). Ayrıca, yapısal tasarımın doğru yapılması, bağlantı elemanlarının kalitesi ve işçilik, deprem dayanıklılığını doğrudan etkiler (Hashemi ve Lal, 2025: 103).

Deprem yönetmeliği ve standartları da yapı sistemlerinin performansını şekillendirmede kritik rol oynar. Türkiye, Japonya ve ABD gibi ülkelerde farklı yönetmelikler, farklı yapı türleri için dayanıklılık kriterleri belirlenmiş ve uygulanmaktadır (TBDY, 2018; WFCM, 2018). Başta gelişmiş ülkeler ve ülke toplulukları olmak üzere, bir çok ülkede konu

ile ilgili yönetmelik ve talimatlar oluşturulmuştur. Ancak burada öne çıkan temel sorun, söz konusu bu kuralların teknik gelişmelere bağlı olarak güncellenmesi ve uygulamaya tam olarak aktarılmasıdır. Çok sayıda ülke bu konuda hala istenen başarı düzeyini yakalayamamıştır.

Sonuç olarak, depremlerin tahribatları ve can kayıpları bakımından ahşap yapılar ile diğer yapı sistemlerinin karşılaştırılması, sadece yapısal dayanıklılık açısından değil, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarıyla da ele alınmalıdır. Bu çalışma, literatürdeki güncel veriler ışığında, farklı yapı sistemlerinin depremlerde ortaya çıkan hasar durumlarını ve değerlendirilme kriterlerini toplayarak, gelecekteki yapılaşmalarda yönlendirici olmaya katkı sağlamayı hedeflemektedir.

YAPI TİPLERİNE GÖRE HASAR DURUMU

Depremlerin şiddetine ve sismik yükün binaya geliş yönüne bağlı olarak, binalarda hasar ve yıkımlar farklılıklar göstermektedir. Benzer özelliklere sahip yapıların, aynı şiddette fakat farklı tesir durumuna sahip sismik yükler altında değişik performans ve davranış şekilleri ortaya koyduğu, yaşanan çok sayıdaki büyük ölçekli depremden sonra her kesim tarafından kabul görmüş bir gerçektir. Kabullenilmesi gereken diğer bir gerçek ise, her türden binanın deprem performanslarının da farklı olabileceğidir. Yani, her türlü sismik yükte, bir grup bina tamamen dayanıklı iken diğer grup yapıların tamamen dayanıksız olduğu söylenemez.

Yapılar, çok farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bunlardan yaygın olarak bilinenleri, kullanım amaçlarına (Fonksiyonlarına) göre, yapısal (Strüktürel) özelliklerine göre, taşıyıcı sistem malzemelerine göre, yapım yöntemlerine göre ve imalat şekline göre şeklinde sayılabilir. Bu sınıflandırmada çalışma konusu ile ilgisi bakımından diğer gruplara göre "taşıyıcı sistem malzemelerine göre yapı tipleri" daha fazla öne çıkmaktadır.

Taşıyıcı sistem materyaline veya yapım malzemesine göre yapılar da çok farklı şekilde gruplandırılabilir. Ancak, depremlerde oluşan sismik yüklere dayanımı açısından şu şekilde gruplandırılabilir (MANNLEE, 2025);

-Ahşap yapılar (Wood frame structures):
-Betonarme yapılar (Reinforced concrete frame structures):
-Çelik yapılar (Structural steel frame structures):

-Yığma yapılar (Masonry structures)

Bu bölümde, yukarıda sayılan dört temel yapı grubunun, depremlerde oluşan hasarlarının değerlendirilmesi için farklı kurumlarca oluşturulan, "hasar değerlendirme kriterleri veya sınıflandırılmaları" tablolar halinde sunulacaktır.

Yapılarda Hasar Derecelerinin Belirlenmesi

Bu başlık altında önemlerine binaen dört ana yapı grubu (Ahşap Betonarme, yığma ve çelik) değerlendirilmiştir.

Genel olarak, deprem kaynaklı bina çökmeleri, insan kayıplarının başlıca nedenlerinden biridir. Bugüne kadar, bina hasarı ile insan kaybı arasındaki ilişkiyi açıklığa kavuşturmak için "büyük hasar", "orta hasar" ve "küçük hasar" gibi bina hasarı kategorileri kullanılarak birçok çalışma yürütülmüştür. Ancak, bu sınıflandırma için, hasarlı binaların kategorize edilmiş verileri, acil durum risk değerlendirmesi veya deprem sonrası bina hasarının istatistiksel verilerinin toplanması önemlidir (Hengjian vd. (2003:387)

Konu ile ilgisi bakımından ilk olarak, Japonya Mimarlık Enstitüsü (Architectural Institute of Japan (AIJ)) ve Japonya Şehir Planlama Enstitüsü (City Planning Institute of Japan (CPIJ)) tarafından ahşap yapılar için oluşturulan hasar sınıflandırması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Ahşap bina sismik hasarlarının sınıflandırılması.

Hasar sınıfları	Sınıflandırma kriterleri	Hasar açıklaması
Hasarsız	Görünümü bozulmamış	Hasar yok
Az Hasarlı	Hafif hasarlı kullanılabilir binalar veya küçük onarımlardan sonra kullanılabilir durumda olan binalar	Çatı kiremitlerinin bir kısmının düşmesi veya duvarlarda küçük çatlaklar/soyulmalar
Orta Hasarlı	Binalar, önemli Onarımlardan sonra yeniden kullanılabilir.	Kısmen çökmüş veya duvarlarda geniş çatlaklar.
Ağır Hasarlı	Kullanılamaz binalar veya yeniden kullanılma olasılığı çok düşük binalar.	Tamamen çökmüş, katmanlar halinde çökmüş, ciddi şekilde eğilmiş veya temel, kolon ve duvarlarda ciddi hasar.

Kaynak: (Hasegawa vd, 2000: 4).

Ahşap yapının doğuştan gelen esnekliği, hasara karşı yüksek bir direnç sağlar; ancak bu, duruma bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Gevşek derzler veya çürümüş ahşap, ahşap bir evi çökmeye karşı oldukça savunmasız hale getirebilir (ESC, 1998: 39). Örneğin 1995 Kobe depreminde, şehrin bazı bölgelerindeki geleneksel ahşap evlerin kötü durumdan dolayı çok kötü performans gösterdiği dikkat çekiciydi. Gelecekte

ahşap yapıların ölçekle ele alınma biçiminde bazı iyileştirmeler yapılmalıdır. Bunlar arasında, ahşap yapıların farklı gruplara ayrılması ve ölçekteki hasar derecelerinin tanımlarında, yığma ve betonarme yapılar için olduğu gibi açıklanmayan ahşap binalardaki hasar aşamalarının ayrıntılı olarak ele alınması yer almalıdır. Benzer değerlendirmeler, Hamburger ve McCormick (1997:77) çalışmasında da yer almaktadır. Aynı kaynağa göre, 1994 Northridge Depreminde (1994) yaşanan can kayıplarının neredeyse tamamı ve doğrudan maddi hasarın yarısından fazlası, ahşap karkas yapılarda gerçekleşti. Bu durum, doğal olarak ahşap karkas yapıların depremlerde iyi performans gösterdiği yönündeki genel kabulü teyit etmedi. Söz konusu depremde oluşan hasarların büyük bölümü, düşük kaliteli ahşap yapıların kullanılması ve inşaat sürecindeki yetersiz denetimle ilişkili olduğu görüldü. Ancak, Northridge Depreminde genel olarak ahşap yapılar için geçerli olan mühendislik standartlarının, bu yapılarda yeterince uygulanmadığı görüldü

Örneğin, Kahramanmaraş'ta 6 Şubat depremleri sonrası tarihi dokunun da katkısı ile ahşap yapıların nispeten yoğun olduğu Dulkadiroğlu ilçesinde bazı ahşap yapıların mevcut durumları Şekil 2A ve B'de görülmektedir.



Şekil 1. Kahramanmaraş Depremlerinde (2023) ağır hasar alan; (A) Ahşap çerçeveli yığma bina ve (B) Ahşap bina (Bektaş, 2023: 82).

Betonarme yapıların hasar derecelendirmesinde kullanılan Avrupa Makro Sismik Ölçeği (EMS-98) tarafından oluşturulan hasar derecelendirmesi Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2: Betonarme yapıların hasar durumlarına göre sınıflandırılması

Derecesi	Hasar sınıfı	Hasar açıklaması
I. Derece	Hasarsız veya Az Hasarlı	Hasar yok Önemsiz ila hafif hasar (yapısal hasar yok, hafif yapısal olmayan hasar) Çerçeve elemanları üzerindeki sıvada veya tabandaki duvarlarda ince çatlaklar.
II. Derece	Orta Hasarlı	Orta hasar (hafif yapısal hasar, orta yapısal olmayan hasar) Çerçevelerin kolon ve kirişlerinde ve yapısal duvarlarda çatlaklar. Bölme ve dolgu duvarlarında çatlaklar; kırılgan kaplama ve sıvanın düşmesi. Duvar panellerinin birleşim yerlerinden harç dökülmesi
III. Derece	Ciddi Ağır Hasarlı	Önemli ila ağır hasar (orta yapısal hasar, ağır yapısal olmayan hasar) Çerçevelerin tabandaki kolon ve kiriş kolon birleşim yerlerinde ve birleştirilmiş duvarların birleşim yerlerinde çatlaklar. Beton örtüde dökülme, donatılı çubuklarda burkulmalar. Bölme ve dolgu duvarlarında büyük çatlaklar, tek tek dolgu panellerinin kırılması
IV. Derece	Çok Ağır Hasarlı	Çok ağır hasar (ağır yapısal hasar, çok ağır yapısal olmayan hasar) Betonun basınç hasarı ve donatıların kırılmasıyla birlikte yapısal elemanlarda büyük çatlaklar; kiriş donatılı çubukların bağ hasarı; kolonların eğilmesi. Birkaç kolonun veya tek bir üst katın çökmesi
V. Derece	Yıkım (Çökme)	Yıkım (çok ağır yapısal hasar) Binaların zemin katının veya bazı bölümlerinin (örneğin kanatlar) çökmesi

Kaynak: Avrupa Makrosismik Ölçeği (EMS-98).

Tablo 2'ye temel teşkil eden, betonarme (BE) yapıların hasar derecelendirmesinde kullanılan Avrupa Makro Sismik Ölçeği (EMS-98) hakkında bilgi verilerek, beş farklı deprem için hasar derecelendirmesi yapılacak örnek betonarme binalar seçilmiştir. Çalışma, bu ve benzeri çalışmalara, söz konusu deprem merkez üslerinin sismik parametrelerinin elde edilmesi ve EMS-98'in beş farklı yıkıcı deprem için kullanımı açısından katkı sağlayacaktır (Işık vd. 2022: 15).



(a) (b)

Şekil 2: Haiti 2010 depreminde betonarme bir binanın depremden önce (a) ve depremden sonra (b) durumu (DesRoches vd. (2011: 11).

Şekil 2, 2008 yılında inşa edilen çok katlı Turgeau Hastanesi'nin çöküşünü göstermektedir. Binanın yanal kuvvetlere karşı direnci, duvar dolgulu betonarme bir çerçeve ile sağlanmıştır.

Yığma yapılar için depremlerde meydana gelen hasarlara ilişkin kriterlere göre oluşturulan hasar derecelendirmesi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Yığma binaların deprem hasar durumuna göre sınıflandırılması.

Hasar derecesi	Hasar açıklaması
Hasarsız	Hasar yok
Az hasarlı	Çok az duvarda ince çatlaklar Sadece küçük sıva parçalarının düşmesi; Çok az durumda binaların üst kısımlarından gevşek taşların düşmesi
Orta hasarlı	Birçok duvarda çatlaklar; oldukça büyük sıva parçalarının düşmesi; bacaların kısmen çökmesi
Ciddi ağır hasarlı	Çoğu duvarda büyük ve yaygın çatlaklar; çatı kiremitleri kopmuş; bacalar çatı hattında kırılmış; yapısal olmayan bazı elemanların (bölmeler, üçgen duvarlar) hasar görmesi
Çok ağır hasarlı	Duvarlarda ciddi hasar; çatı ve döşemelerde kısmi yapısal hasar
Yıkım (Çökme)	Tam yıkım veya neredeyse tam çöküş

Kaynak: Avrupa Makrosismik Ölçeği (EMS-98).

Tablo 3'teki sınıflandırmalar (Feng vd. 2013:1583) Avrupa Makrosismik Ölçeği (EMS-98)'de yer alan ölçeğe göre yapılmıştır. Bu ölçek, Avrupa ülkelerindeki sismik yoğunlukların belirlenmesinde temel teşkil etmektedir. Avrupa Makrosismik Ölçeği en son 1998 yılında güncellenmiştir.

Tablo 4, çelik binalar için deprem hasar durumuna bağlı olarak oluşturulan hasar derecelendirme (sınıflandırma) verilerini göstermektedir.

Tablo 4: Çelik binalar için deprem hasar derecelendirmesi.

HD	Hasar açıklaması (durumu)
1 = Yok - Hafif	1. Herhangi bir bozulma belirtisi yok 2. Bölme duvarların sıvasında ve dış duvarların kaplamasında ince veya küçük çatlaklar 3. Tavanlarda, aydınlatma armatürlerinde vb. küçük hasarlar 4. Kaplamada küçük hasarlar (kısmi yerinden çıkma, bazı kırık camlar) 5. Duvarlarda bazı küçük kalıntılar (1,0 cm'den az) 6. Önemsiz veya hafif yapısal hasarlar (bazı yapı elemanlarında ve ağlantılarında bozulma belirtileri) 7. Çatlaklar ve muhtemelen
2 = Orta - Ağır	1. İç duvarların sıvasında ve dış duvarların kaplamasında orta düzeyde çatlak (~ 2-4 mm) 2. Duvarlarda orta düzeyde kalıntı aşınma (~ 1,0 ila 2,0 cm) 3. Tavanlarda orta ila ağır hasar (asma tavanların yerinden çıkması, aydınlatma armatürlerinin sökülmesi vb.) 4. Kaplamada orta ila ağır hasar (panellerin yerinden çıkması ve kısmi hasar görmesi, çok sayıda cam kırılması vb.) 5. Yapısal elemanlarda ve bağlantılarda orta ila ağır yerel hasar (birkaç burkulmuş veya kırık destek, birkaç kolonda flanş burkulması, bazı taban plakalarında kayma veya çatlaklar, birkaç birleşimde kaynak veya başka bir bağlantı hatası, bazı kesme bağlantılarında hareket veya kopma, döşeme diyaframları ve kirişler arasında vb. 6. Bacaların ve korkulukların diğerleriyle birlikte çökmesi Burada listelenen hasar 7. Yapısal elemanlarda hafif çıkıklık 8. Küçük zemin hareketi, ancak temelde çökme belirtisi yok
3 = Şiddetli - Tam	1. Kısmi veya tam çökme 2. İç bölme duvarlarında, kaplamada ve camda yaygın hasar 3. Çok sayıda hasarlı yapı elemanı, birleşim yeri ve bağlantı (desteklerin burkulması veya gerilmesi, kolon flanşlarında burkulmalar, birçok taban plakasında kayma veya çatlaklar, kaynaklı bağlantılarda çok sayıda çatlak, çatlak cıvatalar ve köşebent plakaları vb.) 4. Yapı elemanlarında önemli ölçüde yerinden oynama, herhangi bir katta kalıntı kayma veya tüm binanın yerinden oynaması 5. Önemli zemin hareketi, taban döşemesinde kırılma veya bodrum çevre duvarlarında eğilme 6. Çökme için önemli tehlikeyi gösteren her türlü hasar

HD: Hasar Derecesi, Kaynak: (Anagnostopoulos vd. 2004: 51).

Yapı türlerinin tamamı için bu sınıflandırmalar yapıldıktan sonra, hasarlı binalara ait yapısal ve malzeme bilgileri yerel CBS veri tabanından toplanır ve bu çalışmada uygun modeller kullanılarak sayısal bir formata (malzeme ve yapı endeksi, (materials and structure index, MSI) dönüştürülür. Bir binanın MSI değeri, deprem sırasında binadan kaçış oranına tesir eder ve bu da bina sakinlerinin maruz kaldığı zarar seviyesini azaltıcı yönde etkiler. MSI değeri, binanın yüksekliği veya kat sayısı ile

binanın yapısı ve malzemeleri dikkate alınarak hesaplanır. Binanın MSI değeri arttıkça, can kaybı ihtimali de artar (Feng vd. 2013:1580).

Son yıllarda yapılan hasar ve can kayıplarına ilişkin çalışmalarda, deprem sonrasında binalarda oluşan hasar durumları ile oluşan can kayıpları ve hasarlara arasındaki ilişki üzerine yoğunlaşan çalışmalar görülmektedir Bunlara bir örnek olarak Hengjian vd. (2003;395) verilebilir. Sonuçlar, binalarda hasarın boyutu arttıkça (yaşam alanı olan binalar hariç) can kaybının da artığı belirlenmiştir. Burada göze çarpan önemli bir ayrıntı, can kayıplarının yaşam alanı olmayan ağır hasarlı binalarda % 84.6 iken söz konusu alanın bulunduğu ağır hasarlı binalarda sadece %5.6 olmasıdır. Yine aynı çalışmada, bölgesel can kaybı dağılımları ve sismik yoğunluk karşılaştırıldığında, bölgesel can kaybı dağılımlarının yüksek sismik yoğunluktaki bölgesel dağılımlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bu veri, binaların fay hatlarından (sismik yoğun alanlar) uzak yerlerde kurulmasının önemini göstermesi bakımından ilginçtir.

Hafif iskeletli ahşap yapılar, Amerika Birleşik Devletleri genelindeki yapı stokunun çoğunluğunu oluşturmaktadır. Tarihsel olarak, hafif iskeletli ahşap yapılar, nispeten düşük bir felaketle sonuçlanan çökme ve can kaybı riskiyle depremlerde iyi performans göstermiştir (Ellingwood ve Pang, 2008).

Ancak, önemli sismik kayıplar potansiyeli mevcuttur; 1994 Northridge Depremi, yalnızca hafif iskeletli ahşap yapılarda tahmini 20 milyar dolarlık (1994 doları cinsinden) bir mal kaybına neden olmuştur (Kircher vd. 1997).

Rainer ve Karacabeyli (2000: 8) tarafından Kuzey Amerika, Yeni Zelanda ve Japonya'daki bazı depremler için ahşap karkas yapıların performansı incelenmiştir. Bu çalışmada, ahşap menşeyli olarak imal edilen yaygın yapı türlerinin gerçek sismik performansının gözlemlenebilmesi ve daha iyi ölçülebilmesi için özel olarakta ahşap karkas yapılar için kapsamlı bir sismik enstrümantasyon programının uygulanması önerilmektedir.

Hengjian vd. (2003:402), bina hasar deseni ile can kaybı arasındaki ilişki ve can kaybı dağılımının özelliklerini araştırmıştır. Elde ettikleri bulgularda, can kayıplarının çoğu, zemin katın hayatta kalma alanı bırakmadan tamamen çöktüğü nispeten eski iki katlı ahşap binalarda meydana gelmiştir; can kayıpları, ``hasarsız'' seviyeler de dahil olmak üzere tüm bina hasar seviyelerinde meydana gelmiştir ve bina hasarının bir depremdeki can kayıplarının ana nedeni olduğu, ancak tek nedeni olmadığını kaydetmişlerdir.

Öte yandan, deprem sonrası kurtarma ve yardım hizmetlerinin organizasyonundaki en önemli sorunlardan biri, kaç kişinin zarar gördüğünü bilmektir. Bu bilgi, kurtarma koordinatörlerinin kaç kurtarma personeli toplanması, kaç kurtarma malzemesi hazırlanması ve yeterli yardım malzemesi olmaması durumunda hangi alanlara öncelik verilmesi gerektiğine karar vermelerine yardımcı olabilir (Tong vd. 2012: 13; Gamba vd. 2007: 1582).

(Kentler için) "Kabul edilebilir" Kayıp Oranları

Modern toplumlarda, depremlerden sonra yaşanan can kayıpları ve oluşan hasarlarla ilgili yeni yeni ortaya çıkan bir takım algılar ve değerlendirme ölçütleri tartışılmaktadır.

Bir şehir veya bölge için sosyal olarak kabul edilebilir ölüm oranı, gelecekteki bir depremde olası maksimum ölüm sayısının ilgili bölgenin toplam nüfusuna oranı olarak tanımlanır ve bu oran toplum tarafından kabul edilebilir (Xie vd. 2007: 280).

Farklı topluluklar, yerel sosyal ve ekonomik durumlarına göre, sosyal olarak kabul edilebilir deprem ölüm oranını belirlemede farklı tercihlerde bulunabilirler. Bu nedenle, sosyal olarak kabul edilebilir hasar seviyeleri ve oranları çeşitli tercihler için esnek olmalıdır (Sharpe,1992: 5894). Ancak, sosyal olarak kabul edilebilir ölüm oranı ve hasar seviyelerinin, depremin meydana gelme zamanının ve nüfus yoğunluğu seviyesinin ölüm oranı üzerindeki etkilerini hesaba katan bazı katsayılar gibi bu yöntemde yer alan bazı parametreler, yerden yere farklılık gösterebilir ve daha da iyileştirilmesi gerekebilir (Xie vd. 2007: 286).

Bu bölüme kadar yapılan değerlendirmelerden sonar, Dünya çapında son yıllarda vuku bulmuş şiddetli (7 ve üzeri büyüklükte (Mm olarak) 10 adet deprem ve sonuçlarına ilişkin bazı bilgiler Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 6: Dünya genelinde son 10 büyük deprem ve maddi sonuçları.

No	Tarih	Yer (Ülke / Bölge)	Mw	Ölü Sayısı	Maddi Hasar / Ekonomik Kayıp	Kaynak
1-	10 Ekim 2025	Mindanao, Filipinler	7.4	7	Binlerce ev hasar gördü; tahmini ekonomik kayıp $100 milyon+	Wikipedia, Asia Pacific Alliance For Disaster Management
2-	30 Temmuz 2025	Kamçatka, Rusya açıkları	7.8	1 (dolaylı)	Tsunami uyarısı sonrası önlem alındı, maddi hasar sınırlı	Wikipedia
3-	28 Mart 2025	Meiktila, Myanmar	7.6	1.644	Sağlık altyapısı ve altyapıda ciddi hasar; ekonomik kayıp bilinmiyor	(Shahzadaa vd. 2025:)
4-	6 Şubat 2023	Kahramanmaraş, Türkiye / Suriye	7.8 & 7.5	53.000	Yaklaşık 103,6 milyar $'lık ekonomik kayıp ve 710 bin bina yıkıldı	AFAD, (Paksoy,2024:28)
5-	20 Ocak 2023	Tanimbar Adaları, Endonezya	7.6	0	Hasar minimal, ekonomik kayıp rapor edilmedi	New York Post
6-	14 Ağustos 2021	Haiti	7.2	2.248	Yaklaşık 1,5 milyar $'lık hasar; altyapı büyük zarar gördü	PAHO/WHO; USGS; Wikipedia
7-	10 Mart 2021	Sanriku, Japonya	9.0	15900	Hafif tsunami; maddi hasar	JMA; Wikipedia; NPA
8-	19 Haziran 2020	Kermadec Adaları, Yeni Zelanda	7.4	0	Okyanus açıklarında; tsunami uyarısı sonrası maddi hasar yok	USGS; Civil Defence NZ
9-	28 Eylül 2018	Sulawesi, Endonezya	7.5	4.340	Yaklaşık 1 milyar $'lık hasar; tsunami ve yıkıcı sarsıntılar	Wikipedia; EBSCO
10-	19 Kasım 2017	Yeni Kaledonya Kaledonya	7.0	0	Okyanus çıklarında, ekonomik hasar yok	USGS; IISEE; Wikipedia

Kaynaklar: (Tablo son sütununda verilmiştir).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar, sismik yoğun bölgelerde (high seismic intensity) yer alan binalarda çan kayıpları ve bina hasarlarının diğer alanlara göre çok yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, binalar, mümkün oldukça, sismik yoğun alanlardan yeterli uzaklıkta kurulmalıdır.

Deprem bölgelerinde inşa edilecek her türlü binada hayatta kalma alanı (Yaşam alanı=Survival space) tesis edilmelidir. Çünkü, aynı sismik yüke maruz kalmış ve ağır hasar almış binalarda can kayıpları, yaşam alanları mevcut binalarda diğerlerine göre önemli oranda (%85'lerden %5'lere kadar) azaldığı söylenebilir.

Depremlerde, binaların hasar durumlarının bilinmesi ve hasar seviyelerine göre verilerin toplanarak, gelecekte yaşanması muhtemel depremler için yapıların kurulmasında ve diğer lojistik tedbirlerin alınmasında önemli rol oynayacaktır.

Bu çalışmada, temel bina türlerine (ahşap, betonarme, çelik ve yığma) göre hasar durumları ve derecelendirme esaslarını belirleyen tablolar ortaya konmuştur. Bu tablolar, sismik bölgelerde yapılacak imar ve iskân faaliyetlerinde dikkate alınması ve tablolarda sunulan sınıflandırma esaslarının dikkate alınması önemle önerilmektedir.

REFERANSLAR

AIJ and CPIJ (Architectural Institute of Japan and City Planning Institute of Japan), (1995). Report of Emergency Damage Survey of the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.

Anagnostopoulos, S., Moretti, M., Panoutsopoulou, M., Panagiotopoulou, D., Thoma, T. (2004). Post-earthquake damage and usability assessment of buildings: further development and applications. Final report, European Commission-D.G. Environment, and Civil Protection EPPO, Patras, Greece,164p.

Bektaş, İ. (2023). Ahşap yapılarda Kahramanmaraş depremlerinden çıkarılacak dersler. Editör: M. Mısır, *Ormancılık Biliminde Akademik Araştırma ve Değerlendirmeler*, BİDGE Yayınları, ss: 69-91, ISBN: 978-625-6707-73-3.

Coburn, A., and Spence, R. (2002). Earthquake Protection. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 428p. |Online ISBN:9780470855188, |Doi:10.1002/0470855185

Crawford, R.H., Cadorel, X. (2017). A Framework for Assessing the Environmental Benefits of Mass Timber Construction. Procedia Eng., 196, 838–846.

DesRoches, R., Comerio, M., Eberhard, M., Mooney, W., and Rix, G. J. (2011). Overview of the 2010 Haiti Earthquake, Earthquake Spectra, 27, S1–S21. Doi: 10.1193/1.3630129.

FEMA-306, (1998). Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, Federal Emergency Management Agency, ABD, 237p

FPL (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material. Edited by Robert J. Ross, Forest Products Laboratory USDA Forest Service, Madison, 509 p. Doi: 10.2737/FPL-GTR-190

Ellingwood, B., Rosowsky, D., and Pang, W. (2008). Performance of light-frame wood residential construction subjected to earthquakes in regions of moderate seismicity. Journal of Structural Engineering, 134 (8):1353-1363.

ESC (European Seismological Commission), (1998). European Macroseismic Scale 1998. Edited by G. GRÜNTHAL, Luxembourg, pp: 100.

Feng, T.N., Hong, Z.H., Wu, H.J., Fu, Q.S., Wang, C.X.,. (2013). Estimation of earthquake casualties using high-resolution remote sensing: a case study of Dujiangyan city in the May 2008 Wenchuan earthquake. Nat Hazards 69, 1577–1595. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0764-1.

EERI, 2011. The Mw 9.0 Tohoku Earthquake and Tsunami. Learning from Earthquakes. The Report: The Mw9.0 Tohoku earthquake and tsunami of 11th March 2011: A fielf Report by EEFIT. https://learningfromearthquakes.org/resources/the-mw9-0-tohoku-earthquake-and-tsunami-of-11th-march-2011/ , (adresinden 15 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır).

Gamba, P., Acqua, F.D., Trianni, G., (2007). Rapid damage detection in Bam area using multitemporal SAR and exploiting ancillary data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45 (6), 1582–1589.

Hamburger, R.O., and McCormick, D.L (1997). Earthquake performance of modern timber structures: lessons from the 1994 northridge earthquake. Editor G. C. Foliente, *Earthquake-performance and safety of Timber structures, Section II* (pp. 77-82). Forest Products Society, 2801, Madison.

Hasegawa, H., Yamazaki, F., Matsuoka, M., Seikimoto, I. (2000). Determination of building damage due to earthquakes using aerial television images. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, CDROM, 8p.

Hashemi, A., Lal, Rajnil. (2025). Seismic performance evaluation of mass timber buildings equipped with resilient and conventional friction devices. Resilient cities and structures, 4(2): 103 – 115. Doi: 10.1016/j.rcns.2025.06.001.

Hengjian, L., Kohiyama, M., Horie, K., Hayashi, H., Tanaka, S. (2003). Building Damage and Casualties after an Earthquake. Natural Hazards 29, 387–403 https://doi.org/10.1023/A:1024724524972

Işık, E. Ulu, A. E. Tunç, Ş. and Keskiner, A. (2022). A study on the determination of damage levels in reinforced concrete structures for different earthquakes. Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 12 (1): 14–20, doi: 10.17678/beuscitech.1065883.

Kircher, C., Reitherman, R., Whitman, R., and Arnold, C. (1997). Estimation of Earthquake Losses to Buildings. Earthquake Spectra, 13 (4): 703-720.

Lekkas, E. Andreadakis, E. Alexoudi, V. Kapourani E. and Kostaki. I. (2011). The Mw=9.0 Tohoku Japan earthquake (March 11, 2011) tsunami impact on structures and infrastructure. *Environmental Geosciences and Engineering*

Survey for Territory Protection and Population Safety (EngeoPro) International conference, Moscow. 2011, pp. 97-103.

MANNLEE, (2025). 9 Types of Building Structures Explained. https://www.mannleecw.com/types-of-building-structures/, (adresinden 12 Ekim 2025 tarihinde alınmıştır).

Paksoy, M. (2024). Bir Felaketin Anatomisi: Kahramanmaraş Depremlerinin Ekonomi ve Tarım Üzerine Etkileri. Uluslararası Kırsal Turizm ve Kalkınma Dergisi, 8(2):26-31.

Rainer, J., and Karacabeyli, E. (2000). *Performance of wood-frame construction in earthquakes. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering,* Auckland, New Zealand, (Vol. 30, pp. 1-8).

Seneviratna, G. D. P. K. and Krawinkler, H. (1997). Strength and displace-ment demands for seismic design of structural walls. *Proc. 5th US Nat. Conf. Earthq. Engng, Vol. II, Chicago, IL, pp 181-190.*

Shahzadaa, K., Noor, U.A., Xud, Z-D. (2025). In the wake of the March 28, 2025 Myanmar earthquake: A detailed examination. Journal of Dynamic Disasters, 1(2): 100017. Doi:10.1016/j.jdd.2025.100017

Sharpe, R.L. (1992). Acceptable earthquake damage or desired performance. *In: The tenth world Conference on earthquake engineering,* vol 10. Madrid, Spain, pp 5891–5895.

TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2019 ve 2024'te güncellemeler yapıldı), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.

Tong XH, Hong ZH, Liu SJ, Zhang X, Xie H, Li ZY, Yang SL, Wang WA, Bao F (2012). Building-damage detection using pre- and post-seismic high-resolution satellite stereo imagery: a case study of the May 2008 Wenchuan earthquake. Isprs J Photogramm 68:13–27.

Tonyalı, Z., Lakot Alemdağ, E. & Tandoğan Kibar, G. (2024). Evaluation of seismic response of the CrossLaminated Timber (CLT) multi-storey residential building under the February 6, 2023, Kahramanmaraş Earthquakes. Journal of Architectural Sciences and Applications, 9 (Special Issue), 41-63. Doi: doi.org/10.30785/mbud.1338909

USGS. (2019). . *Earthquake Hazards Program/ Publications*. https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/publications, (adresinden 24 Eylül 2025 tarihinde alınmıştır).

WFCM, (2018). https://awc.org/publications/2018-wfcm/ (adresinden 10 Ekim 2025 tarihinde alınmıştır)

Xie, LL., Ma, YH. & Hu, JJ. (2007). A conception of casualty control based seismic design for buildings. Nat Hazards 40, 279–287. https://doi.org/10.1007/s11069-006-0014-x

Yapı Tuğlası Üretim Sürecinde Uygulanacak Test ve Analiz Teknilkleri*

İsmail DEMİR[1]

*Bu Kitap Bölümü "Afyon Bölgesi Tüflerinin Tuğla Üretiminde Kullanılması, Yıl:2001" Başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

1- Prof. Dr.; Afyon koctaepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendsiliği Bölümü. idemir@aku.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8493-0309

ÖZET

Türkiye'de hızlı kentleşmenin beraberinde getirdiği konut ihtiyacı her yıl artarak devam etmektedir. Büyük kentlerimizdeki hızlı yapılaşma, beraberinde kullanılan malzemelerin kalitesini de olumsuz yönde etkilemektedir. Belirlenen standartları sağlayamayan malzeme üretimi ve bunların yapıda kullanılması, yapı kalitesini ve konforunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Malzeme bilimindeki gelişmeler fonksiyonel, dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimini hedeflemektedir. Kentleşmenin ortaya çıkardığı hızlı yapılaşma olgusu, kaliteli malzeme üretiminin önemini ortaya koymaktadır.

Ülkemizde gerek yığma yapılarda, gerek betonarme yapılarda duvar elemanı yapımında kullanılan ana malzeme tuğladır. Tuğla üretimi T.S.E. tarafından belirlenen standartlara uygun olarak yapılmaktadır. Ancak özellikle yığma yapı sistemlerinde taşıyıcı duvar malzemesi olarak kullanılmakta olan yapı tuğlalarının ilgili standartta verilen (TS 705) mekanik özellikleri karşılamakta problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu yetersizlikler üretim sürecinde uygulanan yöntemlerden kaynaklandığı gibi, hammadde kaynaklarının azalması, hammadde kalitesinin bozulması gibi etkenler de dikkat çekmektedir.

Tuğla üretimi ortaçağdan beri bilinmektedir. Tuğla; önceleri ilkel yöntemlerle ve çoğunlukla inşaat sahasında üretildiği halde inşaat teknolojisindeki aşamaların yapı malzemeleri sanayiine yansıması sonucunda tuğla üretim ve kullanım teknolojisi de çeşitli aşamalardan geçmiştir. Endüstrileşme ve ulaşım imkanlarının gelişmesi ile birlikte, üretim şantiyeden fabrikaya taşınmış, mekanizasyon ve otomasyonun devreye girmesi ile tuğla sanayii doğmuştur. Bu süreçteki dinamizmin devamlılığı, dünya nüfusundaki hızlı artışın doğurduğu yüksek inşaat talebi ve tuğlanın hammaddesi olan kilin bol ve yoğun şekilde yerkabuğundan kolay elde edilmesine bağlanmaktadır.

Bu çalışmada standart fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayabilen yapı tuğlaları üretim sürecinde uygulanacak fiziksel ve mekanik testler ile uygulanacak analiz yöntemleri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapı Tuğlaları, Kil Hammaddesi, Pişirme, Fiziksel Ve Mekanik Özellikler, Durabilite.

GİRİŞ

Günümüzde de binlerce yıl önce bilinen kil hammaddesi kullanılarak tuğla üretimi yapılmaktadır. Tuğla üretimindeki temel aşamalar değişmemekle birlikte kullanılan teknolojik yöntemler çağımızın teknoljisi ile uyumlu hale gelmiştir. Günümüzde tuğla üretiminde gelişmiş teknoloji sistemleri ve bilimsel tekniklere uygun üretim yapılmaktadır. Üretilen tuğla

ürünler oldukça karmaşık geometrilerde olup ve istenen fiziksel ve meanik özellikleri karşılayabilmektedir.

Tuğla üretim süreci uygun hammaddelerin doğada aranması ve özelliklerinin bilimsel teknikler ile belirlenmesi ile başlar. Kil hammaddesinin bulunabileceği muhtemel alanlar ilgili uzmanlar tarafında incelenerek değerlendirme yapılır. Sahadan alınan kil örnekleri laboratuvarlarda bir dizi test ve analiz tekniklei uygulanarak üretime uygunluğu belirlenir. Ürün özellikleri ve üretim koşulları dikkate alınarak optimum karışım reçetesi hazırlanır.

Belirlenen reçeteye göre hazırlanan hammadde üretimin ilk basamağı olan şekillendirme bölümüne iletilir. Şekillendirme işleminde vakum pres makinaları kullanılarak istenilen boyut ve geometride tuğla ürünler üretilir (Şekil 1). Yaş ürünler kurutma bölümüne alınarak bünyedeki suyun atılması sağlanır. Kurutma ile tuğla ürünler taşınma, fırına yerleştirme vb. işlemler için yeterli mukavemeti kazanmış olur. Kurutulan tuğla ürünler daha sonra pişrilmek üzere fırına tipine bağlı olarak uygun biçimde yerelştirilir. Frında kontrollü biçimde sıcaklık artırılarak fırın rejimi ayarlanır. Yapı tuğlaları genellikle 850- 950 ^{0}C aralğında pişirilerek üretim yapılır.



Şekil 1. Tuğla vakum pres makinası.
Kaynak: (İnt K-1).

Killerin sınıflandırılabilmeleri için; su alarak şişmeleri, plastik özellikleri, kuruması, gözenekli yapısı, kalsine edilmesi ve sinterleşmesinin bileşen ve mineral içeriklerine bağlı olarak incelenmesi önemli bir mekanik ve termik araştırmalara tabi tutulması gerekmektedir (Thompson vd.,1985; Barshad 1952). Yapı tuğlası imali için kullanılacak kilin seçimde kimyasal yapısı kadar mekanik özellikleri de önemli rol oynar. İstenen fiziksel ve mekanik özellikler şunlardır.

a. Plastiklik: Kullanılacak kil su ile karıştırıldığında yoğrulup kolayca

şekil verilecek bir kitle meydana getirmeli ve içindeki suyun büyük bir bölümünün buharlaşıp çıktıktan sonra da bu halini muhafaza edebilmelidir. Az plastik killer ele yapışma sınırında kuru ağırlığa oranla %20 civarında su alırlar. Çok plastik killerde bu oran % 26 ile % 27' yi bulur.

b. Hacim kaybı: Hacim kaybı iki bölümde ele alınabilir.

1. Havada hacim kaybı: Su ile yoğrulup şekil verilen kilin fırına konulmadan kuruması sonundaki hacim kaybıdır (Sarıiz ve Nuhoğlu 1992).

2. Pişmiş hacim kaybı: Kurumuş kil mamulün yüksek ısıda pişirilmesi sırasında meydana gelen hacim kaybıdır. Tuğla imalinde kullanılan killerde her iki hacim kaybı da küçük olmalıdır. Aksi takdirde tuğlada standart boyut sağlama imkanı kaybolduğu gibi ayrıca şekil bozuklukları meydana gelir. Aynı zamanda yüzeyde de keskin köşelerde çatlama ve kırılmalar olur. Ancak yüksek ısıda pişirme sırasında (1100 ° C- 1200 °C) bir miktar hacim kaybı olması mamulün yeterli dayanıma sağlayabilmesi için gereklidir. Pişirme sırasındaki ideal lineer küçülme %6 civarında olmalıdır. Fakat bu ideal değere erişmek her zaman mümkün olamayıp, %4 civarında bir lineer pişme küçülmesi yeterli olabilir. Diğer taraftan havada kuruma rötresi (hacim kaybı) yüksek killerin budinözden hızla geçirilmesi veya basınç altında kalıplanması bu sakıncayı kısmen önler. c. Kilin çekme dayanımı: Şekil verilmiş ve kurutulmuş kil pişmeden önce belirli bir değeri yoktur. Ancak kurutulmuş mamul şeklini koruyabilmeli, fırına girmeden önce çarpma ve sarsıntılarla kırılıp dağılmamalıdır. d. Sıcaklıkta ergime özelliği: Kullanılan kil yüksek ısılarda (600ºC -900ºC) ergiyerek kimyasal ve kristal özelliklerini değiştirmeli ve az su çeken, su ile yumuşamayan sağlam ve az gözenekli bir yapıya sahip olmalıdır. Pişirilmiş tuğla en az 75 kg /cm^2 bir basınca kırılmadan dayanabilmeli ve su emme özelliği % 10 - 15 civarında olmalıdır.

Refrakterlik gerektirmeyen özlü killer az değerli fakat çok önemli plastik hammaddeler polimineral killer ve özlü killerdir. Bunların hepsi mika/illit içerir. Bundan başka: kaolinit, klorit, arasıra vermikülit, ikinci derece ağır mineraller, demir oksit, pigmentler, ve ayrıca karbonatlar (kalsit) ve organik maddeler de içerirler. Tuğla killeri ile lös ve şeyl içeren özlü killer yüksek oranda silt fraksiyonları (0.004-0.063 mm) içermelerinin yanı sıra kil taneleri (0.004 mm< veya bazı otoritelere göre 0.002mm<) ve kum taneleri karışımı (0.063-2 mm) içerebilirler. Silt fraksiyonunda, başlıca kuvars, mika ve diğer genel kayaç formunda mineraller bulunur. İçinde karbonatlı kayaçlarında bulunduğu kayaç parçalarının miktarlarındaki artış malzemedeki tane boyunun artışına yol açar. Genel bir karışım olarak, kil hammaddelerini farklı tonlarda boyayan, oldukça üniform dağılmış demir oksit pigmentleri bulunur. Kil fraksiyonları her zaman polimineral yapı olarak yer alırlar. Bunlar; illit, kaolinit, klorit, vermikülit, smektit ve karışık-tabakalı yapılardır. Kimyasal bileşimleri: SiO_2 içerikleri yüksektir. İçerdikleri F_2O_3 ve sık olarak CaO ve K_2O+ Na_2O bileşikleri pişirme sıcaklıklarını düşürür (Konta, 1995).

Adi killer deyimi, US Geological Survey ve Society for Mining, Metallurgy ve Exploration tarafından yapısal kil ürünler için kullanılmıştır. Bunlar; killer, şeyller, toprak killeri ve buzul killeridir. Bu killer ince taneli olup ıslatıldıklarında plastik davranış gösterirler. Plastik killer, istenendiği bir çok halde şekil verilebilir, kurutulabilir ve belli sertliğe sahip ürünlerin üretiminde pişirme uygulanabilir (Murray, 2006; Koroğlu, Ç., 2007). Tuğla ve kiremit kili olarak veya tuğla-kiremit toprakları yüksek oranda demir içerirler. Bunlar genellikle kaolinit, illit, smektit, klorit ve karışık tabakalı kil mineralleridir. Kalsiyum ve organik madde oranları da nispeten yüksektir (Onuncu Kalkınma Planı Madencilik Politikaları OİK raporu, 2015).

Geleneksel tuğla killeri, seramik tuğla ve çatı kiremiti üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Killer sadece endüstrinin değil, aynı zamanda tıpta [28-30] ve polimerlerde de farklı segmentlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.. Genel olarak, hammaddelerin mineralojik bileşimi, tane boyutu yapısı, özgül yüzey ve nem oranı, sinterlenmiş nihai seramik ürünlerinin rengini, kalitesini ve teknolojik özelliklerinin yanı sıra kimyasal ve fiziksel parametrelerini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Seramik tuğla ve kiremit endüstrilerinin teknoloji uzmanları ve araştırmacıları sıklıkla, geleneksel tuğla killerin kurutma hassasiyetlerinin tane boyutlarına ve özgül yüzeylerine bağlı olduğunu iddia etmektedirler. Bu, ortalama tane boyutları ne kadar küçükse, özgül yüzeylerin o kadar yüksek ve killerin kuruma hassasiyetlerine ve kuruma çatlaklarına karşı duyarlılıklarının o kadar güçlü olduğu anlamına gelir (Demir vd., 2005; Sarani vd.,2013; Aouba vd., 2015;; Tantawy vd.,2017; Safeer vd.,2017; László vd., 2019)

Tuğla yapımında kullanılan killi toprakların kimyasal yapısı:

Killer genel olarak kimyasal bakımından çok değişiklik gösteren maddelerden olduğundan ve karmaşık kimyasal yapılara sahip olduğundan bu konuda bir standardizasyon yapmak mümkün olmamaktadır. Bir genelleme yapmak gerekirse tuğla yapımına en uygun killer illit cinsinden killerdir. Halloyisit ve montmorillonit cinsinden killer fazla su aldıklarından fazla şişme yapacağından ve buna bağlı olarak su kaybı ile hacimsel küçülmeleri çok fazla olacağından uygun görülmezler. Ancak daha öncede belirtildiği gibi dünya yüzündeki bütün killeri standart sınıflardan birine sokmak mümkün değildir. Ayrıca killer saf olarak bulunmadığından tuğla yapımına elverişlilikleri içlerindeki gayri safiyetin cinsi ve miktarına büyük ölçüde bağlı olup, fiziksel özelliklerin deneysel olarak tespiti kimyasal yapılarından daha önemlidir.

Tuğla ve kiremit imalinde kullanılacak killerde bulunabilen yararlı ve sakıncalı safiyet aşağıda verilmiştir. Kum: Tuğla yapımında kullanılacak topraklarda doğal olarak bulunan kum genellikle çok incedir ve taneleri 10-40 μ çapında olup gözle görülmez. Miktar olarak % 30 - 40 civarında bulunup çoğunlukla mikro plaketleride ihtiva eder. Kilin fazla plastikliğini

dengeleyerek kuruma ve pişme sırasındaki hacim değişikliğinin kontrolü için dışarıdan kum, şamot, uçucu kil ve öğütülmüş curuf gibi dolgu maddeleri karıştırmak mümkündür. Kum katıldığı takdirde, bu kumun %70' inin ortalama 0,2 ile 0,5 mm tane çaplarında olması şarttır. Tuğla imalinde %20 ile % 30, kiremit imalinde %10 ile %20 kum karıştırmak normaldir.

Demir: Bazen demir sülfat parçacıkları halinde bulunmakla birlikte çoğunlukla demiroksit ve hidratları şeklinde bulunup kilin kütlesine dağılmıştır. Pişmiş toprak malzemeye kırmızı rengini veren bu son iki şekilde bulunan demirdir. Malzemede bulunan fazla demir veya toplanmış olarak bulunacak demirsülfat ve karbonatları hem pişirmede şişme ve çatlamalar yapar, hemde kullanılan tuğlaların yüzeylerinde çiçeklenme ve yağmur suyu ile akan ve boyayan lekeler yapabilir. Demir sülfat ve karbonatları olabildiği kadar az bulunmalı, toplam demiroksit ve hidratlarıda %8 ile %10 mertebesini geçmemelidir. Kalker: Kalker ve diğer kalsiyum (Ca) bileşikleri her türlü zeminde çok bulunan malzemelerdendir. İnce öğütülmüş ve kilin bünyesine iyice karışmış CaO genellikle çok zararlı değildir. Ancak fazla miktarda bulunduğundan pişmiş sarıya çalan bir renk verir ve pişme sırasında tuğlalarda şekil bozukluklarını meydana getirir. Büyük granürler halindeki Ca tuzları mamül tuğlanın kullanımında havanın nemini emip kalsiyum hidroksit şekline dönüşürken hacim genişlemesi yapar ve tuğlayı özellikle yüzeyde yer yer çatlatır. Pişmiş toprak malzemesi için kullanılacak killerde bulunan ince öğütülmüş kalsiyum oksit miktarı % 8' i geçmemelidir (Bozkurt, 1985; Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992).

Organik maddeler: Killerin mavi, gri, yeşil ve siyah renklerde bulunması çoğunlukla içlerindeki organik maddelere bağlıdır. Pişme sırasında bu organik maddeler 400 ^{o}C' den önce tamamen yanar ve geriye siyah karbon birikintileri bırakır. Organik malzemenin olabildiği kadar az bulunması hem tuğlanın görünümü hemde dayanımı yönünden faydalıdır.

Tuğla üretiminde en büyük iki problem kireçtaşı ve suda çözünen tuzlardır. Kullanılan hammaddenin 500 μm altına öğütülmesi halinde %15'e kadar kirecin çatlamaya neden olmamakta, ayrıca CaO' nin kil minerali ile birleşerek pişme sıcaklığını düşürerek pişmiş ürün mukavemetini artırmaktadır (Yaman, 1997).

Dış cephe tuğlalarında görülen lekeler (çiçeklenme) incelemiş, bu lekelerin çoğunlukla tuğla hammaddesi olan kilden kaynaklandığı, ayrıca sudan, kullanıln yakıttan, harçtan ya da dış etkilerden oluşan çiçeklenmelere de rastlanabilir (Gökmen ve Sunay, 1997).

Suda eriyici tuzlar: Genellikle sülfat ve klorür tuzlarıdır. Bu tuzların %1.5 ve altında bulunması iyi kalitede tuğla ve kiremit imali için şarttır. Fazla miktarda bulunan eriyici tuzlar mamul tuğlanın kullanımında çiçeklenmesi ve yüzeyden dökülmesine yol açar.

Tuğla ve kiremit imaline uygun killi toprakların bir standarda sokulamayacağını ancak yukarıdaki özellikleri aramanın faydalı olacağı belirtilmiştir. Bir fikir vermek amacıyla tuğla ve kiremit imalinde kullanılan

killi zeminlere ait ortalama kimyasal yapı çizelge 2.4'te gösterilmiştir (Bozkurt, 1985).

Tablo 1: Tuğla Killeri İçin Ortalama Kimyasal Yapı

Oksit	**(%) Miktar**
SiO_2	64,5-42,7
Al_2O_3	20,6-16,3
CaO	0,7-9,5
MgO	0,8-6,2
K_2O	1,7-3,6
Na_2O	0,1-0,8
SO_3	0,3-
Fe_2O_3	2,8-7
TiO	1,2-0,95
CO_2	1-5,9
Kızdırma Kaybı.	6,3-11,05
Toplam	100,0

Kaynak: (Bozkurt, 1985).

Tuğla yapımında kullanılacak killi malzemede aranacak diğer bazı özellikler aşağıda verilmiştir.

1. Homojen olmalıdır ve içinde kırılamayacak sertlikte ve büyüklükte çakıl bulunmamalıdır.

2. Silis, feldspat ve silt ince kum boyutunda ve %25 civarında bulunmalıdır. 3 mm'den iri taneler %1'i geçmemelidir.

3. Montmorillonit cinsinden kil çok az olmalıdır, aksi takdirde pişince hacim küçülmesi oranı artar ve çatlama gelişir

4. Fazla miktarda kaolonit olmamalıdır. Kaolonit varlığı pişme sıcaklığını yükselteceğinden pişirme masrafları yüksek olur.

5. Fazla miktarda demir oksit, alkali ve toprak alkali bulunmamalıdır. Pişirme sıcaklığını düşürür, ürünlerin birbirlerine yapışmasına neden olur. Demir bileşiği tuğlaya aranan kiremidi rengi verir.

6. Kalker, dolomit, jips, pirit, ve tuz bulunmamalıdır. $CaCO_3$ bileşeni %25' ten fazla olmamalıdır. Fırınlarda pişmeyi güçleştirir. Sinterleşmeyi sağlamak için ısı yükseltildiğinde (900 ºC' nin üzerinde) tuğlada aranan renk kaybolur. Oksitleyici fırın atmosferinde pişirildiğinde pişme rengi gene kiremidi olur. Fazla kireçli topraklardan yapılan tuğlalarda porozite yüksek olur ve su emme özelliği artar. İri taneli kalker ve dolomit olmamalıdır. Pişme sonrası emeceği su ile tuğlada patlama, çatlama ve dökülme yapar.

7. Kurulacak tesisin kendini amorti edebilmesi ve ekonomik çalışabilmesi için en az 30 yıllık hammadde rezervleri bulunmalıdır (Bozkurt, 1985).

TUĞLA HAMMADDELERİNİN ARANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Tuğla kiremit toprakları bakımından zengin olan neojen havzalarında ve genellikle nehir boylarında uzanan kuvatarner alüvyon (su ile taşınan) ovalarında kısmen de olsa sedimentasyon mevcuttur. Çevre kayaçlardan gelen iri taneli malzemeleri genellikle peryodik olarak sel suları ile taşınır ana yatak içinde adeseler teşkil eder. Adeseler teşekkül ettikten sonra aynı menşeeli ince malzemede bir bant halinde çökebilir. İri taneli adeseler havza kenarı istikametinde birbirleri ile birleşerek devamlı bir seviye haline gelirler. Eğer çevre kayaçlarından peryodik olarak değilse bile devamlı olarak sediment geliyorsa ki çevre morfolojisine ve iklime bağlıdır- bu takdirde çok uzak mesafelerden taşınan ince taneli kumlu killerin kalitesi bozulur ve yatak tamamen değersiz hale gelir. Ancak nakledilen malzemelerle birlikte CO_3 ve SO_4, çeşitli anyonlar, katyonlar, tuzlar ve oksitle de birlikte havzaya taşınırlar ve killerin kalitesini bozabilirler.

Taban morfolojisinin ve akıntı mekaniğinin değişmesi killerin de yatak değiştirmelerine sebep olabilir. Bu takdirde daha homojen ve daha ince taneli kumlu killer teşekkül edebilir ki, tuğla-kiremit imalinde en fazla aranan ve rezervi en geniş olan topraklar bunlardır. Fakat derinde olduklarından işletilme imkanlarından yoksundurlar (Köktürk, 1993).

TUĞLA HAMMADDESİNE UYGULANAN TEKNOLOJİK TESTLER

Seramik ürünlerin üretiminde kullanılacak kil hammaddelerine, bunların teknolojik özelliklerini belirleyecek bir dizi deney uygulanır. Tabiattan alınan hammaddeye önce bir ön deney uygulanır. Söz konusu bu ön deney ile en pratik ve basit olarak o hammaddenin seramik ürünün üretiminde kullanılıp kullanılamayacağına karar verilebilir.

Bu ön deneyin uygulanışı şöyledir. Doğadan alınan kil numunesi üzerine HCl (Hidro klorik asit) damla halinde dökülür. Bu işlemle birlikte numune üzerinde köpürme şeklinde gaz çıkışı gözlenirse kilde CaO_3 (Karbonat) olduğu tespit edilir. Eğer kil HCl ile reaksiyon vermiyor ise suda açılması da kontrol edilir. Çünkü killer genellikle öğütülmeden kullanıldıkları için, gerektiğinde bu özelliğin olup olmadığı da araştırılır.

Bu iki araştırmadan da olumlu sonuç alındığında kil örneklerinin daha

verimli sonuç alınması bakımından numunelerin çeşitli sıcaklıklarda pişirilerek en uygun pişme rengi tespit edilir.

Pişme deneyinden de olumlu sonuç alındığında labaratuvarda ön araştırmalar yapılır. Bu araştırmalar kızdırma kaybının ve kükürdün (SO_3) tespit edilmesine yönelik olarak yapılır. Kükürt oranı %0,5'ten fazla olmamalıdır. Bu şart sağlandığı takdirde numune diğer kontrollere alınabilir.

1. Hammaddeye Uygulanan Fiziksel Testler

Tuğla hammaddelerine uygulanan fiziksel testler bu bölümde sunulmuştur.

1.1. Doğal Nem Tayini

Deneyin amacı tuğla yapımında kullanılacak kil hammaddesinin serbest nem miktarını tespit etmektir. Deney şu şekilde yapılır. Numunenin konacağı beher için sabit tartım yapılır. Usulüne göre alınan kil numunesinden beher içine uygun miktar alınarak (örneğin 100 gr) nemli (yaş) tartım yapılır. Numune etüve alınarak 110 ºC' de 2 saat kurutulur. Desikatöre alınarak soğutulur ve tartılarak kuru tartım değeri tespit edilir. Numunenin nemli ağırlığından kuru ağırlığı çıkarılarak nem yüzdesi aşağıdaki şekilde hesaplanır (TSE 4790).

$$N(\%) = \frac{Ya - Ka}{Ka} x100 \qquad (1)$$

Burada;
N (%): numunenin ağırlıkça nem oranı,
Ya: numunenin nemli ağırlığı (gr),
Ka: numunenin etüv kurusu ağırlığıdır (gr).

1.2. Karbonat Tayini

$CaCO_3$ (kalsiyum karbonat- kalker) genellikle her türlü zeminde değişik oranlarda bulunan bir malzemedir. Tane iriliği bakımından ince olması ve kilin bünyesine iyice karışmış olması durumunda genellikle çok zararlı değildir. Ancak kil ürünün pişmiş malzeme bünyesinde fazla bulunursa ürüne sarımtırak bir renk verir. Pişme sırasında tuğlalarda şekil bozukluklarına neden olur. İri taneler halindeki kalsiyum tuzları tuğla bünyede bulunması durumunda havanın nemini emip kalsiyum hidroksit şekline dönüşürken hacim genişlemesi yaparak tuğla bünyesinde yer yer çatlamalara yol açabilir. Bu sakıncayı önlemek için kalkerler 1 mm iriliğe kadar öğütülürse bu problem ortadan kalkar.

Tuğla imalatında kullanılan kil hammaddelerinden kireç oranını tam olarak sınırlandırmak pek mümkün olmamaktadır. Bazı topraklarda bu oran

%8 de patlama ve dağılma etkisi gösterdiği halde bazı topraklarda %15'e kadar pek zararlı etki göstermemektedir. Bu kirecin daha ince taneler halinde dağılmasından ileri gelir (Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992).

Hammadde içinde fazla miktarda bulunan kalsiyum, mamulün sinterleşme ve erime derecelerini birbirine yaklaştırdığından fazla kireç oranı fırınlarda pişirme tekniğini güçleştirir. Aynı zamanda mukavemeti ve sinterleşmeyi arttırmak için pişirme sıcaklığı yükseltildiğinde kalsiyum karbonatın etkisiyle kırmızı- kiremidi renk kaybolur. Kireç oranı fazla olan topraklardan yapılan mamullerin su emme özellikleri artar, dona karşı mukavemetleri azalır. Bu durum kiremit üretiminde tuğlaya nazaran daha da önem arz eder.

Hammadde bünyesinde bulunan karbonat miktarı aşağıda belirtilen deney ile saptanır.

a. Usulüne uygun olarak alınmış numunelerden bir miktar alınarak 1 mm' lik elekten geçecek şekilde değirmende öğütülür.

b. Öğütülmüş numuneden bir miktar alınarak etüvde 4 saat 110 ºC' de kurutulur.

c. Kurutulan numune desikatöre alınarak soğutulduktan sonra uygun bir miktar ayrılarak tartılır. Bu miktar karbonatlı numune miktarıdır.

Numune üzerine %10' luk HCl damla damla dökülerek işlem yapılır.

e. Köpürme sona erinceye kadar HCl damlatılmaya devam edilir.

f. Reaksiyonun bittiğine karar verildikten sonra numune saf su ile üç dört kez yıkanır.

g. Etüve alınan numune 110 ºC' de 4 saat kurutulduktan sonra desikatörde soğutulup hassas terazide tartılır. Bu tartım karbonatsız numune miktarıdır.

h. Karbonat miktarı: Karbonatlı numune miktarından karbonatsız numune miktarının çıkarılması ile bulunur.

ı. Bulunan karbonat miktarı yüzdeye çevrilerek hammaddedeki karbonat yüzdesi bulunur.

1.3. Yaş Elek Analizi

Ham killeri incelerken; tane büyüklüğüne göre ayrımı ve ardından tespiti ana mineral tiplerinin ayrımında oldukça yardımcı olur. Bu tane fonksiyonlarına göre;

Taşlar,	>20mm.
Çakıl,	20-2mm.
Kaba Kum,	2-0,2mm.
İnce Kum,	0,2-0,02mm.
Humus Kumu,	0,02-0,002m
Kil ,	< 0,002mm' dir.

Bu nedenle, en ince tane büyüklüğü ile ilgili bilgi, mevcut aktif kolloid kil hakkında bilgi verir.

Tane büyüklüğü; yoğunluğu, mekanik mukavemeti ve poroziteyi etkilemektedir. Bu nedenle, tane büyüklüğü tayininde üç faktör bulunmaktadır (Sümer, 1990).

1. Çap
2. Yüzey alanı
3. Tane büyüklüğü dağılımı

İri taneli hammaddelerin tane dağılımı bir seri elekten geçirilerek tespit yapılır. Numunenin elekten geçirilme işlemi bir statik işlem olup, bir maddenin verilen bir elek genişliğinden bir elementin geçmesi veya geçmemesi şeklinde tespit yapılır. İnce taneli hammaddelerde yaş elek analizi, kuru elek analiz metoduna tercih edilir. Çünkü kuru elek analizinde çok ince tozların kaybolması riski söz konusudur. Kil gibi özlü seramik hammaddelerinde 0-2μ tanecik oranının yüksek olması ile kilin özlülüğü doğru orantılı olmaktadır (Üzer ve Tola, 1987).

Tane boyutu imal edilecek ürünün standartlara uygunluğu açısından önem taşır. Yaş elek analizi ile belirlenen 3mm'den büyük tanelerin oranı fazla ise pişme esnasında çatlamalar görüleceğinden bunların topraktan ayrılması gerekir.

Hammadde içinde bulunan kil dışı plastik olmayan minerallerin miktarı ve tane iriliği yaş elek analizi ile belirlenir. Hammadde içinde bulunan kil dışı plastik olmayan minerallerin miktarları tuğla hammaddesinin plastikliğini, kalıplama özelliğini, kuruma özelliğini, kuru kırılma mukavemetini kuruma ve pişme küçülmesini olumsuz yönde etkiler. Yaş elek analizi aşağıdaki şekilde uygulanır:

Deneyde kullanılacak numuneden dörtleme metodu ile uygun miktarda numune etüvde 4 saat süre ile 110 ºC kurutulur. Kurutulmuş numuneden 250 gr ağırlıkta 2 ayrı deney numunesi tartılır. 2 lt hacmindeki 2 ayrı kaba konulur. Deney numunesi üzerine 1 lt su dökülür ve suyu emmesi için 2 saat bekletilir. Bu işlem sonunda kendi kendine akan bir çamur elde edilemezse 500 ml su daha katılır.

Pervaneli açıcıda açılan kil titreşimli elek aygıtından bol su ile süzülür. Bunun için elek analizinde kullanılan elekler üst üste sıralanır ve yukarıdan aşağıya doğru 2 mm – 1 mm - 0,500 mm - 0,250 mm - 0,090 mm - 0,063 mm'lik kullanılır.

Süzme işleminin sürdürülmesi sırasında, titreşimli elek aygıtına, üstten sürekli su vererek belli bir titreşim altında, aygıtın en alt elekten berrak su akıncaya kadar çalışması sağlanır.

Her bir elek üzerinde biriken kalıntılar, aygıt durdurulduktan sonra, önceden tartımı yapılmış olan özel cam kaplara alınır. Bu kaplar etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur. İkinci dolu tartım ile birinci boş tartım arasındaki fark dikkate alınarak yüzde cinsinden her elek üzerinde kalan kalıntının miktarı hesaplanır. Elde edilen bu analiz sonuçlarına göre tane dağılımı grafiği çizilir.

Daha sonra iri tanelerin kontrolü yapılır. Bunun için belirtilen yaş elek analizi uygulandığında 2 mm göz açıklıklı eleğin elek üstü bakiyesi, HCl ile ve göz ile muayene edilerek kalsit, kayaç, organik madde ihtiva edip etmediğine bakılır.

1.4. Plastiklik Suyu Deneyi

Kurutulmuş hammaddeden bir miktar alınarak su ile pervaneli açıcıda açılır. İyice açılan çamur 0,180 mm elekten süzülür. Bu süzüntü alçı plakanın üzerinde bekletilerek plastik bir çamur elde edilir. Bu plastik çamurun yoğrulma kıvamında olduğu, alçı üzerinden kolaylıkla kaldırılabilmesinden ve ele yapışmamasından anlaşılır. Genel olarak yoğrulma suyu değeri büyük olan killer, yoğrulma suyu değeri küçük olan killere oranla daha özlüdürler.

Test edilecek kil hammaddesinden plastik kıvamda standart ölçülerde (25x25x115mm) şekillendirilerek hazırlanan 10' ar adet numune şekillendirildikten hemen sonra hassas terazide tartılır. Önce 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılır. Numuneler bunu takiben 55 ºC' de etüvde 4 saat kurutulur. Daha sonra tekrar etüve yerleştirilerek 110 ºC' de 24 saat kurutulur. Desikatöre alınarak soğutulur ve hassas terazide tekrar tartılır.

Aşağıdaki bağıntıdan plastiklik suyu (yoğrulma suyu - plastiklik sayısı) hesaplanır (TSE 4790).

$$Ps(\%) = \frac{Wy - Wk}{Wk} x100 \qquad (2.2)$$

Burada;
Ps (%): numunenin plastiklik sayısı (%),
Wy: numunenin yaş ağırlığı (gr),
Wk: numunenin etüv kurusu ağırlığıdır (gr).

Deney aşamalarından da anlaşılacağı gibi plastiklik suyu şöyle tanımlanır: kil hammaddesinin plastik kıvamda şekil alabilme niteliğini kazandırıncaya kadar hammaddeye katılan suya plastiklik suyu, bu suyun yüzde olarak hesaplanmasına da plastiklik suyu yüzdesi denir.

1.5. Plastik Şekillendirme

Günümüzde blok tuğla ve benzeri seramik ürünleri şekillendirilmesinde en yaygın olarak uygulanan yöntem ekstrüzyon yöntemidir.

Wight ve Reed'e (2001) göre; plastiklik kavramı seramik literatüründe 100 yıldan beri kullanılmaktadır. Topolojik olarak plastisite (plastiklik); bir bünyenin hacminde kalıcı bir değişiklik olmaksızın şeklini kalıcı olarak değiştirebilme yeteneğidir. Pratik olarak bünye yapısında süreksizlik ve kopmalar olmaksızın şekil değiştirme yeteneğidir. Önemli bir plastik şekil

değiştirme kaybının meydana geldiği; aşırı tane uyumları, sıvının kuruması (süzülmesi) ya da bileşiklerin yeniden dağılımının ortaya çıkardığı şekil değişiklikleri mikro yapıda zararlı dönüşümlere yol açmamalıdır. Deforme olmuş malzeme dengede olmalı ve yeni elastik şeklini koruyabilmelidir. Uygulamada karşılaşılan nedenlerle, ağırlığının verdiği basınca ve ürünün şekillendirilmesi sırasında karşılaşılan kuvvetlere, karşı koyabilecek yetenekte olmalıdır. İşlenebilirlik anlayışı ve çalışma aralığı, plastik davranış anlayışına ek boyut katar. İşlenebilirlik değişen bir plastik kuvvet karşısında bünyenin verdiği cevabı anlatır. Çalışma aralığı yığın bileşimindeki bir değişime karşı olan duyarlılıktır. Kopmanın oluşmadığı önemli plastik deformasyon işlenebilirliği gerektirir. Çalışma (işleme) sertliği –ki zorlama ile birlikte kesme gerilmesini, tane yığılımını ve kusurlu büyümeyi artırır- kopma gerilmesini ve bir plastik bünyenin özellikle işlenebilirliğini sınırlandırır. İşlenebilirlik bünye bileşiminin ve deformasyonunun sebep olduğu spesifik işin ikinci dereceden bir fonksiyonudur. Plastik bir bünyenin işlenebilirliğinin düşük olması dar, yüksek olması ise geniş olarak ifade edilir. Yeterli işlenebilirliğe sahip bir bünye ne kadar sıvı içeriyorsa, o kadar geniş bir çalışma aralığına sahip olmaktadır. Plastik şekillendirme yönteminde yüksek spesifik bir iş (çalışma); kesme hızı ve sıvı içeriğindeki değişmelerde kopma olmaksızın bir bünyenin adsorblama yeteneğine sahip olması arzulanan bir durumdur. Deformasyona zorlanan plastik bir bünyenin kopması (örneğin ekstrüzyonda) küçük bir problemdir. Burada büyük hidrostatik basınç sıvının drenajını azaltır ve yüzey çatlaklarını geciktirir. İşlenebilirlik hem malzemeye, hem de yönteme bağlıdır, çünkü kopmadan önceki maksimum deformasyonu yönteme bağlı olan akış-boyut dağılımı belirler. İşlenebilirlilik plastiklik bir malzeme özelliği olarak nadiren tanımlanır. Gelişmiş plastiklik geniş çalışma aralığının genel göstergesidir (Wight and Reed, 2001).

Ekstrüzyon yaygın bir şekillendirme tekniğidir. Ekstrüzyonla şekillendirme yöntemindeki önemli değişkenler şunlardır; bağlayıcının cinsi ve miktarı, tane boyutu dağılımı ve kolloidal tane içeriği,su muhtevası, tane pıhtılaşması, sıcaklık, vakum işlemi, yağlama ve kalıp dizaynı. Ekstrüzyon sırasında malzeme yüksek basınçlı bölgeden düşük basınçlı bölgeye akar. Akış mekanizması genelde tanburda ve kalıp giriş bölgesinde yapraksı, kalıp içinde kaymanın oluştuğu akma söz konusudur. Plastik ekstrüzyon bünyenin kesme direnci ürünün mukavemeti ile doğrudan ilgilidir ve hıza bağlıdır. Bir yağlama filminin farklı bileşimleri ve sıvı içeriği yüzeyi geliştirir ve bu film kayganlı artırarak düzgün bir yüzey oluşumu sağlar. Malzemenin akış davranışı; kalıp dizaynı ve bünyenin kesme direnci ile belirlenir (Wight and Reed, 2001).

1.6. Kuru Kırılma Mukavemeti Testi

Kurutulan tuğla ürünlerin pişirme öncesi taşıma vb. mekanik etkilere yeterince dayanıklı olması gerekmektedir. Deney aşağıdaki şekilde uygulanır.

Plastik kıvamda hazırlanan çamur elle iyice yoğrularak içinde bulunan hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. 25x 25 x 115 mm boyutlarında standart kalıplara dökülerek her seri için en az 10 adet numune hazırlanır. Bu numuneler etüvde önce 55 ºC' de 4 saat kurutulur. Daha sonra numuneler 110 ºC' de 24 saat kurumaya bırakılır. Kurutulan numuneler etüvden alınarak desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulur.

Deney numunesi desikatörden çıkarılır çıkarılmaz deney cihazının mesnetleri arasına yerleştirilir. Bu mesnetler deney cihazı ve kil tipine bağlı olarak 50 mm veya 100 mm açıklıktan birine ayarlanabilir. Deney numunesi her bir mesnede yanlardan 6,5 mm çıkıntı ile uygulanır. Mesnetlerin ortasından dik açı ile numuneye yükleme parçası vasıtası ile kuvvet uygulanır. Kuvvet uygulama numune kırılıncaya kadar devam edilir. Uygulanan kuvvetin hızı 450 gr/dakikayı (4,5 N/dak) geçmemelidir. Deneyde kare kesitli numune kullanılmış ise numunenin kırıldığı yerin genişlik ve yüksekliği kumpasla 0,1 mm hassasiyetle ölçülür.

Deney esnasında kuvvetin tatbik edildiği noktadan 10 mm'den fazla bir noktadan kırılma gerçekleşirse numunede daha önceden bir hasar meydana geldiği düşünülür ve deney sonucu ortalamaya dahil edilmez. Numunenin kırıldığı yer üzerindeki ölçülen en az üç noktanın ölçümünün aritmetik ortalaması alınarak hesaplamada kullanılır. Hesaplama aşağıdaki şekilde yapılır (TSE 4790).

$$M = \frac{3xpxL}{2xaxh^2} \qquad (2.3)$$

Burada ;
M: kuru kırılma mukavemeti kg/cm^2 (N/mm^2),
P: kırılma kuvveti (kgf),
L: mesnetler arasındaki mesafe cm (mm),
a: numunenin kırıldığı yerin genişliği cm (mm),
h: numunenin kırıldığı yerin yüksekliği cm (mm)' dir.

Kuru kırılma deneyinde elde edilen değerlerden kilin özlülüğü konusunda bilgi edinilebilir. Kuru kırılma mukavemeti değeri büyük olan kil, bu değerin düşük olduğu killere göre daha özlüdür. Kuru mukavemeti etkileyen diğer bir faktörde mamulün kuruma süresi ve kuruma sıcaklığı olmaktadır. Sıcaklığın düşük olduğu bir ortamda yetersiz olarak kurutulan kil ürünlerin kuru mukavemetleri azalır.

Ürünün şekillendirilmesinde uygulanan yöntem de kuru mukavemeti

etkileyen faktördür. Örneğin; döküm yöntemiyle şekillendirilen killer normal şartlarda kurutulduklarında plastik ve kuru şekillendirilen killere oranla daha büyük bir kuru mukavemete sahip olurlar.

2. Pişmiş Tuğla Ürünlere Uygulanan Fiziksel Ve Mekanik Testler

Tuğla ürünlerin pişirilmesinden sonra gerekli fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan testler bu bölümde sunulmuştur.

2.1. Kuruma Ve Toplam Küçülme Deneyleri

Killer kurutulduklarında bünye yapılarının küçülmesi, şekillendirme suyunun kilden uzaklaşması ile açıklanabilmektedir. Kil tanecikleri arasında yer alan su, kilden uzaklaştıkça tanecikler birbirlerine yaklaşırlar ve küçülme ortaya çıkar. Bir kil ürünü ne kadar çok su ile şekillendirildi ise bu küçülme de o kadar fazla olur. Genelde killerin küçülmelerini etkileyen en önemli faktör kilin özlülük derecesidir. Özlü killer özsüz killere göre daha çok küçülürler.

İncelenmesi yapılan hammaddenin hangi sıcaklıkta veya sıcaklıklarda küçülmesi tespit edilmek isteniyorsa numuneler bu sıcaklıklarda pişirilir. Pişirme sıcaklığı ile pişme küçülmesi doğrudan ilgilidir. Bu nedenle pişme küçülmesi değeri belirlenirken, pişme sıcaklığının da mutlaka verilmesi gerekir.

Çeşitli yöntemlerle kurutulan bir kil, yoğrulma suyunu tamamen verinceye kadar küçülür. Bu kuruma küçülmesini takip eden aşamada kil pişirildiğinde de küçülme sürer. Ancak pişirme sırasında devam eden küçülmenin nedeni kilin şekillendirme suyu değildir. Bu etkenler;

a. Bünyedeki organik maddelerin yanması.
b. Bünyedeki gazların uzaklaşması.
c. Kristal suyun ayrılması.
d. Kristal yapıdaki değişiklikler olarak sıralanabilir.

Pişme sıcaklığının artmasına paralel pişme küçülmesi ve buna dayalı olarak da toplu küçülme değerleri artar. Çok özlü killer özsüzlere oranla daha büyük pişme ve toplu küçülme değerleri gösterirler (Akyüz vd., 1987; Üzer ve Tola, 1987).

Doğrusal kuruma küçülmesi aşağıdaki bağıntıdan, numunenin plastik uzunluğunun yüzdesi olarak hesaplanır (Menon and Matthews, 1999).

$$\%Sd = \frac{Lp - Ld}{Lp} x100 \qquad (2.4)$$

Burada;

S_d: doğrusal kuruma küçülmesi yüzdesi (%)
L_p: deney numunesinin plastik uzunluğu (mm)

L_d: deney numunesinin kuru uzunluğu (mm)' dir.

Pişmeden sonraki toplam doğrusal küçülme aşağıdaki bağıntıdan numunenin plastik uzunluğunun yüzdesi olarak hesaplanır:

$$\%St = \frac{Lp - Lf}{Lp} x100 \qquad (2.5)$$

Burada:

S_t : toplam doğrusal küçülme (%),

L_p: deney numunesinin plastik uzunluğu (mm),

L_f: deney numunesinin pişmiş uzunluğu (mm)' dir.

Tuğla üretimindeki önemli sorunlardan biri de parçadan parçaya boyutların sabit kalmaması, birinden diğerine farklı küçülmeler göstermesidir. TS 705' de "Tuğla gerçek boyutlarının sınır değerleri ve boyutlar arasındaki kabul edilebilecek farklar" gösterilmiştir. Buna göre tuğla üretiminde TSE standartlarında belirtilen boyutlara uygun tuğla üretimi önem kazanmaktadır.

Seramik ürünlerde farklı küçülmenin sebepleri şunlardır:

a. Kullanılan hammaddelerin tane iriliğinin yada mineral bileşiminin değişmesi.

b. Çamur hazırlamada özellikle su içeriğinde oluşan değişmeler.

c. Kullanılan kalıplardan kaynaklanan hatalar.

d. Pişirme bölgesindeki sıcaklık farkları, atmosferdeki değişmeler olabilir.

Pişme sonrasında istenilen boyutta numune elde etmek için boyutların önceden hesaplanması aşağıda verilmiştir (Akyüz vd., 1987).

$$Md = \frac{100xLf}{100 - St} \qquad (2.6)$$

Burada;

Md: model(kalıp) ölçüsü (mm),

Lf: numunenin pişmiş uzunluğu (mm),

St: Toplam doğrusal küçülme yüzdesi (%),

Örnek: Toplam küçülmesi % 6 olan bir tuğla numunesinde pişme sonrası boyu 185 mm olan bir ürün elde etmek için kalıp boyunun hesaplanması aşağıdaki örnekte gösterilmiştir.

$$Md = \frac{100x185}{100 - 6} = 198{,}6$$ sonuç mm olarak bulunur.

2.2. Su Emme Deneyi

Deneyin amacı üretilen mamulün kalitesini belirlemeye yöneliktir. Bu deney ile hangi sıcaklık derecelerinde pişirildiğinde kiremit ve tuğla üretilebileceği belirlenir. Su emme değerinin tespit edilmesi istenen kil hammaddesinden standart olarak üretilen numuneler (25x25x115 mm) normal pişme şartlarında belirli sıcaklıklarda pişirilir. Ortamdan nem almaması için desikatörde soğutulur. Değişmez ağırlıkta hassas terazide tartımları yapılır. Bu numuneler daha sonra su içine konularak 4 saat kaynatılır. Kaynatmanın sonunda numuneler kaptaki su içinde 24 saat bekletilir. Sudan çıkarılan numuneler üzerlerindeki parlaklık giderilmeden kurulanır, temizlenir ve hemen hassas terazide yaş tartıları yapılır. Bu tartılarda numune sayısı birden fazla ise elde edilen değerlerin ortalaması alınır. Yaş tartım ile kuru tartım arasındaki fark numunenin emdiği su miktarını verir. Su emme oranı yüzde olarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$a_s = \frac{ms - mk}{mk} x100 \qquad (2.7)$$

Burada:

a_s: tuğlanın ağırlıkça su emme oranı (%)

mk: değişmez kütleye kadar kurutulmuş numunenin kütlesi (kg)

ms: suya doymuş tuğla numunesinin kütlesi (kg)

Su emme, pişen kilin açık porlarına (gözenek) alabildiği su olarak tanımlanabilir. Su emmeyi etkileyen faktörler kilin özlülüğü ve pişme sıcaklığıdır. Özlülük ve pişme sıcaklılığı arttıkça kilin su emme yeteneği azalır.

Bir kilin su emme değeri söylenirken hangi sıcaklıklarda piştiğinin de belirtilmesi gerekir. Bu yapılmadığında tanımlama eksik olur (Üzer ve Tola, 1987; Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992).

2.3. Dona Dayanım Testi

Su kabına deneyin uygulanacağı tuğla numunesinin uzunluğunun yaklaşık 1/4' ü kadar derinlikte su konur ve tuğla uzunluğu düşey olacak durumda su içine yerleştirilir. Bir saat sonra tuğlanın yarısı, ikinci saatin sonunda 3/4' ü ve 24. Saatin sonunda ise tamamı su altında kalacak şekilde kaba su konulur. Tuğlalar bu konumda 48 saat su içerisinde bırakıldıktan sonra, sudan çıkarılarak beklenmeksizin soğuk hava dolabına yerleştirilir. Dolap sıcaklığı 4 saatte -15 ºC' ye düşecek şekilde ayarlanır. Numuneler bu sıcaklıkta 2 saat bırakıldıktan sonra soğuk hava dolabından çıkarılarak oda sıcaklığındaki su ile dolu su kabına tamamen su içinde kalacak şekilde yerleştirilir. Donun çözülmesi için su içinde 1 saat bekletilir. Bu işlem 25 kez tekrarlanır. Her defasında numuneler dikkatle incelenerek çatlama, kopma pullanma, dağılma ve benzeri hasarların meydana gelip gelmediği

tespit edilerek kayıt edilir.

İnceleme sonuçlarından şüphe edilmesi halinde, dona dayanıklılık deneyinden geçmiş tuğlalar üzerinde basınç dayanımı deneyi de uygulanarak belirtilen değerlere uygun olup olmadığına bakılır (TSE 705).

2.4. Sertlik Derecesi Tayini

Deney her sıcaklıkta pişen en az 5 adet pişmiş deney numunesi üzerinde yapılır. Mohs cetvelinde bulunan minerallerin keskin kenarları, numunenin yüzeyine hafifçe bastırılarak sürülür. Mineraller en yumuşağından en sertine doğru sıra ile uygulanır ve denemeye numune çizilinceye kadar devam edilir. Numuneyi çizen mineralden bir önceki mineralin sertlik derecesi numunenin sertlik derecesine eşit kabul edilir. Bu 5 numunenin yüzey sertlik derecelerinin aritmetik ortalaması numunenin sertliği olarak ifade edilir (TSE 705).

Çizelge 2.6. Mohs sertlik çizelgesi

Mineral	Sertlik Derecesi
Talk	1
Jips	2
Kalsit	3
Fluorid	4
Apatit	5
Feldspat	6
Kuvars	7
Topaz	8
Korund	9
Elmas	10

Seramik ürünlerde "sertlik" terimi konusunda ayrıntılı bir tanım yoktur. Sertlik terimi kazınmaya karşı mukavemet olmakla birlikte aşınmaya karşı mukavemet olarak ta anlaşılır.

Bir seramik ürünün aşınmaya karşı mukavemeti aşağıda belirtilen özelliklere bağlıdır.

a. Malzemenin yapısı, bünyesi ve sertliği.
b. Hazırlama yöntemi (sulu, plastik, pres, yarı kuru pres vb.),
c. Bağ şekli (seramik bağı, kimyasal bağ, vb. ile yapılan bağ),
d. Bağ miktarı
e. Vitrifikasyon kapsamı (camlaşma özelliği)
f. Materyalin incelendiği pişirme sıcaklığı.

Pişirme sıcaklığı 950 -1050 ^{o}C ve pişme rengi kiremidi olan, tuğla ürünlerin sertliği en az 3-5 arasında bulunması gerekir (Köktürk 1993, Sarıiz ve Nuhoğlu, 1992).

2.5. Zararlı Kireç Ve Manyezi Deneyi

Deney uygulanacak tuğlalar, içinde oda sıcaklığında su bulunan su kabına ve tamamen su altında kalacak şekilde yerleştirilir. Bu şekilde 24 saat bekletildikten sonra, kap bir ısı kaynağının üzerine konularak kaynatılır. Tuğla numuneleri kaynamakta olan su içinde iki saat tutulur. Sonra su kabı, içindeki su ve tuğlalar ile birlikte oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır.

Soğuyan tuğlalar, sudan çıkarılarak gözle muayene edilir. Çatlama, kopma, pullanma, dağılma vb hasarların oluşup oluşmadığına bakılır. İnceleme sonuçlarından şüphe edildiği hallerde zararlı kireç ve manyezi deneyinden çıkmış numuneler ayrıca basınç dayanımından geçirilir. Kullanma sırasında zararlı olabilecek çatlak, kopma, pullanma ve dağılma gibi hasarlar görülmemelidir. Bu hasarların görülmesine rağmen inceleme sonuçlarından şüphe edilmesi halinde deneyden geçmiş, tuğlaların basınç dayanımları ve bunların aritmetik ortalamaları, standartlarda belirtilenlerin %85' inden küçük olmamalıdır (TSE 705).

2.6. Ateş Zayiatı Testi

Deneyin amacı pişme sonucunda numunede meydana gelen ağırlık kaybının saptanması amacıyla yapılır.

Deney şu şekilde uygulanır: Standart şekillerde hazırlanan numuneler (25x25x115mm) 110 ºC' de 24 saat kurutulduktan sonra, desikatöre alınarak soğutulur. Oda sıcaklığına kadar soğuyan numuneler desikatörden alınarak zaman kaybetmeden hassas terazide tartımları yapılarak kaydedilir.

Numuneler pişirme fırınına konularak normal pişirme şartlarında 800 - 900-1000-1100 ^{0}C'lerde pişirilir. Pişirme sonunda fırından alınan numuneler desikatöre konularak oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır. Desikatörden alınan numuneler zaman kaybetmeden tekrar hassas terazide tartılarak pişmiş ağırlıkları belirlenir (TSE 4790).

2.7. Birim Hacim Ağırlığı Deneyi

Birim hacim ağırlığı deneyi aşağıda açıklandığı biçimde yapılır. Deney numuneleri, sıcaklığı 110 ^{0}C ±5 ^{0}C'ye ayarlanmış etüve yerleştirilerek değişmez kütleye kadar kurutulur. (Dört saat ara ile birbirini izleyen iki tartım arasındaki fark son tartımın %0,5'i kadar veya daha az olduğunda değişmez kütleye erişildiği kabul edilir) Bu tartım grama yuvarlatılarak kg cinsinden tespit edilir (mk). Kurutulan deney örnekleri oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra boyutları kumpas kullanılarak hassas olarak ölçülür. Bu boyutlardan yararlanarak, delik ve boşlukları ile birlikte tuğlanın hacmi dm^3 cinsinden ve bindebire yuvarlatılarak hesaplanır (Vh). Deney numunesinin hacim ağırlığı aşağıdaki bağıntı ile tam sayıya

yuvarlatılarak bulunur.

$$Dh = \frac{Mk}{Vh} x1000 \quad (kg/m^3) \tag{2.10}$$

2.8. Görünür Yoğunluk, Bulk Yoğunluk Ve Porozite Deneyleri

Belirlenen sıcaklıklarda sinterlenen deney numunelerinin görünür yoğunluk, bulk yoğunluk ve porozite oranlarının belirlenmesi için Arşimet prensibi uygulanarak suda kaynatma deneyi uygulanır. Kaynar suda 2 saat bekletilen numunelerin tartım işlemlerinden sonra aşağıdaki formüller uygulanarak bu değerler hesap edilir.

$$Zs.Sc.G. = \frac{W_1}{(W_1 - W_2)} \tag{2.11}$$

$$Bd = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)} \tag{2.12}$$

$$\%P = \frac{(W_3 - W_1)}{(W3 - W2)} x100 \tag{2.13}$$

Burada;
Zs.Sc.G.: Zahiri spesifik gravite (görünür yoğunluk),
Bd: Bulk yoğunluk,
% P: Görünür porozite,
W_1: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),
W_2: Kaynatma ile suya doygun hale getirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),
W_3: Kaynatma ile suya doygun hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr),

2.9. Basınç Mukavemeti Testi

Deneyin amacı standart ölçülerde hazırlanan numunelerin değişik pişirme sıcaklıklarındaki basınç mukavemetlerini tespit etmektir.

Standart dikdörtgen prizma olarak (25x25x115 mm) üretilen numuneler kurutulduktan sonra her sıcaklık için en az 10 adet deney numunesi pişirilir.

Pişirilen her bir numuneden, basınç uygulanacak yüzey alanı 10- 15 cm^2, yüksekliği 1,5 cm olacak şekilde en az iki adet deney numunesi kesici çarkla kesilerek hazırlanır. Her bir sıcaklık için, toplam 10 adet deney numunesi hazırlanır. Hazırlanan numune deney presinin başlıkları arasına ve

tam ortaya gelecek şekilde yerleştirilir. Devamlı artan bir yük, basınç gerilmesinin saniyede 5- 6 kgf/cm^2 artmasını sağlayacak şekilde ve çarpmasız olarak ve numune kırılana kadar alt ve üst yüzeylere dik olarak uygulanır. Kırılmayı oluşturan yük tespit edilir (TSE 705; TSE 4790).
Numunenin basınç mukavemeti aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Fb = \frac{Pk}{Ao} xk \qquad (2.8)$$

Burada;
Fb: Numunenin basınç mukavemeti kgf /cm^2 (N/mm^2),
Pk: Kırılma anındaki yük kgf (N),
A_0. Numunenin basınç uygulanan yüzünün alanı cm ^{2}(mm ^{2}),
k: Numunenin biçim katsayısı, (0,5)' dir.

2.10. Üç Nokta Eğilme Deneyi

Pişmiş seramik ürünlerin eğilme dayanımlarını belirlemek için bölüm 2.8.5'te verilen deney pişmiş ürünlere uygulanır. Elde edilen eğilme dayanımlarının hangi pişirme sıcaklıklarında elde edildiği mutlaka belirtilmelidir.

SONUÇ

Günümüzde inşaat sektöründe standartlara uyum sağlayan sürüdürülebilir yapı malzemelrinin üretimi önem kazanmıştır. Türkiye'de halen yapılarda duvar malzemesi olarak kullanılan malzememlr içinde yapı tuğlaları önde gelmektedir. Bunun nedenleri arasında tuğla hammaddesinin bol, ucuz ve kolay temin edilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca tuğla ürünlerin geleneksel yapı malzemesi olması, diğer duvar bloklarına göre daha ekonomik ve yerel olarak kolay temin edilebilmesi tuğla ürünlerin cazibesini korumasını sağlamaktadır. Bununla birlikte günümüzde doğal çevrenin korunması ve enerji etkin malzeme üretimi ön plana çıkmıştır. Günümüzde enerji etkin yapıların gerektirdiği performansı sağlayamaya katkı yapacak yalıtım performansı ve çevreye uyumlu tuğla ürünlerin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda bu konuların öncelikle dikkate alınması önem taşımaktadır.

REFERANSLAR

Akyüz, T., Güngör , N. ve Özsever, S., 1987 Bazı Seramik Hammaddelerinin Edxrf ve Klasik Yöntemlerle Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Birbiri İle Karşılaştırılması, **Seramik Teknik Kongresi**, 409, 410, İstanbul.

Anonim, 1986, Fabrika Tuğlaları- Duvarlar İçin Dolu ve Düşey Delikli, **Türk Standartları Enstitüsü**, 705 Nolu Standart, Ankara.

Anonim, 1986, Tuğla ve Kiremit Toprakları Deney Metodu, **Türk Standartları Enstitüsü**, 4790 Nolu Standart, Ankara.

Anonim, 1986, Tuğla ve Kiremit Toprakları Deney Metodu, **Türk Standartları Enstitüsü**, 4790 Nolu Standart, Ankara.

Aouba L, Coutand M, Perrin B, Lemercier H. Predicting thermal performance of fired clay bricks lightened by adding organic matter: Improvement of brick geometry. *Journal of Building Physics*. 2015;38(6):531-547. doi:10.1177/1744259115571078

Barshad, I., 1952, "Factor Affecting the Interlayerexpansion of Vermiculite and Montmorillonite with Organic Subtances", Soil Sci. Amer. Proc., No: 16, pp 176-182.

Bozkurt, R., A, 1985, Mineral Tanıma El Kitabı, **Anadolu Üniversitesi Yayını**, 13-26, Eskişehir.

Gökmen, S., Sunay, A.,1997, Dış cephe tuğlalarında görülen vanadyum kaynaklı lekelerin (çiçeklenme) incelemesi**, VIII. Ulusal Kil Semp**. 385-390, Kütahya.

Demir, M.S. Baspınar, M. Orhan, Utilization of kraft pulp production residues in clay brick production Build. Environ., 40 (2005), pp. 1533-1537

Konta, J., 1995, Clay and Man: clay raw materials in the service of man, **Applied Clay Science**, 10, (4), 275-335.

Koroğlu, Ç., 2007. Ağaçlı-Bolluca Yöresi Seramik Killerinin Malzeme Özelliklerinin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111 sayfa.

Köktürk, U., 1993, Endüstriyel Hammaddeler, **Dokuz Eylül Üniversitesi**, Yayın No:205, 250-266, İzmir.

László A. Gömze, Ludmila N. Gömze, Emese Kurovics and György Benedek (2019). Conventional Brick Clays as a Challenge of Materials Science – New Explanation of Drying Sensitivities IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 613 012005.
doi:10.1088/1757-899X/613/1/012005.

MA Tantawy, Ramadan SA Mohamed, Middle Eocene clay from Goset Abu Khashier: Geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture, Applied Clay Science, Volume 138, 2017, Pages 114-124, ISSN 0169-1317, https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.005.

Menon,P.,S., and Matthews, M.I., 1999, Applied technology harnesses adverse atmosferic contions, journal of **American Ceramic Society**,V. 78, No. 6, 97-100.

Murray, H. H., 2006. Common Clays. Development in Clay Science, 2: 141-145. doi.org/10.1016/S1572-4352(06)2008-3

Safeer Ahmad, Yaseen Iqbal, Raz Muhammad, Effects of coal and wheat husk additives on the physical, thermal and mechanical properties of clay bricks, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Volume 56, Issue 3, 2017, Pages 131-138, ISSN 0366-3175, https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.02.001

Akıllı Ulaşım Sistemlerinde Farkındalığın Artmasında Eğitimin Rolü ve Önemi

Necla TEKTAŞ[1]
Mehmet TEKTAŞ[2]

1- Prof.Dr.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi Ekonometri Bölümü. ntektas@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8190-4532
2- Prof.Dr.; Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. mtektas@bandirma.edu.tr ORCID No: 0000-0001-9564-8069

ÖZET

Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım altyapısına entegre edilmesiyle trafik yönetimini, yol güvenliğini ve sürdürülebilir hareketliliği geliştirmeyi hedefleyen yenilikçi çözümler sunmaktadır. AUS'nin başarısı yalnızca teknik kapasiteye değil, bireylerin ve toplumun bu sistemlere yönelik algı ve farkındalık düzeylerine de bağlıdır. Algı, bireylerin çevresel uyaranları yorumlama sürecini; farkındalık ise bu sürecin bilinçli biçimde izlenmesini ve yönlendirilmesini ifade eder. Bu iki kavram, kullanıcıların teknolojiye güven duymasını, fayda algısını ve kullanım niyetini şekillendiren temel psikososyal bileşenlerdir. Bu araştırmanın amacı orta öğretim öğrencilerinin akıllı ulaşım sistemlerine karış algı tutum ve farkındalık düzeylerini belirlemektir. Balıkesir'de kolayda örnekleme yöntemi kullanılarak ortaöğretim öğrencileriyle saha çalışması yapılmıştır. Çalışmada veri toplama aracı olarak anket hazırlanmıştır. Oluşturulan ankette öğrencilere demografik bilgiler ve aus ile ilgili algı ve farkındalık ölçmeye yönelik sorular sorulmuştur. Toplanan verilerin istatistik analizleri sonrasında gençlerin AUS'ne ilişkin kavramsal farkındalıklarının düşük, ancak bileşenlere yönelik maruziyetlerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Katılımcıların yalnızca %30,9'u "Akıllı Ulaşım Sistemleri" teriminden haberdardır. Öğrenciler navigasyon, arka görüş kamerası ve şerit takip sistemi gibi teknolojilerle sıkça karşılaşmalarına rağmen bu bileşenleri bütüncül bir sistemin parçası olarak tanımlamakta zorlanmaktadır. Ayrıca öğrencilerin AUS hakkında en çok sosyal medya aracılığıyla bilgi edindikleri, okul etkinlikleri ve ders içi öğrenmenin ise sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Araştırmanın sonuçları gözlemsel deneyimlerin kavramsal bilgiye dönüşemediğini; dolayısıyla meta bilişsel farkındalık eksikliğini işaret etmektedir. AUS'nin formel eğitim içinde disiplinler arası olarak ele alınması, aktif ve deneyimsel öğrenme yöntemleriyle desteklenmesi gerekmektedir. Eğitim temelli farkındalık artışı, geleceğin bilinçli ve teknolojiye duyarlı kullanıcılarını yetiştirmede stratejik bir rol üstlenmektedir.

Anahtar Kelimeler – Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS); Farkındalık, Ortaöğretim Öğrencileri; Dijital Okuryazarlık, Eğitim.

GİRİŞ

Günümüz kentleşme süreçleri, artan nüfus yoğunluğu ve mobilite talepleri, ulaşım altyapılarının sürdürülebilirliğini tehdit eden en önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım yönetimine entegre edilmesiyle trafik akışını optimize eden, yol güvenliğini artıran ve çevresel etkileri azaltan yenilikçi çözümler olarak öne çıkmaktadır. AUS, sadece teknolojik bir dönüşümün değil, aynı zamanda toplumsal davranışların, kamu politikalarının ve şehir

planlamasının yeniden şekillenmesinin de temel araçlarından biridir (Tektaş ve Tektaş, 2019).

Son yıllarda yaşanan hızlı kentleşme, ulaşım talebindeki artış ve sürdürülebilirlik baskısı, AUS'nin önemini giderek artırmıştır. Birleşmiş Milletler (2023) verilerine göre, dünya nüfusunun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamaktadır ve bu oranın 2050 yılına kadar %68'e yükselmesi öngörülmektedir. Bu durum, akıllı ulaşım altyapılarına olan ihtiyacı küresel düzeyde kritik bir boyuta taşımıştır. Grand View Research (2024) raporuna göre, AUS pazarı 2024 itibarıyla 30 milyar ABD doları büyüklüğe ulaşmış olup, 2030 yılına kadar yıllık ortalama %15 oranında büyüme ile 100 milyar $ aşması beklenmektedir (Tektaş, Tektaş, & Yıldırım, 2024). Bu veriler, AUS'nin yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda ekonomik bir yatırım alanı olarak da stratejik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir (Tektaş &Tektaş, 2022).

Avrupa Birliği ülkeleri, AUS'yi ulaşım stratejilerinin odağına almış; 2023 yılı itibarıyla şehirlerin %60'ından fazlası akıllı trafik yönetim sistemlerini aktif olarak kullanmaktadır. Bu oranın 2030'da %85'e çıkarılması hedeflenmektedir (European Commission, 2023). Benzer biçimde, Kuzey Amerika'da ABD ve Kanada, otoyol ve kentsel ulaşım altyapılarında AUS teknolojilerini yaygın biçimde benimsemiş; 2025 itibarıyla bu altyapıların %70'inde akıllı sistemlerin aktif olarak kullanılacağı öngörülmektedir (ITS America, 2024). Asya-Pasifik bölgesinde Japonya ve Güney Kore gibi ülkeler, AUS yatırımlarını trafik güvenliği, enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması hedefleri doğrultusunda hızla artırmaktadır (Tektaş & Tektaş, 2023). Güney Kore örneğinde, akıllı trafik ışıkları ve sensör tabanlı sistemlerin uygulanması sonucunda trafik verimliliğinde %20 oranında artış sağlanmıştır (KITA, 2023).

AUS'nin benimsenmesinde teknik altyapının yanı sıra toplumsal faktörler de belirleyici bir role sahiptir. Toplumun bu sistemlere yönelik farkındalığı, güven düzeyi, algılanan fayda ve kullanım kolaylığı, teknolojinin sürdürülebilir başarısını etkileyen ana unsurlar arasında yer almaktadır. Nitekim yapılan araştırmalar, AUS'ye ilişkin farkındalığın artmasıyla birlikte toplumsal kabulün ve olumlu tutumların da yükseldiğini göstermektedir (David et al., 2025). Örneğin Almanya'da gerçekleştirilen bir araştırmada katılımcıların %72'si AUS'un trafik güvenliğini artırdığına ve çevreye olumlu etkiler sağladığına inandığını belirtmiştir (Fraunhofer Institute for Industrial Engineering [IAO], 2024).

Türkiye'de bu küresel eğilime paralel olarak önemli ilerlemeler kaydetmektedir. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı (2024) verilerine göre, 2025 yılı itibarıyla büyük şehirlerdeki trafik yönetim sistemlerinin yaklaşık %75'i akıllı ulaşım altyapılarıyla desteklenmektedir. Bu sistemlerin temel amaçları arasında seyahat sürelerinin azaltılması, trafik güvenliğinin artırılması, mevcut yol kapasitelerinin daha etkin kullanılması, enerji verimliliğinin sağlanması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi

bulunmaktadır (Tektaş &Tektaş, 2019). Ayrıca ULAK Haberleşme tarafından geliştirilen teknolojiler ile Türkiye'nin AUS alanındaki rekabet gücünü artırmakta ve ulusal teknoloji kapasitesine önemli katkılar sunmaktadır (Anadolu Ajansı, 2025).

Türkiye'de yürütülen saha araştırmalarında, toplumun %65'inden fazlasının AUS'nin trafik güvenliğini artırdığına ve seyahat deneyimini iyileştirdiğine inandığı (David et al., 2025). Bununla birlikte, toplumsal farkındalık, güven ve kullanım alışkanlıklarının geliştirilmesi için etkili iletişim stratejileri, eğitim programları ve kamu politikalarının güçlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Dolayısıyla AUS'nin başarılı bir şekilde yaygınlaştırılması, sadece teknolojik değil, aynı zamanda sosyal kabul süreçlerinin ve davranışsal dönüşümün de yönetilmesini gerektirmektedir.

Toplumda AUS farkındalığının artırılması, bu sistemlerin etkin işleyişi ve yaygınlaşması için vazgeçilmezdir. Günümüzde büyük veri, yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi teknolojilerle entegre çalışan AUS, şehirlerin geleceğe hazırlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir (Tektaş & Tektaş, 2024). Ancak teknolojik altyapının yanı sıra, kullanıcıların dijital okuryazarlık seviyesinin artırılması, uygulamaların kullanıcı dostu olması ve kamu katılımının sağlanması AUS başarı kriterlerindendir (FutureX Institute, 2025). Bu bağlamda, AUS'ye yönelik farkındalığın toplumun tüm kesimlerine, özellikle gençlere ulaştırılması stratejik önem taşımaktadır.

Orta öğretim çağındaki öğrenciler, teknolojik gelişmelere adaptasyon yetenekleri yüksek olan bir grup olarak AUS farkındalığının artırılması için önemli bir hedef kitleyi temsil eder. Bu yaş grubundaki öğrencilerin teknoloji kullanım becerileri ve dijital yetkinlikleri, AUS uygulamalarını anlamaları ve benimsemelerinde belirleyici rol oynar. Ayrıca, bu öğrencilerin ulaşım güvenliği ve sürdürülebilir hareketlilik bilincine sahip olmaları hem bireysel hem de toplumsal yaşam kalitesinin yükseltilmesine katkı sağlar.

Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Ortaöğretim Öğrencileri

AUS kentlerin sürdürülebilir gelişimi ve ulaşım güvenliğinin sağlanmasında stratejik bir role sahiptir. Bu sistemler; trafik yönetimi, yolcu bilgilendirme panoları, otomatik ücretlendirme, araç takip, sensör tabanlı trafik kontrolü ve veri analitiği gibi teknolojik bileşenleriyle ulaşım süreçlerini daha verimli, güvenli ve çevreci hale getirmeyi amaçlamaktadır. Ancak, bu teknolojik dönüşümün başarısı, yalnızca altyapı yatırımlarına değil, aynı zamanda toplumun bilgi, farkındalık ve tutum düzeyine de bağlıdır. Bu bağlamda, toplumun genç bireyleri olan ortaöğretim öğrencilerinin AUS'ye yönelik algı, bilgi ve farkındalık düzeyleri kritik öneme sahiptir.

Ortaöğretim çağındaki öğrenciler, dijital teknolojilere adaptasyon hızları, yenilikçi düşünme becerileri ve dijital okuryazarlık düzeyleri bakımından AUS farkındalığının yaygınlaştırılmasında kilit bir hedef grubu oluşturmaktadır. Bu yaş grubundaki öğrenciler, günlük yaşamlarında toplu taşıma araçlarını kullanırken temassız kart sistemleri, dijital bilgilendirme

ekranları, mobil ulaşım uygulamaları ve akıllı trafik çözümleriyle doğrudan etkileşim hâlindedir. Ancak bu teknolojik deneyimlerin, farkındalık ve bilinçli tutum düzeyine dönüşmesi eğitimsel yönlendirme gerektirmektedir. Öğrencilerin AUS sistemlerini yalnızca birer teknolojik kolaylık olarak değil, sürdürülebilir kent yaşamının bir bileşeni olarak algılamaları önemlidir.

Öğrencilerin AUS'nin trafik güvenliği, enerji verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir şehircilik ilkeleriyle olan bağlantısını kavramaları, teknolojik sistemlerin toplumsal kabulü açısından belirleyicidir. Bu farkındalık, sadece bilgi edinimiyle değil, aynı zamanda olumlu tutum ve davranış geliştirilmesiyle desteklenmelidir. Eğitim yoluyla AUS'ye yönelik tutumların şekillendirilmesi, öğrencilerin hem bireysel ulaşım tercihlerinde bilinçli kararlar almalarını hem de toplumsal düzeyde sürdürülebilir ulaşım kültürünün gelişmesine katkı sunmalarını sağlar (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2020).

Bu kapsamda, ortaöğretim öğrencilerinin AUS farkındalığını artırmaya yönelik okul temelli uygulamalar önem taşımaktadır. Öğrencilerin AUS konusundaki farkındalıklarını etkileyen başlıca faktörler arasında aile, okul ortamı ve toplumsal bilinç düzeyi yer almaktadır. Ailelerin teknolojiye yaklaşımı, dijital araç kullanım alışkanlıkları ve çevre bilinci, öğrencilerin AUS teknolojilerini benimseme eğilimlerini dolaylı biçimde etkilemektedir. Bununla birlikte, okul müfredatına entegre edilen teknoloji ve çevre odaklı ders içerikleri, AUS'nin işlevsel, çevresel ve toplumsal yönlerinin daha bütüncül biçimde kavranmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, ortaöğretim öğrencilerinin AUS konusundaki bilgi, farkındalık ve tutum düzeylerinin geliştirilmesi, geleceğin sürdürülebilir ulaşım kültürünün temellerinin atılması açısından stratejik bir gerekliliktir. AUS farkındalığı yüksek bireyler yetiştirmek, yalnızca ulaşım güvenliği ve trafik verimliliği açısından değil; aynı zamanda çevresel sorumluluk, enerji tasarrufu ve toplumsal bilinç boyutlarında da uzun vadeli kazanımlar sağlayacaktır.

AUS ortaöğretim düzeyindeki gençlerin algı, tutum ve farkındalık düzeylerinin belirlenmesi AUS'nin sürdürülebilir biçimde yaygınlaştırılmasına katkı sunacak eğitimsel ve toplumsal stratejiler geliştirmeyi sağlayacaktır.

AUS Algısı, Farkındalığı, Kabulü ve Algılanan Faydası

AUS şehir içi ulaşımın güvenli, verimli ve çevre dostu biçimde yönetilmesini sağlayan teknolojik çözümler bütünüdür. AUS teknolojilerinin benimsenmesi yalnızca teknik bir süreç değil, aynı zamanda bireylerin algı, farkındalık ve tutum düzeyleriyle yakından ilişkili psikososyal bir dönüşüm sürecidir. Algı, bireylerin çevresel bilgileri işleme ve yorumlama sürecini; farkındalık ise bu süreçlerin bilinçli biçimde izlenmesini ifade eder (Posner & Petersen, 1990; Lamme, 2006). Dehaene ve Naccache'nin (2001) küresel

çalışma alanı teorisine göre farkındalık, bilişsel modüller arasında bilgi paylaşımını kolaylaştırarak karar verme süreçlerinde etkin rol oynar.

AUS eğitimi, mühendislik, şehir planlama, bilgisayar bilimleri ve insan faktörleri gibi disiplinleri bütünleştiren multidisipliner bir alandır (Tektaş & Tektaş, 2019). Türkiye'de bu eğitimin sistematik biçimde geliştirilmesi süreci hâlen tamamlanmamıştır. McTrans (2018) çalışmalarına göre, aktif ve uygulamalı öğrenme yöntemleri –laboratuvar deneyleri, saha çalışmaları, simülasyonlar ve problem temelli öğrenme– öğrencilerin AUS farkındalığını önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca Rogers (2003) ile Venkatesh ve Davis (2000), teknolojik farkındalığın sosyal etkileşim, deneyim paylaşımı ve toplumsal öğrenme süreçleriyle güçlendiğini vurgulamıştır.

Farkındalık düzeyi yüksek bireyler, AUS'nin trafik sıkışıklığını azaltma, karbon emisyonlarını düşürme ve trafik güvenliğini artırma gibi faydalarını daha iyi kavrar (Banister, 2008). Bu farkındalık, teknolojik yeniliklerin yalnızca araçsal değil, aynı zamanda sürdürülebilir toplumsal dönüşüm araçları olduğunu da gösterir. Eğitim, bu süreçte belirleyici bir rol üstlenir; özellikle ortaöğretim dönemi, genç bireylerin dijital farkındalıklarının ve bilişsel meraklarının en yoğun olduğu evredir (David et al., 2025). Dolayısıyla AUS'ye ilişkin bilinçli tutumların geliştirilmesi, eğitim müfredatlarına sistematik biçimde entegre edilmelidir.

AUS'nin toplum tarafından kabulü, "kabul (acceptance)" ve "kabul edilebilirlik (acceptability)" kavramlarıyla açıklanır. Kabul, teknolojinin uygulanmasından sonra oluşan davranışsal tepkileri; kabul edilebilirlik ise henüz uygulanmamış sistemlere yönelik beklentisel değerlendirmeleri ifade eder (Vlassenroot et al., 2010). Bu iki boyut, kullanıcıların bilgi düzeyleri, sorun algıları, teknolojik güvenleri ve ihtiyaç karşılanma beklentileriyle doğrudan ilişkilidir (Schade & Schlag, 2003). Sorun farkındalığı yüksek bireyler, AUS çözümlerini daha kolay benimser; ancak bilgi düzeyinin aşırı artışı, bazı durumlarda alternatif çözümler nedeniyle kabulü azaltabilir. Bu nedenle farkındalık stratejileri dengeli biçimde planlanmalıdır.

AUS kabulünü etkileyen diğer önemli etken algılanan fayda ve kullanışlılıktır (Davis, 1989). Bireyler bir sistemin yaşam kalitelerini, güvenliklerini veya ulaşım konforlarını artıracağına inandıklarında o sistemi benimseme eğiliminde olurlar. Lodz'da yapılan araştırmada, katılımcıların AUS'nin yol güvenliği, seyahat süresi ve konfor üzerindeki olumlu etkilerini güçlü biçimde algıladıkları görülmüştür (Podgórniak-Krzykacz & Przywojska, 2022). Buna karşın, hizmet kalitesinin kabul üzerinde sınırlı etkisi olduğu, teknolojik yenilik ve işlevselliğin daha belirleyici olduğu saptanmıştır (Van der Laan, Heino & de Waard, 1997).

Sonuç olarak, AUS ve teknolojilerine ilişkin algı, farkındalık, kabul ve algılanan fayda gibi unsurlar birbirini tamamlayan dinamiklerdir. Eğitim odaklı farkındalık çalışmaları, sosyal öğrenme ortamları, şeffaf bilgi paylaşımı ve teknolojik güvenin güçlendirilmesi, toplumun AUS teknolojilerine

adaptasyonunu hızlandıracaktır. Böylece AUS, sadece trafik yönetimi aracı olmaktan öte, sürdürülebilir şehir yaşamının temel bileşeni haline gelecektir.

Araştırmanın Analizi

Bu araştırmada, Balıkesir ili genelinde öğrenim gören ortaöğretim öğrencilerinin AUS ve bunlara ilişkin teknolojilere dair farkındalık düzeylerinin ölçülmesi amacıyla betimsel tarama modeline başvurulmuştur (Karasar, 2016). Modelin seçilme nedeni, öğrencilerin mevcut bilgi ve deneyim düzeylerini nicel veriler aracılığıyla nesnel biçimde değerlendirme imkânı sunmasıdır. Bu bağlamda, öğrencilerin AUS teknolojileri hakkındaki bilgileri, gözlemledikleri sistemler, kullanım sıklıkları ve bu konudaki bilgi edinme kaynakları analiz edilmiştir.

Betimsel tarama modeli, ayrıca eğitim kurumlarında öğrencilerin karşılaştıkları teknolojik uygulamaların kullanım alanlarına ilişkin eğilimleri ölçmek için uygun bir araştırma yöntemi sunmaktadır. Modelin temel işlevi, bu araştırma özelinde, öğrencilerin teknolojiye dair maruziyet düzeylerini ve bu maruziyetin farkındalık düzeylerine yansımasını görünür kılmaktır. Araştırma, bu model sayesinde AUS teknolojilerinin orta öğretim öğrencileri açısından algı, bilgi düzeyi ve deneyim temelli farkındalık boyutlarını sistematik biçimde ortaya koymuştur.

Araştırmanın anakütlesini, 2024–2025 eğitim-öğretim yılı içerisinde Balıkesir il merkezinde ve çevresinde bulunan çeşitli resmi ortaöğretim kurumlarında öğrenim görmekte olan toplam 541 öğrenci oluşturmaktadır. Katılımcılar, kolayda örnekleme yöntemi ile belirlenmiştir.

Bu araştırmada, veri toplama aracı olarak araştırmacılar tarafından geliştirilen anket formu kullanılmıştır. Anket formu, ilgili literatürün kapsamlı bir şekilde taranması sonucu elde edilen bilimsel bilgi birikimine dayalı olarak yapılandırılmıştır. Bu kapsamda, özellikle AUS, teknoloji farkındalığı, öğrenci gözlem ve deneyimleri gibi tematik alanlara odaklanan ulusal ve uluslararası araştırmalar incelenmiş; örnek ölçek ve anketlerden yararlanılarak araç oluşturulmuştur.

Veri toplama tekniği olarak anket uygulaması benimsenmiştir. Anket formu, dijital platformlar üzerinden çevrim içi olarak uygulanmıştır. Özellikle öğrencilerin erişiminin kolaylaştırılması amacıyla Google Forms altyapısı kullanılmış ve anket, öğrencilere e-posta, okul iletişim grupları ve sosyal medya kanalları aracılığıyla ulaştırılmıştır. Bu sayede öğrencilerin farklı zaman ve mekânlarda anketi doldurabilmelerine olanak tanınmış ve veri toplama süreci esnek hale getirilmiştir.

Araştırma süreci boyunca bilimsel araştırma etiği çerçevesinde hareket edilmiş ve tüm aşamalarda etik kurallara azami düzeyde özen gösterilmiştir. Çalışma, orta öğretim öğrenciler ile yürütüldüğü için, etik değerlendirmelere tabi tutulmuş ve gerekli yasal izinler alınarak yürütülmüştür. Veri analizi sürecinde, istatistiksel işlemlerin yürütülmesi

amacıyla açık kaynak kodlu bir yazılım olan Jamovi 2.4.8 istatistik programı kullanılmıştır.

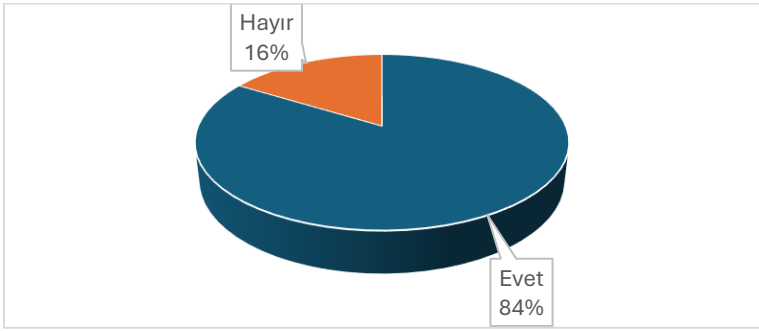
BULGULAR

Araştırmaya katılan öğrencilerin demografik özellikleri cinsiyet ve öğrenim gördükleri sınıf düzeyine göre incelenmiştir. Toplam 541 ortaöğretim öğrencisine ait bilgiler aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 1: Araştırmaya katılan öğrencilere ait bilgiler

Cinsiyet	**N**	**%**
Erkek	221	40,9
Kadın	320	59,1
Sınıf	**N**	**%**
9.sınıf	184	34
10.Sınıf	153	28,3
11.Sınıf	156	28,8
12.Sınıf	48	8,9
Yaşadığınız yer	**N**	**%**
Kırsal kesim (Köy)	36	6,7
Şehir merkezi	448	82,8
Şehir merkezine uzak	57	10,5

Araştırmaya katılan öğrencilerin cinsiyet değişkenine göre analizinde, 320 kadın öğrenci (%59,1), 221 erkek öğrenci (%40,9) olarak kadınlar daha yüksek oranda temsil edilmiştir. Sınıf düzeyine göre dağılıma bakıldığında, katılımcıların en büyük kısmını 9. sınıf öğrencileri oluşturmakta olup, bu gruptaki öğrenci sayısı 184 öğrenci (%34) olarak kaydedilmiştir. Bunu sırasıyla 11. sınıf öğrencileri 156 (%28,8) ve 10. sınıf öğrencileri 153 (%28,3) ve 12. sınıf öğrencileri ise 48 (%8,9) oranında yer almıştır. Araştırmaya katılan öğrencilerin yaşadıkları yerleşim yerlerine ilişkin dağılım incelendiğinde, büyük çoğunluğunun şehir merkezinde 448 öğrenci (%82,8) ikamet ettiği görülmektedir. Şehir merkezine uzak bölgelerde yaşayan katılımcıların oranı 57 öğrenci (%10,5) iken, kırsal kesim (köy) nüfusunu temsil eden öğrenci oranı 36 öğrenci (%6,7) olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, araştırmanın örnekleminin ağırlıklı olarak kentsel nüfus yapısına dayandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 1: Ailenin araç sahibi olma durumu

Öğrencilerin ailelerine ait araç sahipliği durumuna ilişkin veriler tabloda yer almaktadır. Verilere göre katılımcıların büyük çoğunluğu 453 öğrenci (%84)'ü ailesine ait bir araca sahip olduğunu belirtmiştir. Buna karşılık 88 öğrenci (%16)'lık bir bölümün ailesinin aracı olmadığını ifade etmiştir. Bu dağılım, öğrencilerin büyük bir kısmının özel araç erişimine sahip olduğunu ve dolayısıyla günlük ulaşım tercihlerinde bireysel araç kullanımının önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir. Bu durum, akıllı ulaşım teknolojilerinin bireysel araçlar üzerinden tanınma ve deneyimlenme şansını da artırmaktadır. Ayrıca aile aracı sahibi olan bireylerin trafik güvenliği, akıllı araç sistemleri veya çevreci ulaşım alternatiflerine dair farkındalıklarının da daha yüksek olabileceği varsayılabilir. Bu nedenle ulaşıma yönelik eğitim, uygulama ve bilinçlendirme çalışmalarında bu grubun ihtiyaç ve erişim düzeyi göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2: Ailenin sahip olduğu araç cinsi

Ailenin araç sahipliliği	N	%
Binek Otomobil	397	87,6
Kamyonet	3	0,7
Minibüs	2	0,4
Motosiklet	7	1,5
Otobüs	1	0,2
SUV (Arazi aracı)	20	4,4
Ticari Araç	22	4,9
Traktör	1	0,2

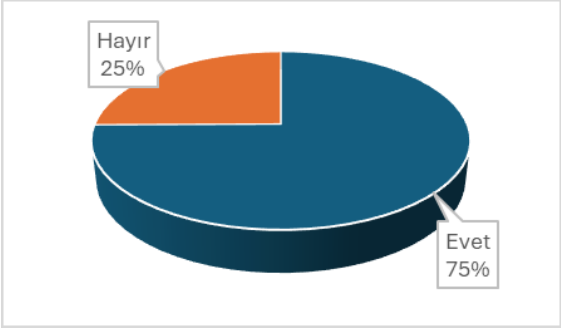
Ankete katılım sağlayan öğrencilerin ailelerine ait araç sahipliliği durumu incelendiğinde, 397 kişi (%87,6) ile binek otomobil en yaygın seçenektir. Bunu 22 kişi (%4,9) ile ticari araç ve 20 kişi (%4,4) ile SUV (arazi aracı) izlemektedir. Diğer araç türleri çok daha düşük oranlarda tercih edilmiş; örneğin 7 kişi (%1,5) motosiklet**,** 3 kişi (%0,7) kamyonet, 2 kişi (%0,4) minibüs, 1 kişi (%0,2) otobüs ve 1 kişi (%0,2) traktör sahip olduğunu belirtmiştir. Bu dağılım, katılımcıların büyük çoğunluğunun kişisel kullanım amaçlı binek otomobillere yöneldiğini, diğer araç tipi sahipliklerinin ise daha sınırlı ve özel ihtiyaçlara bağlı kaldığını göstermektedir.

Tablo 3: Aileye ait aracın yakıt türü

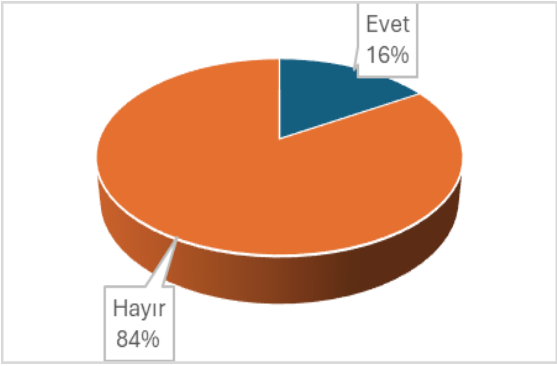
Aracın Yakıt Türü	N	%
Benzin	237	0,52
LPG	111	0,25
Dizel	94	0,21
Elektrikli	1	0,00
Hibrit	10	0,02

Ortaöğretim öğrencilerinin ailelerine ait araçların yakıt türü tercihleri değerlendirildiğinde, katılımcıların 237'si (%52,0) benzinli, 111'i (%25,0) LPG'li ve 94'ü (%21,0) dizel yakıtlı araç kullandığını bildirmiştir. Buna

karşılık, hibrit motorlu araç sahipliği 10 kişi (%2,0) ile sınırlı kalırken, elektrikli araç yalnızca 1 öğrenci (%0,0) tarafından ailede bulunduğu belirtilmiştir. Bu bulgu, söz konusu yaş grubundaki öğrencilerin ailelerinin araç yakıt tercihlerinin hâlâ büyük ölçüde geleneksel içten yanmalı motorlara dayandığını; alternatif yakıt teknolojilerinin ise henüz yaygınlık kazanmadığını akademik bir yaklaşımla ortaya koymaktadır.



Şekil 2: Öğrencinin bisiklet sahibi olma durumu



Şekil 3: Öğrencinin scooter sahibi olma durumu

Yapılan değerlendirme sonucunda, ortaöğretim öğrencilerinde bisiklet sahipliğinin oldukça yaygın olduğu görülmektedir. Katılımcıların 405 öğrenci (%75)'i bisikleti bulunduğunu belirtirken, yalnızca 136 öğrenci (%25)'i bisikleti bulunmadığını ifade etmiştir. Bu dağılım, bisikletin ulaşım ve rekreasyon tercihleri arasında önemli bir yer tuttuğunu ve mikro mobilite araçları içerisinde bisikletin, scooter gibi diğer bireysel ulaşım araçlarına kıyasla daha yüksek bir yaygınlığa sahip olduğunu göstermektedir. Ortaöğretim öğrencilerinin 88 öğrenci (%16) scooter sahibi iken 453 öğrenci (%84)'ünün scooter bulunmamaktadır. Bu bulgu, öğrencilerin bireysel ulaşım araçları arasında bulunan scooter'ların henüz sınırlı bir paya sahip olduğunu

göstermekte ve geleneksel kara taşıtları ile karşılaştırıldığında bireysel mikro mobilite araçlarının ortaöğretim öğrencileri için yaygınlaşma sürecinin henüz erken aşamada olduğunu göstermektedir.

Tablo 4: Öğrencinin internete erişim durumu

İnternet erişim	N	%
Evet	537	0,99
Hayır	4	0,01

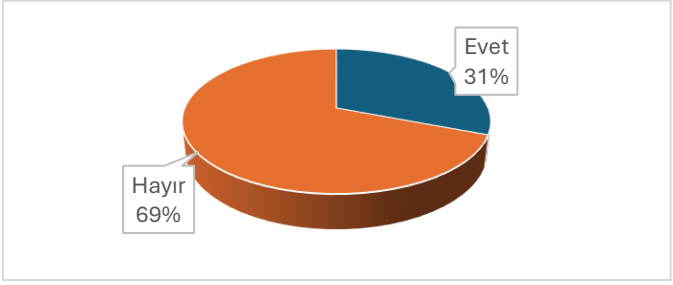
Araştırma kapsamında, ortaöğretim öğrencilerinin internet erişim durumlarına ilişkin veriler incelendiğinde, katılımcıların büyük çoğunluğunun 537 öğrenci (%99) internete erişiminin bulunduğu, yalnızca 4 öğrenci (%1)'lik kesiminin internet erişimine sahip olmadığı belirlenmiştir. Bu durum AUS'a yönelik farkındalık düzeyinin değerlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Zira AUS ile ilgili bilgi edinimi, dijital ortamlar aracılığıyla gerçekleşmekte olup, internet erişimi bu süreçte temel bir aracı konumundadır. Öğrencilerin neredeyse tamamının internet erişimine sahip olması, dijital okuryazarlık bağlamında AUS bileşenleri hakkında bilgiye ulaşmalarını kolaylaştırmakta ve bu alandaki farkındalıklarını artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, AUS farkındalığını güçlendirmeye yönelik dijital tabanlı eğitim ve bilgilendirme çalışmalarının hedef kitleye etkin biçimde ulaşabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 5: Öğrencinin okula ulaşım durumu

Okula ulaşım durumu	N	%
Yürüyerek	83	0,15
Kendi aracımız ile	48	0,09
Motosiklet	16	0,03
Toplu taşıma (Otobüs, Dolmuş, Minibüs vs.)	110	0,20
Servis	279	0,52
Diğer	5	0,01

Araştırma bulgularına göre, ortaöğretim öğrencilerinin büyük bir kısmı 279 öğrenci (%52) okula ulaşımını servis araçları ile sağlamaktadır. Bu sonuç, Balıkesir kentinde öğrenci taşımacılığına yönelik sistematik bir servis hizmetinin yaygın olarak kullanıldığını göstermektedir. Toplu taşıma araçlarının kullanımı da kayda değer düzeydedir 110 öğrenci (%20), bu da öğrencilerin belirli bir kesiminin kentsel ulaşım altyapısından doğrudan

faydalandığını ortaya koymakta ve 83 öğrenci (%15)'i yürüyerek okula ulaşmaktadır. Bu oran, öğrencilerin ikamet ettikleri yerlerin okullara yürüme mesafesinde olabildiğini ve mikro ölçekli yaya ulaşımının hâlen önemini koruduğunu göstermektedir. Kendi araçlarıyla ulaşılan öğrencilerin oranı ise 48 öğrenci (%9) ile sınırlı olup, özel araç kullanımının ortaöğretim düzeyinde baskın bir seçenek olmadığını ortaya koymaktadır. Motosiklet kullanımı 16 öğrenci (%3) ve diğer ulaşım yolları 5 öğrenci (%1) ise oldukça sınırlı düzeydedir. Bu, yaş grubunun yasal ehliyet sınırları ve ailelerin güvenlik kaygılarıyla da ilişkilendirilebilir. Bu veriler, akıllı ulaşım sistemlerinin (AUS) tasarımında ve uygulanmasında öğrenci profiline özel ihtiyaçların dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle servis ve toplu taşıma araçlarının kullanım oranlarının yüksek olması, AUS uygulamalarının servis güzergâh takibi, araç içi güvenlik sistemleri, toplu taşıma entegrasyonu ve mobil bilgilendirme uygulamaları gibi alanlarda yaygınlaştırılmasının önemini vurgulamaktadır. Buna ek olarak, yaya ulaşımı ile okula giden öğrenciler için AUS kapsamında akıllı yaya geçitleri, trafik ışığı optimizasyonu ve güvenli yürüme rotalarının haritalandırılması gibi sistemler farkındalık düzeyini artırabilir ve öğrencilerin güvenliğini artıran teknoloji çözümleri olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4: AUS ve Teknolojileri ifadesinden haberdar olma

Araştırma sonuçları, Balıkesir'deki ortaöğretim öğrencilerinin büyük bir çoğunluğunun 374 öğrenci (%69,1) "Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri" kavramından haberdar olmadığını ortaya koymaktadır. Sadece 167 öğrenci (%30,9)'luk bir kesimin bu terimi daha önce duymuş veya bu alanda bilgi sahibi olduğunu belirtmesi, AUS konusundaki farkındalık düzeyinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, AUS'un bireylerin günlük yaşamına etkileri ve toplumsal faydaları göz önünde bulundurulduğunda önemli bir boşluğa işaret etmektedir. Zira AUS, ulaşımın sürdürülebilir, güvenli, verimli ve çevreci biçimde yönetilmesini sağlayan bütüncül teknolojik çözümleri kapsamaktadır. Bu sistemler yalnızca erişkin kullanıcıları değil, öğrenciler gibi genç kullanıcı gruplarını da doğrudan etkileyen uygulamaları içermektedir (örneğin; akıllı servis takip sistemleri,

trafik ışık optimizasyonları, toplu taşıma uygulamaları, yaya geçidi sensörleri, vs.).

Tablo 6: AUS ve teknolojilerini anlatan ifade

AUS ifade	N
Elektrikli Araçlar	381
Akıllı Araçlar	267
Akıllı Duraklar	192
Otonom Araçlar	174
Toplu Ulaşım Uygulamaları	168
Akıllı Sensörler	161
Akıllı Yollar	150
Navigasyon	150
TOGG	125
e Scooter	120
e-Bisiklet	107
Mobil Uygulamalar	101
Akıllı Otoparklar	76
Drone Teknolojileri	74
Akıllı Kavşaklar	52
Ücret Toplama Sistemleri	50
Araç Paylaşımı	45
Yeşil Dalga	39
EDS	33
Paylaşımlı Hareketlilik	26
Şerit İkaz Sistem	23
Bisiklet Paylaşımı	22
Akıllı Lojistik	17
ACC	3
V2X	3

Öğrencilerin AUS kavramını ağırlıklı olarak araç temelli ve fiziksel teknoloji odaklı unsurlar üzerinden algıladıklarını göstermektedir. Özellikle elektrikli araçlar, akıllı ve otonom araçlar gibi konuların öğrenciler arasında yüksek farkındalık düzeyine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, medya ve teknoloji gündeminde sıkça yer bulan araç teknolojilerinin, öğrenci algısında AUS'un temel temsilcileri haline geldiğine işaret etmektedir. Öte yandan, akıllı duraklar ve toplu ulaşım uygulamaları gibi kentsel ulaşım altyapısını ilgilendiren unsurlar da öne çıkmaktadır. Bu bulgu, öğrencilerin

sadece bireysel araçları değil, aynı zamanda kamuya açık ulaşım sistemlerini de AUS kapsamında değerlendirebildiklerini göstermesi açısından önemlidir.

Bu sonuçlar, AUS farkındalığını artırmaya yönelik eğitim materyallerinin içerik yapısının, sadece araç teknolojilerine değil; veri odaklı trafik yönetimi, paylaşım ekonomisi modelleri, çevresel sürdürülebilirlik ve akıllı altyapı sistemlerine de odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Sistem bileşenlerinin görünürlüğü, öğrencilerin AUS kapsamını daha bütüncül biçimde kavrayabilmesi için desteklenmelidir.

Öğrencilere yaşadıkları il olan Balıkesir'de AUS teknolojilerini işaretlenmeleri istenen soruya ait cevaplar aşağıdadır.

Tablo 7: Balıkesir'de bulunan AUS teknolojileri

AUS teknolojileri	N
Toplu ulaşım ödeme sistemi (Balkart)	514
Mobese kameraları	297
e-Scooter	263
Elektrikli araç şarj istasyonu	258
Hız tespit sistemi	226
Akıllı durak (akıllı led bilgilendirme paneli)	189
BALTUS ("Otobüsüm Nerede?")	188
Yeşil dalga	160
EDS	136
Akıllı Otopark	100
e-Bisiklet	89
Akıllı kavşak	72

Balıkesir'de çeşitli düzeylerde AUS teknolojilerinin uygulandığını ve öğrenciler tarafından bu teknolojilere dair belirli bir farkındalık düzeyinin oluştuğunu göstermektedir. En yaygın olarak bilinen ve kullanılan sistem, açık ara farkla Balkart adlı toplu taşıma ödeme sistemidir. Bu durum, öğrencilerin günlük yaşamlarında sıklıkla kullandıkları toplu ulaşım sistemlerine entegre edilmiş dijital çözümlerin farkındalık düzeyini doğrudan artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, Mobese kameraları, hız tespit sistemleri, EDS ve yeşil dalga uygulamaları gibi trafik güvenliği ve akışını izlemeye yönelik sistemlerin de öğrenciler tarafından tanındığı anlaşılmaktadır. Bu, güvenlik temelli AUS bileşenlerinin kamuoyunda daha görünür olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, e-Scooter, e-Bisiklet, akıllı duraklar ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi mikro mobilite ve sürdürülebilir ulaşımı

destekleyen teknolojilere dair farkındalık düzeyinin de oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle bu teknolojilerin kent merkezlerinde görünür olması, öğrenci farkındalığını artırıcı bir etki yaratmış olabilir. BALTUS uygulaması gibi kent içi otobüslerin anlık konumlarını takip etmeye yarayan mobil çözümler de öğrenciler arasında bilinen teknolojiler arasında yer almakta, bu da mobil platformlara dayalı akıllı ulaşım teknolojilerinin erişilebilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Balıkesir'de halihazırda uygulanmakta olan AUS teknolojilerinin çeşitliliği ve öğrencilerdeki farkındalık düzeyi, şehirdeki ulaşım teknolojilerinin dijitalleşme sürecinde önemli bir ilerleme kaydedildiğini göstermektedir. Ancak, akıllı kavşaklar, akıllı otoparklar ve paylaşımlı mobilite çözümleri gibi sistemlerin farkındalık düzeyi görece düşüktür. Bu alanlarda bilgilendirici kampanyalar, okul bazlı tanıtımlar ve uygulamalı dijital trafik eğitimleri ile farkındalık düzeyinin artırılması mümkündür. Öğrencilerin aktif kullanıcı konumuna geçebileceği mobil uygulamalar ve sürdürülebilir mikro ulaşım sistemlerinin (örneğin: e-scooter kiralama, toplu taşıma entegrasyonlu bisiklet paylaşımı) yaygınlaştırılması, AUS farkındalığını davranışa dönüştürmede etkili olacaktır.

Tablo 8: AUS ile ilgili haber, bilgi, doküman, video gibi bilgileri edinilen ortam

AUS ve teknolojileriyle ilgili haber, bilgi, doküman, video gibi bilgileri edinme durumu	N
Sosyal Medya Platformlarından (Twitter, Facebook, instagram, Youtube, Tiktok vb.)	403
Haber Kanallarından	189
Günlük kullanımdaki karşılaştığım uygulamalardan	142
Okuldaki etkinliklerden, derslerden veya hocalarımızdan	132
Ailemden, yakın çevremden	123
Bilimsel ortamlardan	82
Dizi ve sinema filmlerinden	67
Teknofest ve benzeri etkinliklerden	64
Gazeteler, dergiler ve süreli yayınlardan	49
Belgesel filmlerinden	42
Proje yarışmalarından	40

Öğrencilerin AUS'a yönelik bilgi edinmede en çok başvurduğu kaynağın sosyal medya platformları olduğunu açıkça ortaya koymakta ve diğer bilgi edinme kanalları ile ilgili durumlar aşağıdaki başlıklar altında maddeler halinde oluşturulmuştur.

- Sosyal Medyanın Baskın Etkisi: Sosyal medya platformları, öğrencilerin AUS ile ilgili bilgi ediniminde en baskın kaynak olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, dijital çağda bilginin tüketim biçiminin değiştiğini, geleneksel medyanın yerini sosyal medya dinamiklerinin aldığını göstermektedir. Ayrıca, AUS gibi teknolojik ve güncel konuların sosyal medya üzerinden daha erişilebilir ve dikkat çekici biçimde sunulması, öğrencilerin farkındalığını bu platformlar aracılığıyla artırdığını düşündürmektedir.
- Geleneksel ve Resmi Kanalların Geride Kalması: Haber kanalları, gazeteler, belgeseller gibi geleneksel medya araçları, bilgi ediniminde sosyal medyanın oldukça gerisinde kalmıştır. Bu durum, öğrencilerin güncel teknolojik gelişmeleri daha çok kısa, görsel, etkileşimli içeriklerden öğrenmeyi tercih ettiğini göstermektedir. Geleneksel kaynaklar bilgi açısından daha derinlikli olabilir; ancak öğrencilerin bu kaynaklara ulaşım veya ilgi düzeylerinin düşük olduğu anlaşılmaktadır.
- Eğitim Kurumlarının Sınırlı Rolü: Okul temelli kaynaklardan (dersler, hocalar, etkinlikler) bilgi edinme oranı ile orta düzeydedir. AUS konusunun eğitim müfredatlarında yeterince yer bulmadığını ya da öğrencilere cazip biçimde sunulamadığını göstermektedir. Eğitim kurumlarının AUS gibi teknolojik dönüşüm alanlarını ders içeriklerine daha sistemli entegre etmesi, öğrencilerin bilimsel farkındalığını artıracaktır.
- Deneyimsel Öğrenmenin Etkisi: Günlük hayattaki uygulamalar ve Teknofest gibi etkinlikler, öğrencilerin bilgi edinmesinde önemli yer tutmaktadır. Bu durum, öğrencilerin soyut bilgiye kıyasla deneyimleyerek öğrendikleri bilgilere daha çok önem verdiklerini ortaya koymaktadır. AUS ile doğrudan karşılaşılan akıllı trafik ışıkları, toplu taşıma sistemleri gibi örnekler; teknolojinin görünürlüğünü artırmakta ve kavramsal farkındalığı desteklemektedir.
- Bilimsel ve Akademik Ortamların Payı: Bilimsel ortamlar ve proje yarışmaları gibi bilgi kaynaklarının düşük frekansı, öğrencilerin AUS'a yönelik akademik merak düzeyinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu oranlar, araştırma-geliştirme, akademik üretim ve yenilikçilik ekosistemine katılımın artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

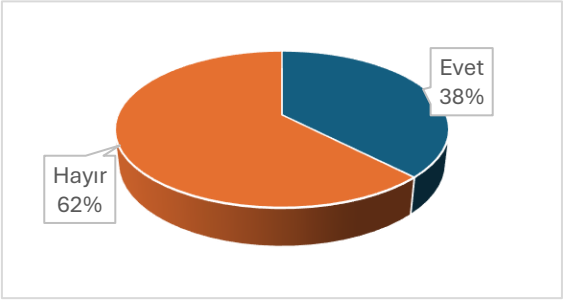
Öğrencilerin AUS ve teknolojileri bu teknolojilerin kullanıldığı ulaşım türlerine ilişkin algı ve bilgi düzeylerini değerlendiren soruya yönelik verilen cevaplar tablo 10 'da yer almaktadır.

Tablo 9: AUS ve teknolojileri kullanıldığı ulaşım türleri

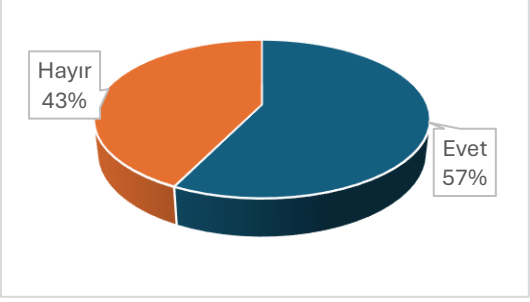
Ulaşım türleri	N
Karayolu Ulaşımı	196
Denizyolu Ulaşımı	7
Havayolu Ulaşımı	13
Demiryolu Ulaşımı	4
Hepsi	321

Öğrencilerin büyük çoğunluğu AUS teknolojilerinin tüm ulaşım türlerinde kullanılabildiği yönünde bir farkındalık geliştirmiştir. 321 öğrenci (%58,7) "Hepsi" yanıtı verilmiştir. Bu bulgu, AUS kavramının yalnızca karayolu temelli değil, çok modlu ulaşım sistemleriyle entegre çalışabilen bir yapı olarak kavrandığını göstermesi açısından oldukça değerlidir. Karayolu ulaşımı 196 öğrenci (%35,8) ile en çok ifade edilen tekil kategori olmuş, bu da AUS teknolojilerinin en görünür ve yaygın biçimde karayolunda kullanıldığını düşündüren bir algının hâkim olduğunu göstermektedir. Havayolu 13 öğrenci (%2,4), denizyolu 7 öğrenci (%1,3) ve demiryolu 4 öğrenci (%0,7) gibi diğer ulaşım modlarının AUS ile ilişkisi öğrenciler tarafından oldukça sınırlı biçimde ifade edilmiştir. Bu durum, AUS'un hava trafik yönetim sistemleri, denizcilik güvenlik sistemleri ve raylı sistem entegrasyonları gibi daha teknik ve üst düzey kullanım alanlarının öğrenci algısında yeterince yer bulmadığını göstermektedir. Öğrencilerin karayoluna odaklı AUS algısı, görsel deneyimlerin ve şehir içi uygulamaların bu mod üzerinde yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu doğal eğilim, eğitim içerikleriyle çeşitlendirilmelidir.

Multimodal AUS senaryoları, örneğin bir havalimanındaki otomatik yolcu yönlendirme sistemleri, demiryollarındaki akıllı sinyalizasyon, limanlardaki yük optimizasyon sistemleri gibi uygulamalar ders içeriklerine entegre edilerek öğrencilerin farkındalığı genişletilmelidir. Özellikle STEM eğitiminde AUS'un farklı ulaşım türlerine entegrasyonunu anlatan projeler, öğrencilerin bu teknolojileri çok yönlü değerlendirebilmesini sağlayacaktır.



Şekil 5: Okulunuzda ulaşım, trafik vb. konulu bir etkinlik (Konferans, Sergi-Fuar) yapıldı mı?



Şekil 6: AUS ve ilgili teknolojiler kapsamında etkinliklere katılım gösterme

Öğrencilerin öğrenim gördükleri okullarda, AUS farkındalığını artırmaya yönelik olarak ulaşım, trafik ve benzeri konuları içeren herhangi bir etkinlik (konferans, sergi, fuar vb.) düzenlenip düzenlenmediği ile ilgili soruya verilen cevap aşağıda yer almaktadır. Öğrencilerin önemli bir çoğunluğunun (%62,3) eğitim gördükleri kurumlarda ulaşım, trafik veya akıllı ulaşım sistemleri konularında herhangi bir etkinliğe (konferans, fuar, sergi vb.) katılmadığını beyan ettiğini göstermektedir. Bu durum, okullarda AUS temalı farkındalık artırıcı etkinliklerin yetersizliğine işaret etmektedir.

Etkinlik düzenlenen okullarda ise, öğrencilerin bu tür faaliyetlere erişimi sayesinde AUS ve trafik güvenliği gibi konularla daha fazla karşılaştıkları, dolayısıyla bilgi düzeylerinin ve farkındalıklarının artabileceği öngörülebilir.

- Millî Eğitim Bakanlığı ve yerel yönetimlerle iş birliği içinde, AUS ve trafik bilinci temalı gezici fuarlar, seminer dizileri, deneyim atölyeleri

ve yarışmalar düzenlenmeli, özellikle bu etkinlikler kırsal kesimdeki okulları da kapsamalıdır.

- Okul temelli müfredat dışı etkinliklerin planlanmasında, akıllı şehircilik, sürdürülebilir ulaşım, mikromobilite, güvenli yol kullanımı gibi konular öncelikli alanlar olarak değerlendirilmelidir.
- Bu tür etkinliklerde öğrencilerin sadece izleyici değil, aynı zamanda proje geliştirici ve uygulayıcı roller üstlenebileceği uygulamalı ortamlar (örn. trafik simülasyonları, mobil uygulama tanıtımı, mini tasarım yarışmaları) oluşturulmalıdır.
- AUS teknolojilerinin yerel uygulamaları (örneğin: Balkart sistemi, BALTUS, e-scooter alanları) üzerine yerel belediyelerle ortak seminerler organize edilerek, teorik bilgi ile yaşamsal deneyim arasında bağ kurulmalıdır.

AUS ve ilgili teknolojiler kapsamında fuar, konferans, teknik gezi gibi etkinliklerin düzenlenmesi halinde, öğrencilerin bu tür etkinliklere katılım gösterme eğilimleri araştırılmıştır. Bu bulgular, öğrencilerin çoğunluğunun 310 öğrenci (%57,3) AUS temalı fuar, konferans, teknik gezi gibi etkinliklere katılım göstermeye istekli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, gençlerin akıllı şehircilik ve teknolojik ulaşım sistemlerine yönelik bilgi edinmeye açık olduklarını ve bu konulara dair etkileşimli ve uygulamalı öğrenme ortamlarına ilgi duyduklarını göstermektedir. Öte yandan 231 öğrenci (%42,7) oranındaki "Hayır" yanıtı, dikkate alınması gereken bir farkındalık ve ilgi eksikliğine de işaret etmektedir. Bu oranın yüksek olması, öğrencilerin; AUS kavramına yeterince aşina olmaması, etkinliklerin ilgilerini çekecek düzeyde tanıtılmaması, konuya ilişkin bir bağlam geliştirememesi gibi nedenlerle açıklanabilir. Katılım isteği göstermeyen öğrenciler için ise öncelikle AUS'un gündelik yaşamla ilişkisini kuran, ilgi çekici kısa eğitim videoları, oyunlaştırılmış uygulamalar ve mobil öğrenme içerikleri geliştirilerek konuya dair ilk farkındalık yaratılmalıdır. Okullarda kulüp faaliyetleri, TÜBİTAK temalı projeler, trafik güvenliği haftası kapsamında AUS temalı uygulamalar ile öğrencilerin ilgisi somutlaştırılmalıdır.

AUS ve teknolojileri, farklı ulaşım araçlarında çeşitli şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Öğrencilerin bu sistemleri gözlemlediği başlıca ulaşım araçları şunlardır:

Tablo10: AUS ve teknolojilerini gördükleri ulaşım araçları

AUS ve teknolojilerini gördükleri ulaşım araçları	N
Okul Servisinde	104
Aile aracımızda	58
Şehirlerarası Otobüsler	202
Dolmuş – Taksi	207
Toplu Ulaşım Taşıtları	317
Yakın çevremin kullandığı araçlar	140

Öğrencilerin AUS teknolojilerini en çok gözlemledikleri araçlar başta olmak üzere şu şekilde sıralanmaktadır: Toplu ulaşım taşıtları, öğrenciler AUS teknolojilerini ağırlıklı olarak otobüsler, minibüsler ve belediyeye bağlı taşıma sistemlerinde gözlemlemektedir. Bu, toplu taşıma sistemlerinin dijitalleşmeye daha açık olması ve öğrenci kitlesinin sıklıkla bu ulaşım araçlarını kullanmasıyla ilişkilidir. Dolmuş – Taksi ve şehirlerarası otobüsler, bu araçlar genellikle yolcu bilgilendirme ekranları, mobil ödeme sistemleri, araç içi güvenlik kameraları, hız takip cihazları gibi AUS unsurlarıyla donatılmış olabilir. Yakın çevrenin kullandığı araçlar, bu grup, öğrencilerin aile dışı gözlemlerini de içerdiği için, daha geniş bir AUS farkındalık alanı oluştuğunu göstermektedir. Okul servisleri ve aile araçları, bu gruplarda gözlem düzeyinin düşük olması, özel araçlarda AUS entegrasyonunun sınırlı kalmasına veya öğrencilerin bu sistemleri tanımlayabilme yetisinin düşük olmasına işaret edebilir.

Toplu taşıma sistemleri, öğrenciler için AUS teknolojilerinin en görünür hale geldiği alanlardır. Bu araçlarda bulunan sistemlerin işlevleri hakkında öğrencilere açıklayıcı bilgiler sunulması, farkındalık düzeyini nitelikli hale getirecektir. Okul servisleri ve özel araçlar, akıllı teknolojiler açısından daha düşük gözlemlenmiş olsa da bu durum fırsata çevrilebilir. Örneğin, servis araçlarına konum takibi, öğrenci iniş-biniş güvenlik sistemleri, ebeveyn bildirim uygulamaları gibi teknolojilerin entegre edilmesi, öğrenci farkındalığını artıracaktır. AUS teknolojilerinin eğitim programları kapsamında, öğrencilerin gözlemledikleri sistemleri tanımlayabilmeleri için örnek vaka incelemeleri ve araç içi gözlem formları kullanılabilir.

Öğrencilerin AUS teknolojilerini en çok görsel olarak temas ettikleri araçlar üzerinden tanımlayabildikleri; bu bağlamda kamusal ve yarı kamusal taşıma sistemlerinin bu teknolojilerin tanıtımında kritik bir rol üstlendiği anlaşılmaktadır. AUS teknolojilerinin etkili tanıtımı için fiziksel temas noktalarının ve dijital uygulamaların açıklayıcı şekilde sunulması, bilinçli kullanıcı profili geliştirilmesi açısından önemlidir.

Okula ulaşımda servis kullanan öğrencilerin servis aracında bulunan AUS ve teknolojilerinden farkındalıkları için sorulan soruya aşağıdaki gibi cevap vermişlerdir.

Tablo 11: Okula ulaşımda servis kullanan öğrencilerin servis aracında bulunan AUS ve teknoloji ekipmanları

Okul servis aracında bulunan AUS ve teknoloji ekipmanları	N
Navigasyon	290
Arka görüş kamerası	192
Akıllı Sensörler	137
Akıllı Farlar	114
Hız sabitleme (Cruise Control)	88
Şerit Takip Sistemi	63
Otomatik Park Asistanı	59

Araştırma kapsamında servis aracı kullanan ortaöğretim öğrencilerinin, bu araçlarda hangi AUS gözlemlediklerine ilişkin elde edilen veriler, AUS bileşenlerinin okul servislerinde belirli oranlarda yer aldığını ortaya koymaktadır. Öğrencilerin en fazla gözlemlediği teknolojilerin başında navigasyon sistemleri 290 öğrenci gelmektedir. Navigasyon, güzergâh optimizasyonu ve sürücünün rota takibi açısından önemli bir teknolojidir ve bu sistemin yüksek oranla belirtilmiş olması, servis araçlarında dijital yön bulma araçlarının yaygın kullanıldığını göstermektedir. Bunu takip eden arka görüş kamerası 192 öğrenci, servislerde manevra ve geri sürüş güvenliğini artırmak amacıyla sıklıkla tercih edilen bir başka teknolojidir. Öğrenciler tarafından bu sistemin yüksek farkındalıkla belirtilmiş olması, özellikle araçlara biniş ve iniş süreçlerinde güvenlik unsurlarının gözlemlene bilirliğini vurgulamaktadır. Akıllı sensörler 137 öğrenci ve akıllı farlar 114 öğrenci gibi daha teknik bileşenlerin de önemli ölçüde fark edilmesi, öğrencilerin teknolojiye yönelik gözlem yetilerinin gelişmekte olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, daha ileri sürüş destek sistemleri olan hız sabitleme (Cruise Control) 88 öğrenci, şerit takip sistemi 63 öğrenci ve otomatik park asistanı 59 öğrenci teknolojileri ise daha düşük oranlarda raporlanmıştır. Bu bulgu, söz konusu teknolojilerin servis araçlarında ya daha sınırlı yer bulduğunu ya da öğrencilerin bu sistemlerin varlığını tanıma konusunda yeterli bilgiye sahip olmadığını ortaya koymaktadır.Servis araçlarında bulunan AUS bileşenlerine ilişkin öğrenci farkındalığı, genellikle görsel ve işlevsel olarak doğrudan gözlemlenebilir sistemler üzerinden şekillenmektedir. Öğrencilerin farkındalığını artırmak için, servis kullanımı esnasında teknolojik donanım hakkında bilgilendirme yapılması, bu sistemlerin görevleri ve güvenlik katkılarının açıklanması önerilmektedir. Ayrıca, okul-temelli bilinçlendirme çalışmaları ile AUS teknolojilerinin işleyiş prensipleri, öğrencilerin bilgi düzeylerini daha üst seviyeye taşıyacak biçimde sunulmalıdır.

Sonuç olarak, veriler Balıkesir'deki okul servislerinde belirli AUS teknolojilerinin yer aldığını ve öğrenciler tarafından algılandığını, ancak bu teknolojilere dair farkındalık seviyesinin görsel temas ve kullanım sıklığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, AUS'un sadece bir ulaşım güvenliği bileşeni değil, aynı zamanda öğrenciye yönelik teknoloji eğitiminin bir parçası olarak ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Öğrencilerin aile ve yakın çevrelerindeki araçlarda gözlemledikleri AUS ve teknolojilerine ilişkin farkındalıklarına dair verdikleri cevaplar şu şekildedir:

Tablo12: Öğrencilerin aile ve yakın çevrelerindeki araçlarda gözlemledikleri AUS ve teknolojileri

Aile ve yakın çevredeki araçlarda AUS ve teknolojileri	N
Navigasyon	344
Arka görüş kamerası	247
Akıllı Sensörler	199
Akıllı Farlar	182
Hız sabitleme (Cruise Control)	175
Şerit Takip Sistemi	131
Otomatik Park Asistanı	112

Aile ve yakın çevrelerinde bulunan araçlarda yer alan AUS ve teknolojileri kullanımına ilişkin veriler, bireysel araçlarda teknoloji yoğunluğunun ve çeşitliliğinin yüksek düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. En fazla ifade edilen sistem navigasyon teknolojileri 344 öğrenci olmuştur. Navigasyon sistemlerinin yoğun biçimde kullanılması hem sürüş kolaylığı sağlaması hem de sürücülerin dijital yön bulma alışkanlıklarının yaygınlaşmış olmasının bir göstergesidir. Bu, aynı zamanda öğrencilerin teknolojiye olan görsel maruziyetlerinin en yüksek olduğu bileşenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bunu takip eden arka görüş kamerası 247 öğrenci ve akıllı sensörler 199 öğrenci, araç güvenliği açısından son yıllarda yaygın şekilde kullanılan ve yeni model araçların standart donanımları arasına giren sistemlerdir. Öğrencilerin bu teknolojileri fark edebilmesi, bu sistemlerin hem işlevsellik hem de görünürlük bakımından algılanabilir özellik taşıdığını göstermektedir. Akıllı farlar 182 öğrenci ve hız sabitleme sistemleri (Cruise Control) 175 öğrenci gibi sürüş konforuna katkı sunan teknolojilerin de öğrenciler tarafından yüksek oranda gözlemlenmiş olması, AUS teknolojilerinin hem konfor hem güvenlik açısından etkin biçimde kullanıldığını desteklemektedir. Daha teknik ve otonomiye yakın işlevler üstlenen şerit takip sistemi 131 öğrenci ve otomatik park asistanı 112 öğrenci da kayda değer bir farkındalık düzeyi ile belirtilmiştir. Bu teknolojilerin

öğrenciler tarafından bilinmesi ve tanımlanabilmesi, dijital sürüş destek sistemlerine olan maruziyetin artmakta olduğuna işaret etmektedir.

Aile ve yakın çevrede bulunan araçlarda yer alan akıllı ulaşım sistemlerinin öğrenciler tarafından görsel olarak gözlemlenebilirlik düzeyine ve kullanım sıklığına bağlı olarak algılandığı söylenebilir. Teknolojik donanımın bu düzeyde fark edilmesi, yalnızca araçların modeliyle değil, aynı zamanda öğrencilerin teknoloji okuryazarlığı, dijital çevre farkındalığı ve gözlem kabiliyetleriyle de doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, bu sonuçlar öğrencilerin AUS sistemlerine karşı doğrudan ya da dolaylı deneyim kazandıklarını, bu deneyimlerin farkındalık düzeyini şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu farkındalığın çoğunlukla araç içinde "gözlenen" sistemlere odaklı olduğu, sistemlerin işlevsel anlam ve kapsamlarına dair yeterli bilgi düzeyinin geliştirilebilmesi için eğitimsel müdahalelere ihtiyaç duyulduğu da açıktır.

Sonuç olarak, öğrencilerin bireysel taşıma araçlarında gözlemlediği AUS teknolojileri oldukça çeşitlidir ve bu gözlemler, yeni nesil sürüş teknolojilerinin öğrenci farkındalığında somut bir yer edinmeye başladığını göstermektedir. Bu durum, gelecekte AUS kullanıcılarının bilinçli ve teknolojiye duyarlı bireyler olarak yetişmesine katkı sağlayacak önemli bir gelişimsel fırsat sunmaktadır.

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Balıkesir'de 541 ortaöğretim öğrencisiyle yürütülen araştırma, gençlerin Akıllı Ulaşım Sistemleri'ne (AUS) ilişkin kavramsal farkındalıklarının düşük, ancak bileşenlere maruziyetlerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Öğrencilerin yalnızca %30,9'u "AUS" terimini daha önce duymuştur; buna karşın navigasyon, arka görüş kamerası ve şerit takip sistemi gibi bileşenlere sıklıkla rastlamakta, fakat bu teknolojileri bütüncül bir sistemin parçası olarak anlamlandırmakta zorlanmaktadır. Bu bulgu, gözlemsel/prosedürel deneyimin (teknolojiyi görme/kullanma) kavramsal bilgiye dönüşmediğini; diğer bir ifadeyle metabilişsel yapılandırma eksikliğini işaret etmektedir.

Öğrencilerin AUS etkinliklerine katılımı düşük (%37,7), katılım isteği ise yüksek (%57,3) bulunmuştur; bu durum öğrenme motivasyonunun varlığına karşın fırsat eksikliğine işaret etmektedir. Ayrıca öğrencilerin önemli bir bölümü AUS'u karayoluyla sınırlı algılamakta; demir/deniz/havayolu ve V2X gibi taşımalar arası uygulamalara ilişkin farkındalık zayıftır. Genel olarak, bulgular Türkiye'de AUS'un formel eğitim içinde yeterince temsil edilmediğini ve deneyimsel öğrenmenin pedagojik çerçeveye bağlanması gereğini göstermektedir.

Öneriler;

1) Müfredat ve Pedagoji
   - Disiplinlerarası entegrasyon: AUS temaları Coğrafya, Fen, Bilişim ve Trafik Güvenliği derslerine vaka-temelli ve problem-temelli senaryolarla (ör. yeşil dalga, dinamik ücretlendirme, elektrikli otobüs hat tasarımı) eklenmelidir.
   - Seçmeli ders/ünite: "Akıllı Kentler ve Ulaşım Teknolojileri" başlığıyla STEM odaklı seçmeli ders/üniteler geliştirilmelidir.
   - Proje tabanlı öğrenme: TÜBİTAK/Teknofest benzeri platformlara uyumlu AUS proje çalışmaları anlatılmalı; öğrenciler "kullanıcı"nın ötesinde tasarımcı/çözüm geliştirici rolüne taşınmalıdır.
2) Deneyimsel ve Dijital Öğrenme
   - Simülasyon–VR/AR–oyunlaştırma: Trafik kontrol, akıllı kavşak, sensör ağları ve yolcu bilgi sistemlerini modelleyen etkileşimli/oyunlaştırılmış modüller kurumsallaştırılmalıdır.
   - AUS gözlem günlüğü: Öğrencilerin günlük hayattaki AUS karşılaşmalarını dijital portfolyo şeklinde kaydeden bir "gözlem günlüğü" uygulaması ile öğrenmeleri desteklenmelidir.
   - Dijital vatandaşlık: Sosyal medyada AUS içeriklerinin eleştirel doğrulaması ve kaynak güvenirliği eğitimi verilmelidir.
3) Okul–Yerel Yönetim–Sektör İş birliği
   - Teknik geziler ve uygulama alanları: Belediyelerin trafik yönetim merkezleri, akıllı kavşaklar, kartlı toplu taşıma sistemlerine yerinde ziyaretler.
   - Mentorluk ve ağlar: Üniversite kulüpleri/akademisyenlerle mentorluk programları; yerel AUS girişimleriyle pilot projeler.
4) Mikro Mobilite ve Sürdürülebilirlik
   - Güvenlik ve altyapı: Bisiklet–scooter güvenliği, akıllı bisiklet yolu altyapıları, şarj ve park çözümleri AUS perspektifiyle öğretilmelidir.
   - Karbon okuryazarlığı: Öğrenciler, bireysel ulaşımlarına ilişkin karbon ayak izi hesaplayarak AUS'nin çevresel katkısını nicel olarak kavramalıdır.
5) Ölçme–Değerlendirme ve İzleme
   - Yerel ölçek geliştirme: Yaşa uygun, AUS farkındalık ölçekleri geliştirilmeli ve düzenli uygulanmalıdır.

- Dijital portfolyolar ve öğrenci raporları: Süreç temelli değerlendirme için portfolyo izleme ve kısa analitik raporlar kullanılmalıdır.

6) Aile ve Toplum Katılımı

- Veli atölyeleri: Toplu taşıma uygulamaları, güvenlik teknolojileri ve veri gizliliği gibi temalarda aile eğitimleri.
- Topluluk projeleri: Mahalle ölçeğinde ve okul çevresinde tanıtma faaliyetleri yapılmalı (akıllı yaya geçidi, hız uyarı sistemleri).

REFERANSLAR

Anadolu Ajansı. (2025, 5 Eylül). ULAK Haberleşme tarafından geliştirilen teknolojiler Türkiye'nin akıllı ulaşım sistemleri alanındaki rekabet gücünü artırıyor. Anadolu Ajansı.

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. Transport Policy, 15(2), 73–80.

David, A., Yigitcanlar, T., Desouza, K., Mossberger, K., Cheong, P. H., Corchado, J., & Paz, A. (2025). Public perceptions of responsible AI in local government: A multi-country study using the theory of planned behaviour. Government Information Quarterly, 42(3), 102054.

Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS Quarterly, 13(3), 319–340.

Dehaene, S., & Naccache, L. (2001). Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework. Cognition, 79(1–2), 1–37.

European Commission. (2023). Smart mobility and intelligent transport systems report. Retrieved from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/smart-mobility/road/its-directive-and-action-plan_en

Fraunhofer Institute for Industrial Engineering (IAO). (2024). ITEM progress report 2024. Erişim adresi: https://websites.fraunhofer.de/item/progress-report-2024-en/

FutureX Institute. (2025). Key success factors for intelligent transportation systems: Enhancing digital literacy, user-friendliness, and public engagement. FutureX Institute Reports.

Grand View Research. (2024). Intelligent transportation systems market size, share & trends analysis report. Erişim adresi: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/intelligent-transportation-systems-industry

ITS America. (2024). Smart infrastructure and mobility trends in North America. Retrieved from https://itsa.org

Karasar, N. (2016). Bilimsel araştırma yöntemleri. Nobel Yayınları.

Korea International Trade Association (KITA). (2023). Korean smart mobility efficiency report. Retrieved from https://www.kita.org

Lamme, V. A. (2006). Towards a true neural stance on consciousness. Trends in Cognitive Sciences, 10(11), 494–501.
McTrans. (2018). Application of active learning on transportation education.
Podgórniak-Krzykacz, A., & Przywojska, A. (2022). Perception of urban transportation system development according to age categories: A case study of Lodz. Sustainability, 14(5), 2731. https://doi.org/10.3390/su14052731
Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. Annual Review of Neuroscience, 13(1), 25–42.
Rogers, E. M. (2003). Diffusion of innovations (5th ed.). Free Press.
Schade, J., & Schlag, B. (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 6(1), 45–61. https://doi.org/10.1016/S1369-8478(02)00034-3
T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2020). Ulaştırma özel ihtisas komisyonu raporu. Erişim adresi: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/04/UlastirmaOzelIhtisasKomisyonuRaporu.pdf
T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024). Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve Eylem Planı. Retrieved from https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/KapasiteGelistirme/Egitim_Pdf/Akilli_Ulasim.pdf
Tektaş, M., & Tektaş, N. (2019). Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) uygulamalarının sektörlere göre dağılımı. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 2(1), 32–41. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/701122
Tektaş, N., & Tektaş, M. (2019). Dünyada akıllı ulaşım sistemlerinin gelecek hedefleri: Japonya örneğinin incelenmesi. Paradoks Ekonomi Sosyoloji ve Politika Dergisi, 15(2), 189–210. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/803932
Tektaş, N., & Tektaş, M. (2022). Ulaşımda milli teknoloji hamlesi: Akıllı ulaşım sistemleri. In Milli Teknoloji Hamlesi (Cilt 1, ss. 356–396). Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA). https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/bilim-ve-dusun/TUBA-978-625-8352-16-0_ch18.pdf
Tektaş, N., & Tektaş, M. (2023). AUS strateji ve eylem planları: Güney Kore örneği. In Geleceğin ulaşım dünyası: Akıllı ulaşım sistemleri, veri bilimi ve sürdürülebilirlik (Cilt 1, ss. 95–115). Aktif Yayıncılık.
Tektaş, N., & Tektaş, M. (2024). Engelsiz ulaşım ve yapay zekâ ilişkisi. In Yapay zekâ ve akıllı ulaşım sistemleri (ss. 31–62). Aktif Yayınevi.
Tektaş, N., Tektaş, M., & Yıldırım, B. (2024). Akıllı ulaşım sistemleri dünya pazarının incelenmesi. In Yapay zekâ ve akıllı ulaşım sistemleri (ss. 9–30). Aktif Yayıncılık.
Van der Laan, J. D., Heino, A., & de Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. Transportation Research Part C, 5(1), 1–10.
Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. Management Science, 46(2), 186–204.
Vlassenroot, M., De Ceuster, G., & Van Audenhove, A. (2010). Acceptance and acceptability of intelligent speed adaptation (ISA) systems: The role of individual and societal factors. Transportation Research Record, 2145(1), 63–70. https://doi.org/10.3141/2145-08

Hazır Giyim Sektöründe Yapay Zekânın Bugünü ve Geleceğe Etkisi

Nuray ÖZ CEVİZ*

*Dr. Öğr. Üyesi.; Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil Giyim Ayakkabı ve Deri Bölümü
nuray.ceviz@marmara.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-9670-6176.

ÖZET

Küresel hazır giyim endüstrisi, yoğun rekabet, hızlı teknolojik gelişmeler ve sürekli değişen tüketici tercihleri gibi özelliklere sahiptir. Bu yoğun rekabet ortamında ayakta kalmak için sektör, dijitalleşmeye ve yenilikçi yöntemlere ihtiyaç duymaktadır. Hızlı moda (fast fashion) bağlamında, kapasite planlama ve ürünlerin tüketici taleplerine göre akış içinde tutulması için sayısallaşma ve otomasyon kavramları büyük önem kazanmaktadır. YZ, tasarımdan üretime kadar olan süreçlerin optimize edilmesi, zaman ve maliyet tasarrufu sağlaması nedeniyle sektörel operasyonlar için zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışma, moda ekosistemindeki tasarım süreçleri kapsamında, özellikle üretken yapay zekâ (GenAI) destekli sistemler aracılığıyla gerçekleştirilen güncel uygulamaları ve etkilerini ortaya koymakta, YZ sistemlerinin hem tasarımcıya hem de endüstriye sağladığı yenilikleri, hız ve verimlilik açısından getirdiği alternatif çözümleri incelemek ve gelecekte moda tasarımı alanında sunacağı fırsatları araştırmak bu çalışmanın hedeflerindendir.

Anahtar Kelimeler –Hazır Giyim, Moda, Trend, Üretken Yapay Zeka, Tasarım.

GİRİŞ

Dünya çapında hazır giyim sektörü, bir yandan hızlanan trend döngüleri ve talep belirsizliğiyle, diğer yandan sürdürülebilirlik ve düzenleyici baskılarla aynı anda mücadele etmektedir. Sektör, yüksek rekabet, düşük kâr marjı ve hızlı moda döngüsü nedeniyle verimlilik ve yenilik ihtiyacı duymaktadır. Özellikle Avrupa Birliği'nin 2030 Dijital Pusula hedefleri, Dijital Ürün Pasaportu (DPP), izlenebilirlik ve veri paylaşımı gereklilikleri; Türkiye'nin ihracat odaklı hazır giyim yapısında dijitalleşme ve yapay zekâ (YZ) temelli çözümleri artık opsiyonel olmaktan çıkmış ve rekabet için önkoşul hâline gelmiştir. Endüstri 4.0 ile birlikte üretim ve tedarik zincirlerinde dijital dönüşümün hızlanması sektörel değişliklerde hızlı aksiyon alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Türkiye'de sektör yüksek istihdam ve ihracat payıyla stratejik bir öneme sahiptir. Böylece, KOBİ'lerde temel dijital yoğunluk, bulut/büyük veri kullanımı ve YZ yetkinlikleri ile gerekli altyapı eksikliklerinin giderilmesinin sektöre kısa vadede uygulanabilir bir dijital yetkinlik kazandıracağı düşünülmektedir. Bununla birlikte YZ ve veri girişimlerinin önceliklendirilmesi gerektiğini görülmektedir (İHKİB, 2024).

YZ, hazır giyim değer zincirinin neredeyse tüm halkalarında veri odaklı karar vermeyi güçlendirmektedir. Tasarımda üretken modellerle (generative AI) stil/desen üretimi ve yaratıcı ortak-üretim; tedarik ve planlamada talep tahmini ve stok optimizasyonu; üretimde otomatik kalite kontrol; pazarlama ve perakendede kişiselleştirilmiş öneri sistemleri, sanal

deneme kabinleri ve gerçek zamanlı müşteri içgörüleri sunmaktadır. Güncel derleme çalışmalar, YZ'nin tasarımcıya zaman kazanımı, müşteri tercihlerini anlama ve kaynaklara erişimde verimlilik sağlarken; trend kestirimi ve müşteriyle etkileşimli tasarım gibi alanlarda niteliksel fark yarattığını ortaya koymaktadır (Boğday Sayğılı & Güven, 2024).

Bu dönüşüm aynı zamanda israfın azaltılması, hatalı üretim ve iade oranlarının düşmesiyle döngüsel ekonomi hedeflerine hizmet etmektedir. Tedarik zincirinde veri bütünlüğü ve izlenebilirlik arttıkça, üretim planları gerçek talebe yaklaşmakta; küçük partili ve talep-üzerine üretim modelleri daha uygulanabilir hâle gelmektedir. Böylece hız, esneklik ve sürdürülebilirlik aynı denklemde birlikte optimize edilebilmektedir (Sevinç, 2025).

Perakende–müşteri arayüzünde YZ'nin anlık geri bildirim toplayarak tasarım/ürün kararlarını etkilemesi, "hızlı öğrenen" ürün geliştirme döngülerini mümkün kılmaktadır. Moda gösterilerinde ve çevrim içi kanallarda gerçek zamanlı etkileşimle tasarım varyantlarını test eden uygulamalar, veriyle beslenen hızlı iterasyon kültürünün habercisi olmaktadır. Bu örnek uygulamalar, YZ'nin yalnızca ofis verimliliği değil, aynı zamanda yaratıcılık ve deneyim tasarımında da çarpan etkisi yarattığını ortaya koymaktadır (Stolyar, 2018).

YZ'nin yaratıcı tasarım alanındaki yükselişi, moda tasarımını "algoritmalarla deney yapan tasarımcılar" paradigmasına yaklaştırmaktadır. Üretken ağlar ve difüzyon tabanlı modeller, referans yapıyı koruyarak stili aktarabilen, hızlı varyasyon üretebilen ve tasarımcının "ilk taslak maliyetini" düşüren araçlar sunmaktadır. Bu hem tasarım–teknoloji yakınsamasını hızlandırmakta hem de insan–makine ortak yaratıcılığını (co-creation) yeni bir mesleki yetkinlik olarak öne çıkarmaktadır (Särmäkari & Vänskä, 2022).

Türkiye bağlamında incelendiğinde, KOBİ ağırlıklı hazır giyim yapısında veri, bulut ve YZ yetkinliklerinin ölçeklenmesi ve iş gücü beceri dönüşümünün hızlandırılması ve tasarım–üretim–pazarlama süreçlerinde YZ'nin etik, şeffaf ve sürdürülebilir biçimde içselleştirilmesi, hazır giyim sektörünün ülke içinde gelişimi açısından geliştirilmeye açık alanlar olarak öne çıkmaktadır. İTKİB tarafından yayınlanan sektörel analiz raporu incelendiğinde, küresel ölçekte YZ'nin verimlilik ve büyüme üzerindeki etkisine dair makro-öngörüler, bu teknolojilerin ülkemiz hazır giyim sektörü tarafından ertelenmesinin stratejik bir fırsat maliyeti hâline geldiğini göstermektedir (Adigwe, vd., 2024; İHKİB, 2024). Zira yapılacak her çalışma, YZ olanakları ile üretimde verimlilik sağlarken, sürdürülebilirlik açısından da gerekli alt yapıyı oluşturacaktır.

YZ'nin sürdürülebilir modaya katkısı ise iki kanaldan gelmektedir;

- Daha az prototip/numune ile malzeme ve enerji tasarrufu,
- Talebe daha iyi uyarlanmış üretimle israf ve iade azalması.

3B tersine tasarım (3D-to-2D flattening) + Makine öğrenimi (ML) ile kişiye özel kalıp/fitting döngülerini dijitalleştirmek hem maliyet hem de

çevresel yükü düşürerek sürdürülebilir iş modeli oluşumunu sağlamaktadır (Wang, vd., 2023).

Bu bölümün amacı, hazır giyimde YZ'nin bugünkü kullanım alanlarını değer zinciri perspektifiyle bütüncül biçimde haritalandırmak; Türkiye'nin ihracat ve AB ile derin entegrasyon bağlamında dijital/yeşil dönüşüm gerekliliklerini (DPP, izlenebilirlik, veri altyapısı) YZ olanaklarıyla eşleştirmektir. Ayrıca, moda ekosistemindeki tasarım süreçleri kapsamında, özellikle üretken yapay zekâ (GenAI) destekli sistemler aracılığıyla gerçekleştirilen güncel uygulamaları ortaya koymayı ve bu sistemlerin sektördeki kullanımlarını ortaya koymayı amaçlamaktadır. YZ sistemlerinin hem tasarımcıya hem de endüstriye sağladığı yenilikleri, hız ve verimlilik açısından getirdiği alternatif çözümleri incelemek ve gelecekte moda tasarımı alanında sunacağı fırsatları araştırmak bu çalışmanın hedeflerindendir.

LİTERATÜR ÖZETİ: HAZIR GİYİMDE YAPAY ZEKÂ

1. Kavramsal Yönelim: Bilişsel Sistemlerden Üretken Modellere

Moda/tekstil literatüründe YZ önce bilişsel bilişim çerçevesiyle; sınıflandırılmamış büyük veriden anlamlı desenler çıkarma, tahmin ve karar destek işlevleriyle konumlanmıştır. Bu çizgi, tasarım–pazarlama–tedarik ekseninde altı ana kullanım alanında incelenmiş olup, trend tahmini, kişiselleştirme, görsel/duygusal etkileşim, envanter/stok, kalite ve müşteri deneyimi olarak sınıflanmıştır (Nadasbaş, 2020). Bilişsel sistem kullanımlarını 6 başlık altında derleyen çalışmalar, tasarımdan müşteri deneyimine kadar örnekleri sistematikleştirmektedir. Bu sınıflama uygulama portföyü oluşturan işletmeler için pratik bir başvuru haritası sunmaktadır.

2016 sonrasında ise üretken YZ (GENAI) ile stil transferi, desen/renk varyasyonu ve co-creation (insan–makine ortak yaratıcılığı) ön plana çıkmıştır. Üretken YZ ile "kodu tasarım girdisine dönüştüren" tasarımların geliştirilmesi hızlanmış ve düzenlenen yarışmalar ve endüstri iş birlikleri, yaratıcı süreci veri yönelimli hale getirmiştir (Jain, 2019; Rietze, 2016).

2. Tasarım ve trend tahmini

Google–Zalando'nun Project Muze girişimi, kullanıcı tercihlerini (iş birlikleri, ruh hâli vb.) üst-düzey temsillere dönüştürerek tasarım taslakları üretmeyi hedefleyen erken bir örnek olmuştur. Literatürde bu yaklaşım, tasarımcının keşif uzayını genişleten, ilk taslak maliyetini düşüren ve hızlı

iterasyonu mümkün kılan bir "yaratıcı ortak" olarak değerlendirilmektedir (Rietze, 2016). Kullanıcı tercihlerini üst-düzey temsillere dönüştürerek taslaklar üretmiş ve insan-makine ortak tasarım yaklaşımının temelini oluşturmuştur. Sonraki yıllarda generatif tasarım, yarışma ve sergilerde finalist çalışmalarla görünürlük kazanmıştır (Boğday Sayğılı & Güven, 2024; Jain, 2019)

Üretken YZ ile birlikte yapılan çalışmalar ve uygulamalar sayesinde ortaya çıkan üretken modellerin birçok değerlendirici tarafından onay aldığı görülmektedir. Programlarının veri girişlerinin artması ile stil bütünlüğünün tüm unsurları ile bütünleşeceği ve optimize olacağı beklenmektedir (Jain, 2019).

YZ ile oluşturulmuş tasarım panelleri sayesinde sanal deneme ortamı da sağlanmakta ve mikro-segmentasyon ile başarı olasılığı artmaktadır. Öğrenen bu sistemlere her bir veri girişi, bütün veya özel açısından tarza uygun seçenekler sunmaktadır (Nadasbaş, 2020).

Sosyal ortamlar ve defile verisi ile veri-temelli planlama yapılabilmektedir. Sosyal medya ve podyum verilerinden giyim öğesi frekansı gibi sinyallerle trend takibini belgeleyerek tasarım ve satın alma kararlarına girdi sağlanabilir; bu yaklaşım, fazla stok ve iadeyi önlemeye dönük planlamayı besleyebilmektedir (Boğday Sayğılı & Güven, 2024).

3. Perakende ve kişiselleştirme

Kişiselleştirilmiş öneri sistemleri ve görsel arama, müşteri–ürün eşleşmesini iyileştirirken dönüşüm oranlarında anlamlı artış görülmektedir. Bilişsel sistemlerin, soru-yanıt algoritmaları, kural+öğrenme hibritlerinden elde edilen verilerle, e-ticaret bağlamında "tarz öğrenme/uyarlama" gibi mikro etkileşimleri desteklemesi, YZ'nin müşteri deneyimini gerçek zamanlı geri bildirimle besleyerek hızlı öğrenen ürün geliştirme döngülerinin oluşmasında rol oynamaktadır (Nadasbaş, 2020). Perakende ve kişiselleştirme açısından sosyal medyanın sağladığı veri sayısının büyüklüğü de göz ardı edilememelidir. Satış, e-ticaret, arama motorları gibi sitelerden beslenen çok kaynaklı verinin işlendiği algoritmalar hem ürün veya hizmetlerin kişiselleştirilmesi hem de bu kişisel hizmetlerin de kendi içinde birçok alt segment ile (mevsimsel trend projeksiyonu, renk tercihleri, stil tercihleri vb. gibi) sunulmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca tüm bu veriler, trend kestirimleri ve talep tahminlerinin de kolayca yapılabilmesini sağlamaktadır.

4. Üretim, kalite ve tedarik zinciri

Üretimde bilgisayarlı görü ile otomatik kusur tespiti, hata ve iade oranlarını düşürerek maliyet ve israfı azaltmakta; stok/talep modelleri tedarik zinciri dalgalanmalarını izlenebilir hale getirmektedir. Literatürde, moda/tekstilin döngüsel ekonomi hedefleri (israfın azaltılması, doğru miktar/yer/zaman prensipleri) ile birlikte otomatik kusur tespiti ya da üretim,

kalite vb. süreçler irdelenmektedir (Nadasbaş, 2020). Görü tabanlı kusur tespit sistemleri ile hataların önlenmesi sağlanmakta, erken uyarı sistemleri tasarlanmakta, müdahale hızlanmakta ve hatta sıfır hata politikalarına uygun altyapılar oluşturulabilmektedir. Böylece fire oranlarının düşürülmesi ve iadelerin azaltılması hedeflenmektedir. Müşteri odaklı süreçlerin optimizasyonu ile yapılan taleplere uygun sunumların eşlenmesi, stok takibinin ayrıntılı analizi ve eksik/fazlalık durumlarının takibi ile depolama işlemlerinin optimizasyonu da üretim ve tedarik zincirlerini verimli hale getirmektedir.

5. Yaratıcılık, etik ve mesleki dönüşüm

Üretken YZ'nin yükselişi "tasarımcının rolü"nü küratör, yönlendirici ve kalite güvencesi gibi işlevlerle yeniden tanımlamaktadır. Erken örnekler, "AI-yardımlı tasarım"ın estetik/işlevsel tutarlılık, telif, veri önyargısı ve açıklanabilirlik gibi başlıklarda yeni normlar gerektirdiğini göstermektedir ((Jain, 2019; Rietze, 2016).

YZ'nin hazır giyimde yaygınlaşması, sadece verimlilik ve yaratıcılık kazanımları değil; veri gizliliği, fikrî mülkiyet (IP), şeffaflık/açıklanabilirlik, iş gücü beceri dönüşümü ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkiler nedeniyle bütüncül yönetişim gerektirmektedir. Üretken YZ tabanlı tasarım sistemleri ve trend/öneri motorları yaratıcı süreçleri hızlandırırken; telif/stil intihali iddiaları, veri kaynağı etikliği ve kullanıcıya sunulan açıklamanın yetersizliği risklerini de beraberinde getirmektedir (Bolesnikov, vd., 2022; Özlü & Demir, 2024).

Kişiselleştirme ve görsel/deneme altyapıları, beden ölçüsü, görsel tercih, gezinme geçmişi gibi hassas verileri işlemektedir. Çalışmalar, YZ destekli uygulamaların sürdürülebilir seçimi teşvik etme potansiyelini vurgularken marka şeffaflığı ve kullanıcı rızasının belirleyici olduğunu göstermektedir. Trend/öneri sistemleri için kullanılan görsel/metin veri kümelerinin menşei ve lisans durumu, IP riskini ve önyargıyı etkileyerek kaynağın da şeffaflığını sağlamalıdır. Görsel içerik (ürün fotoğrafları, lookbook) ile kullanıcı bağlamı (stil uyumu) birlikte işlendiğinde karar kuralları açıklanabilir olmalıdır (Bolesnikov, vd., 2022).

6. Makro etkiler: verimlilik, büyüme ve beceri dönüşümü

Sektör-ötesi makro modellemeler, YZ'nin 2027 itibarıyla büyüme ve verimliliğe katkısının hızlanacağına işaret etmektedir. Bu durum, hazır giyimde özellikle KOBİ yoğun yapılarda, YZ benimsemesini ertelemenin fırsat maliyeti doğurduğuna işaret eden argümanları güçlendirmektedir (Goldmansachs, 2023).

7. Türkiye/AB Bağlamıyla Hazır Giyim

Türkiye'de tekstil-hazır giyim GSYH'nin ~%6,2'si ve 1,5+ milyon istihdam ile stratejik; ihracatın %60+'ı AB'ye ve 2022'de AB'ye ~12,8

milyar $ ihracat yapılmış durumdadır. Bu, AB düzenlemeleri (Dijital Pusula, DPP, DSM) ile uyumlu dijitalleşme ve YZ yetkinliklerini önkoşul hâline getirmektedir. Yol haritası, bulut/büyük veri/YZ kullanan işletme sayısını artırma ve KOBİ'lerde temel dijital yoğunluğu yükseltme hedeflerini açıkça ortaya koymaktadır. AB 2030 hedefleri referans çerçeveyi oluşturmaktadır.

AB, Türkiye'den 103,1 milyar € ithalat yaparken tekstil-hazır giyim %19,8 pay ile öne çıkmaktadır. Çin/Vietnam/Hindistan gibi rakipler büyüme ve birim fiyat dinamikleriyle baskı oluşturmaktadır. Dolayısıyla dijitalleşme ve otomasyon, hızlı moda bağlamında kapasite/planlama için kritik bir öneme sahiptir (İHKİB, 2024).

AB Dijital Ürün Pasaportu (DPP) yaklaşımı, ürün ömrü boyunca izlenebilir veri gerektirmektedir. Kalite, malzeme, bakım/onarım, iade/defect log gibi üretim kayıtlarının bağlanması DPP'nin hedefiyle uyumlu bir alt yapı sağlayacaktır.

8. Hazır Giyim Sektöründe Kısa Yol Haritaları (0–3 yıl / 3–5 yıl)

Tablo 1. Hazır Giyimde Yapay Zeka Uygulama Alanları için gelecek stratejileri

Alan	0–3 yıl	3–5 yıl
Tasarım & Üretken YZ	Bulut tabanlı tasarım kütüphanesi, generatif araçlarla hızlı varyasyon ve A/B tasarım denemeleri; kurumsal telif/etik yönergesi; DPP'ye uygun meta-veri şeması hazırlanmalıdır (İHKİB, 2024).	Stil transferi/difüzyon modellerini PLM süreçlerine gömme; veri yönetişimi ve telif/doğrulanabilirlik için model kartları ve iç denetim mekanizmaları oluşturulmalıdır.
Trend Kestirimi & Talep Tahmini	Sosyal/arama/satış birleşik veri havuzu; haftalık trend-sinyal panosu; koleksiyon planlamasına bağlanan erken uyarı eşiklerinin tasarlanması ve uygulamaya geçirilmesi (Boğday Sayğılı & Güven, 2024).	Bölge/kanal kırılımında nedensel talep modelleri; DPP ile bağlantılı talep-üretim izlenebilirliği sağlanmalıdır.
Kişiselleştirme & Öneri	CDP/CRM verisiyle tarz-öğrenme; şeffaflık metinleri ve rıza yönetimi, dönüşüm/iadeye etkisini izleyen panellerin tasarımlarının yapılması (İHKİB, 2024; Nadasbaş, 2020).	Mağaza-içi ve online birleşik omni-kanal öneri; açıklanabilirlik katmanı (ör. "neden bu öneri?").
Görsel Arama & Sanal Deneme	Ürün görselleri/fit verisi standardizasyonu; avatar deneme pilotu; iade-düşürme KPI'ları (Nadasbaş, 2020).	Vücut ölçü/verisi için privacy-by-design; DPP'de kullanıcıya uyum/ bakım bilgisini sunan arayüzlerin tasarımı (İHKİB, 2024).
Kalite Kontrol (CV)	Hat üstü kusur tespiti PoC; aydınlatma/tezgâh farkı için veri artırma; defect log → DPP bağlantısı (İHKİB, 2024; (Nadasbaş, 2020).	Çok-istasyonlu izleme; PLM/ERP ile kapalı-devre kalite optimizasyonu.
Stok & Tedarik Optimizasyonu	Haftalık talep tahmini; güven aralığına göre emniyet stoğu; AB volatilitesini izleyen panoların tasarımı (İHKİB, 2024).	Sipariş-üzerine (make-to-order) oranını artıran planlama; lojistik emisyonlarını modele dâhil eden yeşil YZ.
Mesleki Dönüşüm & Etik	Tasarım/planlama ekipleri için prompt-mühendisliği + veri etik mikro sertifikaları; YZ kullanım politikası (İHKİB, 2024).	İç etik kurul ve periyodik önyargı denetimi; tedarikçi-entegrasyonlu beceri programları.

VERİ, ETİK VE EMEK DÖNÜŞÜMÜ

1. Fikrî mülkiyet (IP) ve üretken YZ

Üretken YZ'nin moda tasarımında kullanımı hızla artmakta; bu sistemler stil transferi, desen/renk varyasyonu ve hızlı iterasyon yetenekleri sunmaktadır. Ancak veri seti lisansları, eğitim materyalinin telifi ve ortaya çıkan işler üzerindeki haklar kurumsal politika gerektirmektedir. Saha derlemeleri ve örnek vakalar, üretken YZ'nin tasarımcıyı "ortak yaratıcı/küratör" rolüne kaydırdığını, fakat etik ve telif standartlarının netleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Özlü & Demir, 2024).

Ayrıca sanal moda/metaverse uygulamalarında avatarlar için geliştirilen dijital kıyafetlerin lisanslama/yeniden kullanım kuralları ve platform şartları kritik hale gelmektedir (Abanozoğlu & Değerli, 2022).

2. İş gücü ve beceri dönüşümü

Sektörde çalışan tasarımcıların rollerinde değişimler olduğu gözlenmektedir. Tasarımcıların rolü, prompt yazımı, model/girdi seçimi, kalite güvencesi ve etik denetime kaymakta; kalıp tasarımcıları ve modelistlerde ise 3B/CAD ve veri temelli fitting yetkinlikleri önem kazanmaktadır. ML ile güçlendirilmiş 3B tersine tasarım yaklaşımı, deneyimsiz tasarımcı için bile kararlara "YZ danışmanı" olarak destek verebilmektedir (Wang, vd., 2023).

Üretim hatları incelendiğinde ise, görü tabanlı kalite kontrol ve talep tahmini; vardiya planlama, hata azaltma ve emek verimliliği etkileri gözlenmektedir. Bu, mavi yaka çalışanlar için yeni dijital çalışma talimatları ve beceri programlarını gerektirmektedir.

3. Sürdürülebilirlik ve döngüsellik

YZ; kişiselleştirilmiş kalıp/fitting, dijital prototipleme ve numunesiz koleksiyon denemeleriyle malzeme israfını azaltmaktadır. Saha bulguları, talebe uyumlu üretim ve optimize stokla iade/atıktan tasarruf potansiyelini ortaya koymakta; bu, sürdürülebilir satın alma davranışını da olumlu etkilemektedir (Bolesnikov, vd., 2022; Wang, vd., 2023).

Ayrıca 3B "tersine" yaklaşım, kişiye özel ürün ile fazla stoğu azaltan O2O (online sipariş–offline hizmet) iş modelini mümkün kılmaktadır (Wang, vd., 2023).

4. Tavsiye/uyumluluk sistemleri: teknik yön ve önyargı

Modada öneri problemlerinde benzerlikten çok "uyumluluk" esas olmakta, görsel özellikler ile birlikte bağlamsal meta-veri de değerlendirilmektedir. Derleme/saha çalışmaları, derin öğrenme tabanlı görsel modellerin bu alanda standarda dönüştüğünü ve kullanıcı deneyimini iyileştirdiğini göstermketedir; ancak veri temsili/önyargı ve açıklanabilirlik konularının geliştirilmesi gerektiği açıktır (Bolesnikov, vd., 2022).

Uygulamalı modellerde CNN/VIT tabanlı gömülü temsiller ve yakın komşuluk yöntemlerinin görsel arama/öneri performansına katkısı belgelenmiştir (Özgenç, 2022).

Tasarım sürecinde ise etkileşimli görselleştirme+CNN ile materyal/aksesuar tavsiyesi tasarım süresini kısaltıp verimliliğini arttırabileceği öngörülmektedir (Zhao & Zou, 2023).

Ayrıca son 10 yılın kapsamlı derlemesi, image-based moda öneri sistemlerinin ana akım yaklaşımlarını ve veri gereksinimlerini sınıflandırarak, bu çalışmalara yön vermektedir (Shirkhani, vd., 2023).

5. Sanal moda, metaverse ve IP/etik boyut

Sanal moda ve metaverse uygulamaları (dijital defileler, avatar giydirme) pandemiyle hız kazanmış; lüks markaların platform-içi deneyimleri, yeni gelir modeli ve IP tartışmaları ile büyüme devam etmiştir. Platform ekonomisinin kuralları, NFT/varlık sahipliği ve avatar kimliği gibi alanlarda şeffaf lisanslama ve kullanım şartları netliği gerekmektedir. (Abanozoğlu & Değerli, 2022). Türkiye literatürü de sanal modanın tasarım içindeki yerini ve YZ ile ilişkisini derlemektedir (Gök, 2020).

6. Risk–Fırsat Matrisi

Tablo 2. Veri, Etik ve Emek açısından Risk – Fırsat Değerlendirme Matrisi

Alan	Fırsat	Risk	Kontrol/Metot
Veri (CDP/CRM, görsel, beden/fit)	Kişiselleştirme, iade/israf azalması, sürdürülebilir tercihlerin teşviki	Gizlilik/rıza, veri sapmaları/önyargı	Veri envanteri & DPIA; açıklanabilirlik katmanı, rıza/opt-out akışları.
Üretken YZ tasarım	Hızlı iterasyon, maliyet/numune tasarrufu	Telif/stil intihali, eğitim verisi lisansı	Eğitim veri lisans taraması; IP-safe mode; insan-onaylı "tasdik zinciri".
3B tersine tasarım + ML	Kişiye özel uygunluk, O2O iş modeli, atık azalması	Kalıp güvenilirliği, yeni beceri ihtiyacı	ML ile fit tahmini/uyarlama; kalıp doğrulama; eğitim programı.
Öneri/uyumluluk	Dönüşüm/sadakat, deneyim kalitesi	Önyargı, açıklanamaz kararlar	Görsel+bağlamlı özellikler; model kartı; fairness testleri.
Sanal moda/metaverse	Yeni gelir, düşük karbonlu dijital koleksiyon	IP/varlık sahipliği, platform riski	Lisans&Hak dokümantasyonu; sözleşme ve zincir-üzeri kayıt.

Bu tablo, moda veya perakende sektöründe yapay zeka ve dijital dönüşümün potansiyelini, beraberindeki riskleri ve bu riskleri yönetmek için alınması gereken kontrol mekanizmalarını kapsamlı bir şekilde özetlemektedir. Veri yönetimi (CDP/CRM), Üretken Yapay Zeka (YZ) ile

tasarım, 3 Boyutlu (3B) tersine tasarım, ürün öneri sistemleri ve Sanal Moda/Metaverse gibi kilit alanlarda, temel fırsatlar kişiselleştirme, maliyet/atık azaltma ve yeni gelir modelleri etrafında toplanmaktadır. Ancak, bu fırsatlar gizlilik, veri sapmaları, telif hakkı ihlali, kalıp güvenilirliği ve fikri mülkiyet (IP) sahipliği gibi ciddi risklerle dengelenmek zorundadır. Bu riskleri azaltmak için önerilen kontrol mekanizmaları ise veri envanteri ve Etki Değerlendirmesi (DPIA), IP-safe modları, insan-onaylı tasdik zincirleri, ML ile doğrulama süreçleri, model kartları, fairness testleri ve zincir-üzeri kayıtlar gibi hem hukuki hem de teknik çözümlere odaklanarak, inovasyonun etik ve sorumlu bir çerçevede ilerlemesini hedeflemektedir.

GELECEK EĞİLİMLERİ: HAZIR GİYİMDE YZ'NİN YÜKSELEN UFUKLARI

1. Difüzyon modelleri ve üretken tasarım

GAN'lerle başlayan üretken tasarım çizgisi bugün difüzyon modelleriyle daha kontrollü, referans-yapılı aktarım ve biçim korumayla ilerlemektedir. Erken dönem çalışmalarda GAN'lerin tekstil/giysi form üretimindeki potansiyel ve sınırları gösterilmiştir. Büyük veri üzerinden eğitilen ağlar estetik açıdan yeni tasarımlar üretebilse de giyilebilirlik ve işlevsellikte insani yönlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır (Değerli, 2019).

Bu hat, güncel difüzyon tabanlı yöntemlerde (ör. structure-aware transfer) tasarım referansını yapısal sadakatle yeni stile taşımaya evrilmiştir. Moda özgülünde difüzyon modelleri, biçim ve doku aktarımını ayrıştırarak denetimi artırmaktadır (CVPR atölye bildirimi) (Boğday Sayğılı & Güven, 2024).

Sanat-tasarım literatürü de insan-makine ortak yaratımını yeni bir estetik ve "rol dağılımı" olarak tarif etmektedir. Üretken araç, tasarımcının yaratıcılığını ivmelendiren bu yapı, insan temelli kurgu ve anlam dünyası ile şekillenmektedir (Deveci, 2022).

Tüm bu yaklaşımlar; referans tabanlı difüzyonla stil aktarımı, örüntü/kalıp kısıtlarıyla üretim ve veri etiği ve önyargı denetimi (dataset governance) yapılarak kısa bir yol haritasını şekillendirmektedir (Bayburtlu, vd., 2025; Özlü & Demir, 2024).

2. Dijital ikiz ve sanal numune (Digital Twin)

Dijital ikiz, kumaş ve kalıp davranışını yüksek doğrulukla simüle eden bir "sanal ürün" kopyasıdır. Güncel çalışmalar, binlerce kumaştan alınan mekanik/optik verilerle eğitilen ağların 3B simülasyonlarda gerçek dünyaya yakın performans verdiğini; bu sayede tasarım-prototip döngüsünün hızlanıp malzeme israfının azaldığını göstermektedir (Özlü & Demir, 2024).

3B giysi CAD/simülasyon sistemlerinin (Clo3D, Browzwear, vb.) sürdürülebilirlik hedeflerine katkısı: gerçek numune sayısının azalması, materyal tasarrufu ve çevresel ayak izinde düşüş olarak karşımıza çıkmaktadır (Wang, vd., 2023).

3. "Yeşil YZ": Sürdürülebilirlik, döngüsellik ve kaynak verimliliği

Moda endüstrisinin 8–10% küresel karbon salımı ve ~%20 endüstriyel atıksu payı gibi ağır çevresel etkileri, tasarım ve tedarik zinciri süreçlerinde YZ destekli dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Çalışmalar, YZ'nin sürdürülebilir moda davranışlarını (bilinçli satın alma, kişiselleştirilmiş bilgi) tetikleyebileceğini ve işletmelerde strateji-planlama-pazarlama boyunca dönüşüm yarattığını vurgulamaktadır (Bolesnikov, vd., 2022).

Aynı çizgi, kişiselleştirilmiş 3B tersine tasarım (3D-to-2D) ve uyum tahmini gibi ML çözümlerinin daha az prototiple "doğru ürünü" üretmeye imkân verdiğini doğrulamaktadır. Özetle "yeşil YZ" yaklaşımı: düşük numune, talebe-göre üretim, atık minimizasyonu ve lojistik optimizasyonu sağlamaktadır (Wang, vd., 2023).

4. Veri işbirliği ve yönetişim

Trend analizi, öneri ve talep tahmini için veri işbirliği kritik bir öneme sahiptir. Marka-perakendeci-platform üçgeninde (ve tüketici rızasıyla) çok-kaynaklı veri birleştirmeleri doğruluğu artıracaktır; ancak gizlilik, önyargı ve adalet riskleri iyi yönetilmelidir. Moda-YZ yazını veri odaklı kararları, RTFS (Real-Time Fashion Systems) vizyonunu ve uçtan uca YZ kullanımını işaret ederken, etik ve toplumsal etkiler için disiplinlerarası yönetişim çağrısı yapmaktadır (Akbaş, 2024; Bolesnikov, vd., 2022). Tasarım pratiklerinde de veri/önyargı farkındalığı ve adil set oluşturma gereği öne çıkmaktadır (Bayburtlu, vd., 2025).

5. Üretkenlik ölçümü: "hız-kalite-israf" üçlüsü

YZ destekli süreçlerde verimliliği yalnız hızla değil; **(i)** tasarım iterasyon süresi, **(ii)** sanal-gerçek numune oranı, **(iii)** israf-geri dönüşüm göstergeleri, **(iv)** talep isabeti (sell-through), ve **(v)** yaratıcılık/çeşitlilik metriğiyle izlemek gerekmektedir. Güncel derlemeler, trend/market analitiği ve kişiselleştirmenin "doğru zamanda-doğru miktarda" üretimi mümkün kıldığını; bu da stok optimizasyonu ve kaynak verimliliğine yansıdığını ortaya koymaktadır (Özlü & Demir, 2024). Sosyal-estetik boyutta ise insan-

makine ortak üretiminin yaratıcılığı artırdığı; fakat nihai anlam üretiminde insan kürasyonunun merkezi kaldığı bildirilmektedir (Deveci, 2022).

Tablo 3. Uygulama alanı açısından akademik bulguların uygulama örnekleri ile eşleştirilmesi

Uygulama alanı	**Akademik bulgular**	**Sektör/uygulama örnekleri**	**Dikkat edilmesi gereken noktalar**
Difüzyon tabanlı tasarım aktarımı	Yapısal sadakati koruyan referans-yönlendirmeli aktarım; GAN'lerin estetik üretimi → difüzyonda denetim artışı	CVPR'23 difüzyonla yapı farkındalıklı transfer; Facebook GAN koleksiyonu deneyleri	Üretken YZ, "ilham motoru"; giyilebilirlik için insan kürasyonu geliştirilmeli.
Dijital ikiz (3B simülasyon)	Kumaş verisiyle eğitilen ağlar gerçekçi simülasyon; prototip sayısı ve malzeme israfı azalır	Tekstil simülasyon programı; Clo3D/Browzwear/CAD ekosistemi	Numunesiz doğrulama, "pazara çıkış" hızını yükseltir.
Sürdürülebilirlik (Yeşil YZ)	Moda sektörünün 8–10% CO_2 ve ~%20 atıksu katkısı; YZ ile davranış/strateji dönüşümü	RTFS vizyonu; kişiselleştirilmiş sürdürülebilir seçeneklerin sunumu	"Daha az numune, doğru miktar" çevresel etkiyi düşürür.
Veri işbirliği ve yönetişim	Veri odaklı karar alma, uçtan uca YZ; etik çerçeveye toplumsal katılım gereği	Marka-perakendeci-platform veri paylaşımı; önyargı taraması	Gizlilik, önyargı ve adalet kontrolleri eşlik etmeli.
Üretkenlik ölçümü	Trend/market analitiği, stok optimizasyonu; erişilebilir araçlarla tasarımcı verimliliği	Web-tabanlı üretken araçlar; pazar/arıza isabeti metrikleri	Çok boyutlu KPI seti kur: hız, israf, isabet, çeşitlilik.

SONUÇ

Yapılan çalışma, hazır giyimde yapay zekânın (YZ) tasarımdan üretime, tedarik zincirinden müşteri deneyimine uzanan değer zinciri boyunca üç ana etkisini ortaya koymaktadır. Üretken YZ/difüzyon yaklaşımı tasarımcının keşif uzayını genişletip ilk taslak maliyetini ve iterasyon süresini düşürmekte; ancak estetik-işlev dengesi için insan kürasyonu ve etik/telif yönergeleri hazırlamanın önemini vurgulamaktadır (Özlü & Demir, 2024). Talep tahmini, kalite kontrol ve stok optimizasyonu, israf, iade ve fazla stoku azaltarak "yeşil dönüşüm" hedeflerine katkı vermektedir. 3B tersine tasarım + ML ile numunesiz/sanal prototip döngüleri, maliyet ve çevresel yükte görünür düşüş sağlamaktadır (Wang, vd., 2023).

Pazar erişimi ve regülasyon uyumu açısından Türkiye'nin AB'ye yüksek bağımlı ihracat yapısı (2022'de ~12,8 milyar $; ihracatın %60+'ı AB) YZ-destekli izlenebilirlik, veri yönetişimi ve Dijital Ürün Pasaportu (DPP) uyumunu stratejik önkoşul hâline getirmektedir (İHKİB, 2024).

Ayrıca, görsel arama/öneri alanında "benzerlikten çok uyumluluk" ölçütü belirleyici olup, derin öğrenme tabanlı moda öneri sistemlerinin ana akım yaklaşımı olarak konumlandığı görülmekte ve kişiselleştirmenin etkinliğini arttırdığı vurgulanmaktadır (Shirkhani, vd., 2023).

ÖNERİLER

Dünyanın yanı sıra ülkemizin de en önemli sektörlerinden biri olan hazır giyim sektörü, modanın yön verdiği giyinme alışkanlıkları ile ülkemizin değer üreten önemli sanayi kollarından biridir. Teknolojik gelişmeler, çevresel faktörler, uyum yasaları vb. tüm değişimler sektörü yakından ilgilendirmekte ve şekillendirmektedir. Özellikle yapay zekanın gelişmesi ve dijital kimliklerin oluşması ile hem akademik hem de sektörel olarak çok sayıda çalışma yapılmakta ve sektörü şekillendirmektedir. Dolayısıyla hem akademiye hem sektöre hem de politika belirleyicilere birtakım görevler düşmektedir.

- Elyaf/kimyasal, süreç istasyonları, kalite/kusur (defect log), bakım/onarım ve geri dönüşüm kanallarını kapsayan asgari veri alanları sektör genelinde standardize edilmelidir (İHKİB, 2024).

- Yol haritasının vurguladığı 32 eylem alanı ve etki-fizibilite sıralamasına göre ortak pilot çağrıları açılmalı; teknoloji envanteri ve fon mekanizmaları KOBİ odaklı basitleştirilmelidir (İHKİB, 2024).
- Marka-perakendeci-platform düzeyinde (rıza temelli) çok-kaynaklı veri paylaşımı; gizlilik/önyargı/adalet ilkeleriyle yönetişime bağlanmalıdır (İHKİB, 2024; Shirkhani, vd., 2023).
- Veri envanterleri ve yönetişimi DPP alanları ile kısa vadede eşleştirilmeli, telif ve lisans kontrol listeleri oluşturulmalı ve sanal – gerçek numune oranı ve zaman tasarrufu KPI'ları kurulmalıdır.
- Kişiye özel ürün hatları tasarlanmalı, izlenmeli ve iyileştirilmelidir.
- İzlenebilir kalite zinciri halkaları kurulmalıdır.
- Stil/biçim ayrışması ve referans-yapılı aktarım tercih edilmeli; "model kartları + veri menşei"na dayalı iç denetimler zorunlu hale getirilmelidir.
- Çok-boyutlu KPI setleri tasarlanmalı, hız, kalite, israf, hedef pazar ve yaratıcılık/çeşitlilik adımları iyi analiz edilerek uygulanmalıdır.
- Tasarımcı için küratör/prompt mühendisi, modelist için 3B-ML uyarlayıcı, kalite için görü tabanlı denetçi gibi roller belirlenmeli, kısa modüler eğitimlerle desteklenmelidir.
- Öneri ve üretken araçlarda şeffaflık (kullanıcıya neden/niçin), rıza ve önyargı denetimi standartlaştırılmalıdır.

Türkiye'nin AB'ye entegre hazır giyim ekosisteminde, YZ + DPP + veri işbirliği üçlüsünü birlikte yürüten firmalar; hız-kalite-israf dengesini aynı anda optimize ederek hem rekabetçi fark hem de sürdürülebilir büyüme sağlayacaktır. Bu çalışma, uygulama alanlarını haritalandırıp (tasarım, üretim, tedarik, deneyim), etik ve yönetişim ilkelerini belirleyerek ve somut yol haritalarıyla destekleyerek akademi ve sektör için uygulanabilir bir çerçeve sunmuştur.

KAYNAKLAR

Abanozoğlu, B., & Değerli, N. G. (2022). Metaverse evreninde lüks moda markalarından uygulama örnekleri. *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *14*(4), 464-482.

Adigwe, C. S., Olaniyi, O. O., Olabanji, S. O., Okunleye, O. J., Mayeke, N. R., & Ajayi, S. A. (2024). Forecasting the future: The interplay of artificial intelligence, innovation, and competitiveness and its effect on the global

economy. *Innovation, and Competitiveness and its Effect on the Global Economy (February 26, 2024)*.

Akbaş, A. (2024). Yapay zekâ ile toplumsal dönüşüm: Sosyolojik perspektif. *Uluslararası Beşeri Bilimler ve Eğitim Dergisi*, *10*(22), 151-180.

Bayburtlu, Ç., İşgören, A. N., Büyükpehlivan, G. A., Öznaz, D., Ceviz, N., Eroglu, N. S., ... & Dinçer, G. (2025). Moda Tasarımı ve Yapay Zeka. *Öneri Dergisi*, *20*(MX Yaratıcı Endüstriler Çalıştayı 2024: Yapay Zeka Çağında Yaratıcı Endüstriler Özel Sayısı), 1-49.

Boğday Sayğılı, B., & Güven, P. (2024). Moda Tasarımında Yapay Zekanın Kullanımı. *Electronic Journal of Social Sciences*, *23*(92).

Bolesnikov, M., Popović Stijačić, M., Keswani, A. B., & Brkljač, N. (2022). Perception of innovative usage of AI in optimizing customer purchasing experience within the sustainable fashion industry. Sustainability, 14(16), 10082.

Deveci, M. (2022). Yapay zekâ uygulamalarının sanat ve tasarım alanlarına yansıması. Vankulu Sosyal Araştırmalar Dergisi, (9), 118-140.

Değerli, N. G. (2019). Moda Tasarımında Yeni Ufuklar. *Güzel Sanatlar* Alanında Yeni Ufuklar, Gece Akademi, Ankara.

Goldmansachs. (2023). "AI may start to boost US GDP in 2027". https://www.goldmansachs.com/insights/articles/ai-may-start-to-boost-us-gdp-in-2027.

Gök, M. O. (2020). Tasarımda Sanal Modanın Yeri. Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi, 26(44), 222-228.

İHKİB. (2024). Tasarımdan Üretime: Türkiye'de Hazır Giyim Sektöründe Dijital Dönüşüm, Dijital Dönüşüm Yol Haritası, Firma El Kitabı.

Jain, M. (2019). An AI "Designer" Just Won Runner-Up in a Major Fashion Design Competition. https://radii.co/article/an-ai-designer-just-won-runner-up-in-a-major-fashion-design-competition. Erişim Tarihi: 20.09.2025

Özlü, P. G., & Demir, N. E. (2024). Moda tasarımı sürecinde üretken yapay zekâ destekli sistemler. STAR Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi, 5(8), 110-122.

Özgenç, M. Y. (2022). Moda Kategorisine Yönelik Evrişimli Sinir Ağları Tabanlı Oneri Sistemi Tasarımı (Master's thesis, Marmara Universitesi (Turkey)).

Särmäkari, N., & Vänskä, A. (2022). 'Just hit a button!'–fashion 4.0 designers as cyborgs, experimenting and designing with generative algorithms. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, *15*(2), 211-220.

Sevinç, M. E. (2025). "Tekstil ve moda sektöründe yapay zeka kullanımı israfı önlüyor". https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/tekstil-ve-moda-sektorunde-yapay-zeka-kullanimi-israfi-onluyor/3667554 Erişim tarihi: 15.10.2025

Shirkhani, S., Mokayed, H., Saini, R., & Chai, H. Y. (2023). Study of AI-driven fashion recommender systems. *SN Computer Science*, *4*(5), 514.

Stolyar, B. (2018). "At N.Y. Fashion Week, Badgley Mischka let audience vote on designs with an app". https://www.digitaltrends.com/phones/badgley-mischka-runway-app-new-york-fashion-week/ Erişim tarihi: 10.10.2025

Nadasbaş, S. E. (2020). Bilişsel bilişim teknolojilerinin moda endüstrisinde kullanımı. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, *7*(50), 195-213.

Rietze, A. (2016). Project Muze: Fashion inspired by you, designed by code. https://blog.google/around-the-globe/google-europe/project-muze-fashion-inspired-by-you/ Erişim Tarihi: 29.09.2025.

Wang, Z., Tao, X., Zeng, X., Xing, Y., Xu, Z., & Bruniaux, P. (2023). A machine learning-enhanced 3D reverse design approach to personalized garments in pursuit of sustainability. *Sustainability*, *15*(7), 6235.

Zhao, D., & Zou, Q. (2023). Neural network models in fashion design recommendation with interactive visualization methods.

Osmaniye İlinin Yayla Turizmi Potansiyelinin SWOT Analizi ile Değerlendirilmesi

Nuri ERDEM[1]

1- Doç. Dr.; Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü. nurierdem@osmaniye.edu.tr ORCID No: orcid.org/ 0000-0002-1850-4616

ÖZET

Günümüzde deniz, kum ve sahil turizminden daha çok tabiatla, doğal çevreyle ve yaylalarla bütünleşmeyi sağlayacak alternatif turizm faaliyetleri ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda yayla turizmi de son yıllarda hızla yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde çadır kurula veya kalıcı yerleşimlerin olduğu çok sayıda yayla bulunmaktadır. Değişik özellikte yaylaların olmasına rağmen insanların daha çok yeşillikler arasında dinlendiği, huzur bulduğu ve özellikle yaz aylarındaki sıcak ve bunaltıcı havalardan kaçmak isteyenlerin tercih ettiği yaylalarda çeşitli sosyal ve kültürel etkinliklerin de olduğu görülmektedir. Bu nedenle ülkemizin yayla turizmi potansiyeli geliştirilmelidir. Ancak, günümüzde bu konuda sürdürülebilir ve planlı çalışmalar bulunmamaktadır. Sonuçta bu durum yaylalarımızın turizm potansiyelinin ortaya çıkmasını engellemektedir.

Osmaniye İlinde değişik rakımlarda irili ufaklı çok sayıda yayla olmasından dolayı yayla turizmi bölgesi olma özelliği mevcuttur. İlde, doğal güzellikleri henüz bozulmamış olan çok sayıda yayla bulunmaktadır. Osmanlı Devleti döneminde Cebeli Bereket sancağının ilde bulunan Yarpuz yaylasında kurulmuş olmasından dolayı, İlin tarihi ve kültürel geçmişi çok eski tarihlere dayanmaktadır. Bu nedenle birçok tarihi cami, arkeolojik sit alanı, kale ve köprü gibi kültürel varlıklar bulunmaktadır. Bu çalışmada, Osmaniye İlindeki yayla turizminin sürdürülebilir olması ve bölge ekonomisine katkısının sağlanabilmesi için konuyla ilgili çok sayıda literatür taraması yapılarak elde edilen verilerden faydalanılarak bir SWOT analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda Osmaniye ilinin yayla turizmi açısından güçlü olan en önemli yönlerinin doğal özellikleri bozulmamış olan çok sayıda yaylasının bulunması, doğa yürüyüşü, yamaç paraşütü, dağa fotoğrafçılığı gibi hobilerin yapılmasına uygun lokasyonların bulunması ve özellikle bölgede yazların uzun, çok sıcak ve bunaltıcı derecede nemli geçmesinden dolayı zorunlu bir ihtiyaç olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Yaylalar, Dağlık Alanlar, Yayla Turizmi, Osmaniye.

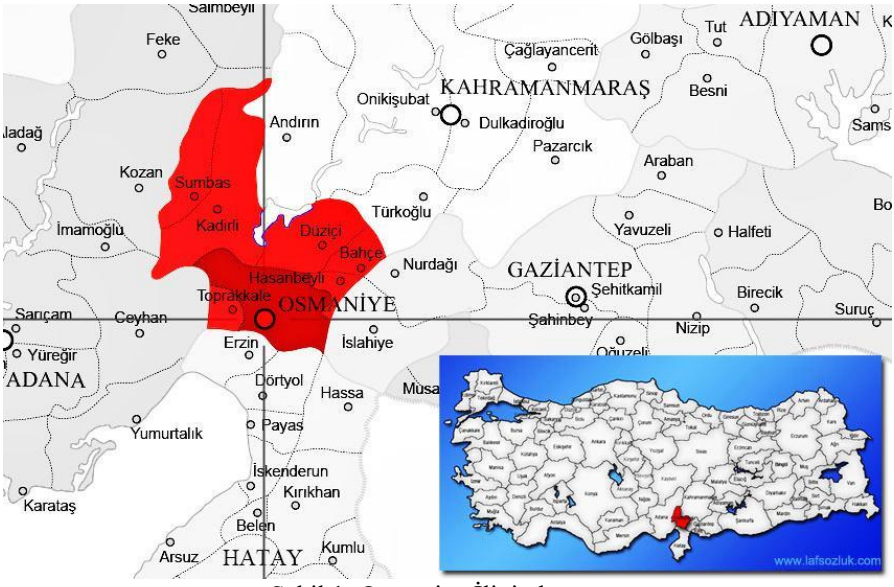
GİRİŞ

İnsanlar on zamanlarda, deniz ve güneş şeklinde düşünülen klasik turizm anlayışından daha çok tabiatla, çevreyle bütünleşmeyi ve farklı kültür ve yaşayışları öğrenmeyi-deneyimlemeyi sağlayacak alternatif turizm uygulamalarına yönelmektedir. Yayla turizmi bu bakımdan öne çıkmaktadır. Hem dinlenmek ve hem de tatil yapmak amacıyla yaylalar tercih edilmektedir (Tekin, 2016). Bunun yanında yaşadığımız pandemi süreci ve sonrasındaki Kahramanmaraş merkezli 6 Şubat depremleri yaylaların önemini giderek arttırmıştır.

Geleneksel kitle turizminden daha farklı bir oluşum ve hizmet sunmayı ifade eden alternatif turizm kavramı, gittikçe gelişmekte olan bir turizm hareketliliğini, kârlılığın en yüksek düzeyde tutulmasını, turizm alanındaki gelişmelerin uzun vadeli programlarla sağlanmasını, doğal çevreye saygı ve onunla bütünleşmesini ön plana çıkarmaktadır. Turizm gelirlerini arttırmanın yolu en başta alternatif turizm imkanlarının değerlendirilmesinden geçmektedir. Bu da ancak alternatif turizmin sürdürülebilir bir şekilde geliştirilmesiyle mümkün olacaktır. Alternatif turizm türleri içindeki "yayla turizmi" son yıllarda öne çıkan turizm faaliyetlerinden biridir (Tekin, 2016).

ÇALIŞMA BÖLGESİ

Osmaniye; Ülkemizin güneyinde, Akdeniz Bölgesinin doğusunda bulunan Çukurova'da yer almaktadır. Gaziantep, Hatay, Adana ve Kahramanmaraş illeri ile çevrilidir (Şekil 1). İlin batı kesimleri Adana ovasının doğuya doğru uzanan düzlükleri ile çevrilidir. Osmaniye'nin güneyinde Amanos Dağları, kuzeybatısında Toros Dağları, doğusunda ise Dumanlı Dağı ile Düldül ve Tırtıl Dağları mevcuttur (Şekil 2). 1933 yılında ilçe olmuş ve Adana İline bağlanmıştır. 1996 yılında ise Türkiye'nin 80. ili olmuştur (OİKTM, 2017). Osmaniye ili; 35 52'-36 42' Doğu boylamları ve 36 57'-37 45' Kuzey enlemleri arasındadır. Güneydoğu bölgesinden Akdeniz'e ulaşım kapısı olması ve uygun iklim şartlarından dolayı sürekli göç almaktadır (Koç, 2008, Tıraş ve Besnek, 2017).



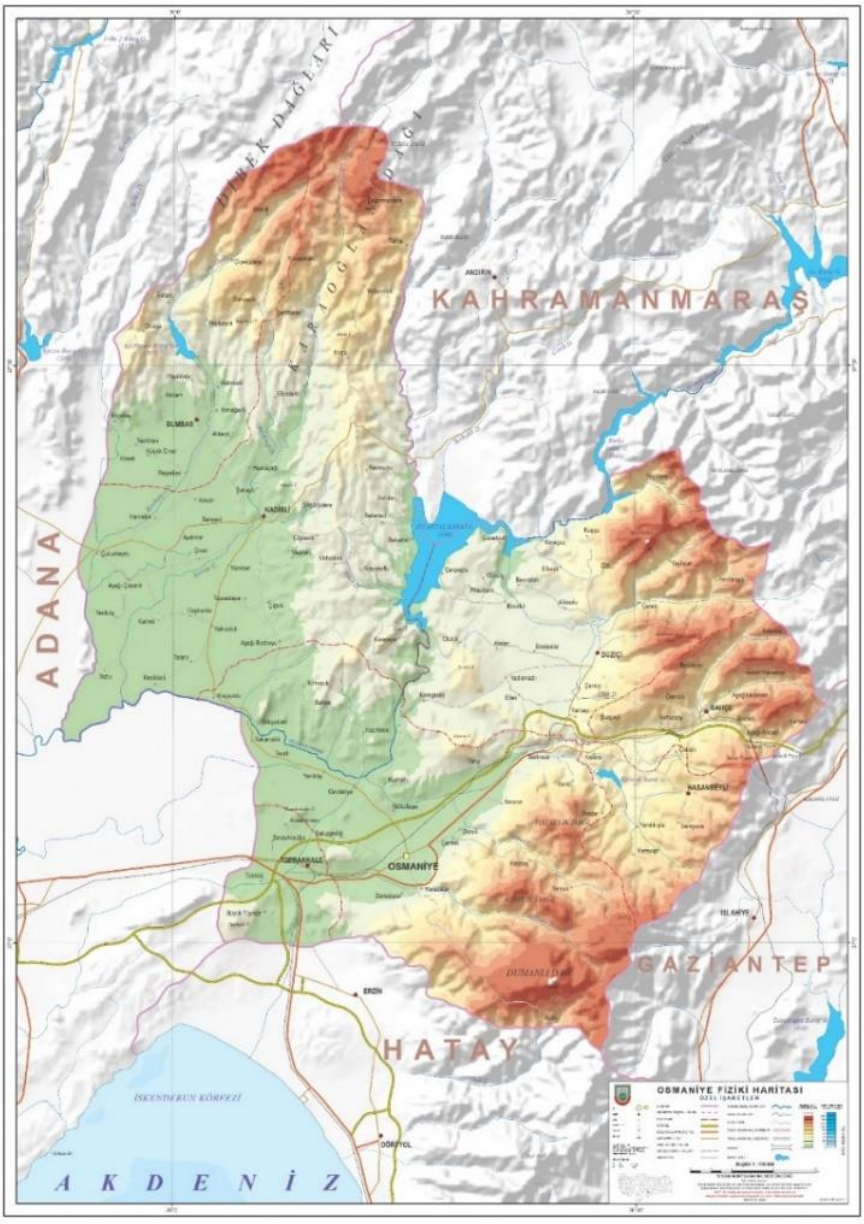
Şekil 1: Osmaniye İlinin konumu

İl 3222 km2 lik yüzölçümüne sahiptir ve rakımı (yüksekliği) ortalama 121 m. dir. Denize olan mesafesi ise 20 km. dir. Osmaniye, doğu ve batı illeri arasındaki ana yollar üzerinde uygun bir konumda olup, Akdeniz Bölgesini bölgelere bağlayan karayollarının geçiş güzergâhındadır (Koç, 2008).

Osmaniye ili kuzey tarafı hariç diğer çevresi dağlık alanlar ile çevrilmiştir (TÜİK Seçilmiş Göstergelerle Osmaniye 2013, 2014), (Şekil 2). Şehrin güney ve doğusu Amanoslar (Nur dağları) ile çevrilidir. Düldül Dağı bu kesimdeki önemli bir yükseltidir (Fotoğraf 1). Osmaniye ilindeki en yüksek yer 2400 m ile Düldül dağıdır (Tıraş ve Besnek, 2017).



Fotoğraf 1. Amanos Dağı'nın zirvesindeki Koyunmeleden Tepesi (Rakım 2108 m), (Tıraş ve Besnek, 2017).



Şekil 2: Osmaniye'nin fiziki haritası (HGM, https://www.harita.gov.tr/)

OSMANİYE İLİNİN YAYLA TURİZMİ POTANSİYELİ

Yayla ve Eko-Turizm Varlıkları Odak Grubuna göre; turizm sektörünün gelişimi acısından yayla ve eko-turizm varlıkları tanımlamıştır. Öncelikli olan ve dikkat edilmesi gereken konular tespit edilmiştir. Bu alanların geliştirilmesini engelleyen faktörler belirlenerek izlenmesi gereken politikalar sıralanmıştır (Tablo 1). Ayrıca farkındalık, tanıtım ve pazarlama stratejisi de geliştirilmiştir (Tablo 2), (URL_5).

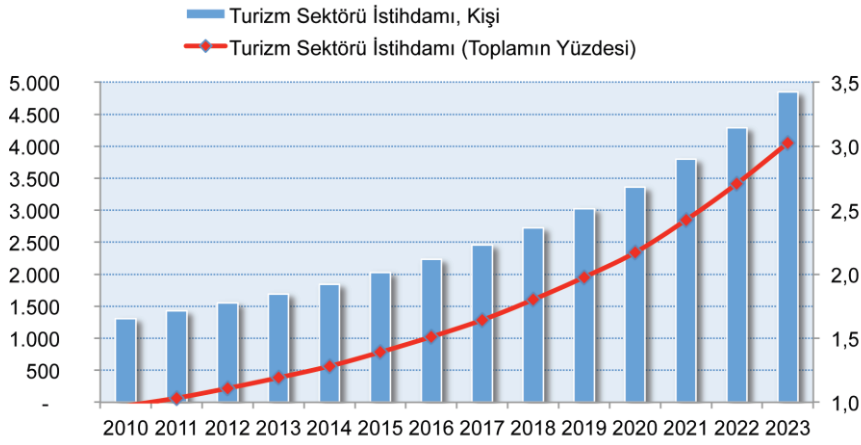
Tablo 1: Yayla ve eko-turizm varlıkları odak grup çıktısı (URL_5).

YAYLA VE EKO TURİZM VARLIKLARI	ÖNCELİK	ENGELLER	POLİTİKLAR
Hasanbeyli-Alman Pınarı-Olukbaşı	1. Yöresel yaylaların tek tek tespit edilerek belirlenmesi	1.Yaylalardaki altyapı yetersizlikleri; elektrik, yol, su, sosyal alan eksikliklerinin olması	1.Uzun vadeli programlar hazırlanmalı, öncelik alanları belirlenerek bu programlar doğrultusunda hareket edilmesi.
Zorkun, Fenk Yaylası, Göğköküz Yaylası, Karıncalı Yaylası,Küllü, Küşne, Üçgöz, Bahrazcık, Ayvanın Düzü, Cebel (Yarpuz), Oruçgazi, Davutlar, Karataş, Haraz, Kanlıkoz, Dörtkoz, Maksutoluğu, Bahçe ilçesi bütün köyleriyle beraber; Kızlaç, Kaman Karderesi, Bekdemir, Dışbudak, İnderesi, Çakıroğlu Meryemçil, Kırksu	2. Organik Tarım alanlarının korunması ve geliştirilmesi 3. İskenderun, Yumurtalık Adana, Gaziantep, Kahramanmaraş'ı içine alan bölgenin tam ortasında yer alan ilimiz yaylaları ve yetiştirdiği organik ürünleri ile bölgemizin hizmetine sunulmalıdır. 4. Örnek yayla evleri yapılmalı. 5. Savranda Kalesi, Kalecik barajı, Buğdacık Göleti, Bahçe, Hasanbeyli, Düziçi ilçeleri arasında birbirini tamamlar bir bölge oluşturulmalı ve yayla turizmine açılmalıdır. Konaklama tesisleri kurulmalı 6. Zorkun Yaylasında yapılan çocuk şenliği geliştirilerek yayla şenliklerine dönüştürülebilir. 7. Yürüyüş parkurları oluşturulmalı, Araba yarışları, Safari turları 4x4 Jiplerle organize edilmeli 8. Dağcılık sporları, yamaç paraşütü (Anavarza Kalesi, Kaypak uygun merkezler) 9. Bölgemizi tanıtan televizyon programları hazırlanmalı, belgesel çekimleri yapılmalı	2. Yayla ve eko turizm bilincinin oluşmamış Olması 3. Mimari açıdan yoksun yapılaşmanın olması 4. Yaylalarda vatandaşlarla Orman Bakanlığı arasındaki davaların çözülmemiş olması 5. Maddi yetersizlikler, yayla evlerinin yapımının teşvik edilmeyişi, organik tarıma yapılan teşviklerin yetersiz olması 6. Tanıtım yetersizliği, pazarlama eksikliklerinin devam etmesi 7. Uzun vadeli programlar hazırlanmamış olması	2. Yayla ve eko turizm bilincinin oluşmasına yönelik Politikalar üretilmeli. 3. Mimari açıdan yoksun yapılaşmanın önlenmesi 4.Yaylalarda vatandaşlarla Orman Bakanlığı arasındaki davaların çözülmesi 5.Maddi yetersizliklerin çözümlenerek yayla evlerinin yapımının teşvik edilmesi, organik tarıma yapılan teşviklerin artırılması 6.Tanıtım faaliyetlerinin artırılması, pazarlama imkânlarının artırılması

Tablo 2: Farkındalık, tanıtım ve pazarlama stratejisi (URL_5).

		SORUMLU KURULUŞLAR	İŞBİRLİĞİ YAP. KURULUŞLAR	TAHMİNİ MALİYET	KAYNAK	SÜRE	AÇIKLAMA
Hedef 4. Yerli ve yabancı vatandaşlara yönelik yayla ve doğa turu paketleri geliştirilecektir.							
4.1.	Yerli ve Yabancı vatandaşlara yönelik yayla ve doğa turu paketleri geliştirilecektir.	İl Kültürve Turizm Md.	Valilik, OTSO,Belediye, ilgili STK'lar	10.000 TL	İl Özel İdaresi	2012	Yerli ve yabancı ziyaretçilere yönelik yayla ve doğa turları geliştirilecek, yurt içindeki ve yurt dışındaki seyahat acentaları ile paylaşılacak, Osmaniye Turizm portalında fotoğraflar eşliğinde sunulacaktır.
4.2.	Başta seyahat acentaları olmak üzere, tur operatörleri geliştirilen yayla ve doğa turu güzergahında Osmaniye'ye davet edilecektir.	İl Kültürve Turizm Md.	Valilik, OTSO,Belediye, ilgili STK'lar	50.000 TL	İl Özel İdaresi	2012	Doğa ve yayla turu üzerine yoğunlaşmış seyahat acenteleri başta olmak üzere, yurt içi ve dışından tur operatörleri geliştirilen Osmaniye Doğa ve Yayla yolu gezisine davet edilecektir.
4.3.	Yayla ve doğa turu güzergahlarında uygun konaklama tesisleri geliştirilecektir.	İl Kültürve Turizm Md.	Valilik, OTSO, Belediye, ilgili STK'lar	250.000 TL	İl Özel İdaresi	2012	Yayla ve doğa turu güzergahında, uygun noktalara, özel sektörün bungalow tarzı konaklama tesisleri yapabilmeleri için arsa tahsis edilecektir.
1.8	İmarlı, alt yapısı ve sosyal alanları yapılmış, bölgenin de yaşam kültürünü yansıtan " Yayla Kent' lerin kurulması sağlanacaktır.	Belediye	İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü	500.000 TL	Belediye	2014	Çukurova bölgesinin yaşam tarzı olan yaylacılık kültürünü devam ettirmek için Yerli ve yabancı ziyaretçilere hizmet edebilecek, İmarlı, alt yapısı ve sosyal alanları yapılmış, bölgenin de yaşam kültürünü yansıtan " Yayla Kent' lerin kurulacaktır.

İl ekonomisi içerisinde turizm sektörünün de giderek ağırlık kazanmasından dolayı işgücü piyasasındaki konumu da gittikçe artacaktır (Şekil 3), (URL_5).



Şekil 3. Osmaniye ili turizm sektörü istihdamı (URL_5).

Ege 2017'de yaptığı çalışmada; Düldül Dağı'nın doğal güzellikleri ve yaylaları ile hazırlamış olduğu turizm haritası ile Osmaniye ilindeki yayla turizmine yönelik farkındalık oluşturmayı amaçlamıştır. Bu çalışma sırasında ele alınan konulardan birisi olan Akdeniz bölgesi iklim koşullarına göre; Akdeniz üzerinden gelen ve bol ok nemli olan hava kütleleri İskenderun Körfezi boyunca doğu tarafına doğru ilerleyişlerini sürdürerek İskenderun ve Osmaniye civarlarında yükselir ve Amanosların batı yamaçlarının bolca yağış almasını sağlar. Bunun sonucu bu bölgede bulunan

yaylalar diğerlerine göre daha fazla yağış alır ve buralarda nemli ortam bitkileri bolca yetişir (Ege, 2016).

Ege 2017'ye göre; Osmanlı Dönemi'nde adı Cebelibereket (Bereket Dağı) olan Osmaniye ili ve Amanos Dağı doğa ve yayla turizmi potansiyeli açısından çok bereketlidir. Dağlarda yapılan turizm etkinlikleri gün geçtikçe daha da artmaktadır. Zorkun Yaylası'na kadar uzanan Yaban Hayatı Geliştirme Sahası, Osmaniye İlinin güney tarafında yer almaktadır ve il merkezine bitişiktir (Şekil 4). Gaziantep-Adana karayoluna (D 400) yaklaşık 3-4 km. mesafededir. Bölgeye ulaşım yolu asfalttır (Rapor 1).



Şekil 4. Zorkun Yaylası yaban hayatı geliştirme sahası sınırları (Rapor 1).

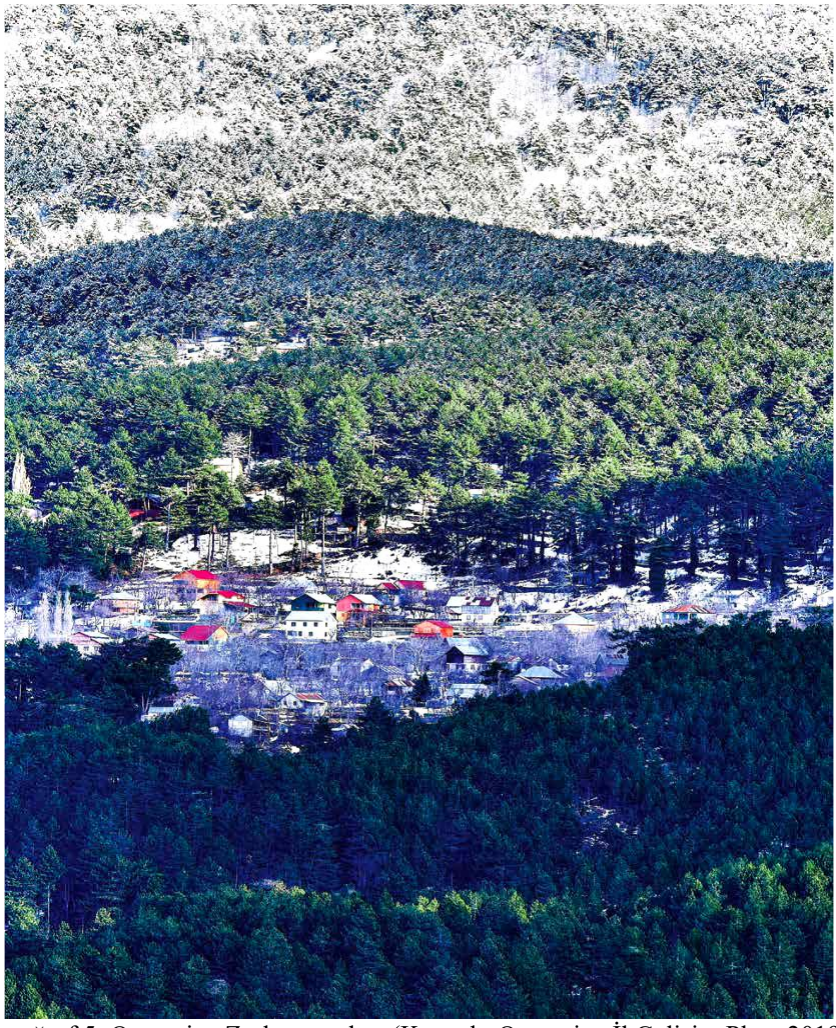
Düldül dağının rakımı 2246 m. dir. Üzerinde bulunan yaylalarda birçok doğa sporu türü için elverişli ortamlar mevcuttur. Bu nedenle Düziçi Belediyesi tarafından yörenin yayla turizmi potansiyelini geliştirebilmek için "Düldül Dağı Doğa ve Kış Sporları Teleferik Tesisi" projesi başlatılmıştır. Projenin bir sonraki aşamasında kayak merkezi yapımı planlanmıştır (İHA, 2022; Düziçi Belediyesi, 2014; Türkseven, 2023). İlde yer alan yaylalar, Anadolu kültürünü yaşatır (URL_3).

Teleferik Tesisi projesi sayesinde bölgenin yayla turizmi potansiyeli daha da görünür hale gelecektir. Düldül Dağı zirvesinden bir görünüm Fotoğraf 4'te verilmektedir (Türkseven, 2023).



Fotoğraf 4: Düldül Dağı zirvesi **(**Kaynak**:** Türkseven, 2023)

Amanos Dağları'ndaki yaylalarda yamaç paraşütü yapılabilmesi için gerekli altyapı özellikleri mevcuttur. Bölgedeki yaylalarda farklı yönlere esen hava akımlarına göre yamaç paraşütü yapılabilmektedir. Özellikle Zorkun Yaylasının Şenliktepe mevkiinde (Fotoğraf 5) ve Düldül Dağında uygun yaylalarında uçuşlar yapılabilmektedir. Yarpuz, Zorkun ve Mitisin gibi yayla yolları son derece bakımlı ve asfaltlanmıştır. Acil durumlarda helikopterle ulaşımı kolay olan geniş ve düz alanlar mevcuttur (Doğaka Bülten, 2021).



Fotoğraf 5: Osmaniye Zorkun yaylası (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Zorkun, Cebel Yaylaları ve Keldaz Zirvesi ormanlık ve dağlıktır. Hemen hemen her mevsimde doğa yürüyüşü, dağ bisikleti, off road ve motokros gibi doğa sporlarını yapmaya çok elverişlidir. Bölgede doğa fotoğrafçılığı yapmak için çok sayıda eşsiz manzaralar da bulunmaktadır. Yürüyüş rotalarının bulunduğu Zorkun Yaylası etrafındaki dağlarda her türlü doğa sporu yapmak mümkündür (Doğaka Bülten, 2021). Merkeze bağlı Çona köyü üst kısmında bulunan eski bir sancak olan ve Cebeli Bereket şeklinde bilinen şimdiki adıyla Cebel Yaylası'na kadar uzanan vadide, yükseklikleri 7 m. den 25 m. ye kadar olabilen 6 adet şelale de bulunmaktadır (Doğaka Bülten, 2021). Özellikle sonbahar ayları başta olmak üzere yılın her mevsiminde çok sayıda doğa yürüyüşü ve fotoğraf sanatçısı

Dumanlı Yaylasına gelmektedir. Kolay–orta ve zor şeklinde değişik parkurların bulunduğu yaylada hemen hemen her mevsim değişik faaliyetler de düzenlenmektedir (Fotoğraf 6).



Fotoğraf 6: Osmaniye Dumanlı yaylası (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Ayrıca yaylalarda yöreye özgü çok çeşitli kelebek türleri bulunduğundan kelebek gözlemine uygun alanlar da vardır. Özellikle Toklu Yaylasındaki kayın ağacı ormanlarını gezmek için her yıl başta sonbahar ayları olmak üzere yılın her mevsiminde binlerce doğasever gelmektedir. İlin 2264 m. yüksekliğindeki Düldül Dağı'nın olduğu bölge Başkonuş Yaylası zirvenin kuzeyinde kalmaktadır. Bu yaylada doğa yürüyüşü için uygun parkurlar vardır (Fotoğraf 7).

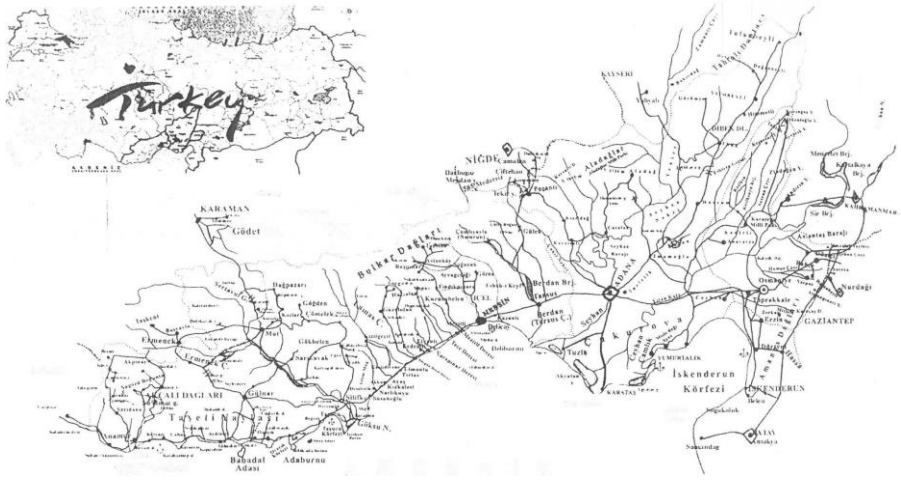


Fotoğraf 7: Bahçe ilçesi yukarı Karadere köyü (Kaynak: Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr)

Zorkun, Olukbaşı ve Ürün Yaylaları

Osmaniye'nin güneydoğusunda bulunan bu yaylalar, Zorkun yaylasının yolu üzerine kurulmuştur (Şekil 9). Yolun üzerinde Ürün yaylası bulunur. Olukbaşı yaylasından Osmaniye şehir merkezi görülebilmektedir. Olukbaşı yaylası, çam ağaçları arasında, tamamen ahşap yayla evlerinden oluşmaktadır. Zorkun yaylası ise çok büyüktür. Yaylada, ahşap evlerin yanında çok değişik tarzda yapılmış olan villa ve diğer betonarme evler de vardır. Yaz aylarında Zorkun ve yakın diğer yaylalarda toplam nüfus 250.000 civarında olmaktadır. Ulaşım özel araçlarla ve dolmuş taksilerle sağlanmaktadır (Fotoğraf 8), (URL_1). Zorkun yaylası; Çukurova bölgesindeki en eski yaylalarından biridir. Osmaniye'deki yaz aylarında bunaltan sıcaklardan kaçmak için ideal bir yerdir (URL_2). Yayla 1650

metre yükseklikte olup yaz mevsimlerinde nüfusu 80 bine ulaşmaktadır. Zorkun Yaylası'nda, konaklama için herhangi bir tesis olmamasına rağmen günlük kamp alanları ve sosyal tesisleri vardır (URL_3). Osmaniye il merkezinden Zorkun Yaylasına minibüs ve taksiciler yolcu taşımacılığı yapmaktadır. Bu arada geleneksel olarak her yıl düzenlenen Zorkun Yaylası Çocuk Şenlikleri yaylayı sosyal ve ekonomik açıdan canlandırır ve geliştirir (URL_4 ve URL_5). Osmaniye ve çevresi için yayla yolu haritası Şekil 9'da verilmiştir (URL_6).



Şekil 9. Osmaniye ve çevresi için yayla yolu haritası (URL_6).



Fotoğraf 8: Zorkun ve yakın çevresindeki diğer yaylalardan görünüm (URL_1_2_3_4_5).

Sumbas İlçesi Bağdaş Yaylası

Sumbas ilçesindeki Bağdaş yaylasına orman içerisinden geçen 57 km.'lik bir yolla ulaşılabilir. Yaylanın çevresi ormanlarla kaplıdır. Yaylada yöreye uygun ahşap ve taştan yapılmış yayla evleri vardır (Fotoğraf 9). Yaylada kamp kurma ve piknik yapma alanları mevcuttur (URL_1).



Fotoğraf 9: Bağdaş yaylası (URL_1).

Hasanbeyli İlçesi Almanpınarı Yaylası

Hasanbeyli ilçe merkezinden 4 km. lik bir asfalt yolla yaylaya ulaşılmaktadır. Alman Pınarı yaylası üzüm bağları ve meyve bahçeleri arasında kurulmuştur (Fotoğraf 10). Yaylada kamp kurup piknik yapılabilmektedir (URL_1).



Fotoğraf 10: Alman Pınarı yaylası (URL_1).

Kadirli İlçesi Maksutoğlu Yaylası

Kadirli'nin 45 km. kuzeyindedir. Kahramanmaraş karayolunun 12. km.'sinden kuzeye dönüldükten sonra 33 km.'lik stabilize bir yolla ulaşılır. Kamp kurma ve piknik yapma alanları mevcuttur. Yaylada ev kiralanabilir veya çadırlı kamp kurulabilir (URL_1).

Kadirli İlçesi Akarca yaylası,

Yaylanın altyapısı kısmen tamamlanmış olup; temel ihtiyaçların yanında özel doktorlar da hizmet vermektedir. Yaylanın çevresi ormanlarla çevrilidir. Yaylada yöresel ahşap evler ve betonarme binalar mevcuttur (URL_1). Kadirli ilçesine 13 km uzaktadır (Koday, 1999). Yayla Toros Dağları eteklerinde yer almakta ve yeni oluşum safhasındadır (URL_4).

Kadirli İlçesi Beyoğlu, Savrungözü, Dokurcun ve Çığşar Yaylaları,

Dibek Dağlarının eteklerinde yer alan ve 65 km stabilize bir yolla ulaşılabilen yaylalar, tamamen ormanlarla çevrilidir (URL_1). Savrun çayı kenarında yer alan yaylalarda çeşitli meyve ağaçları yetişmektedir. Yaylalarda, kayalara tırmanılabilir ve doğa sporları yapılabilir. Ulaşım özel araçlarla ve minibüslerle sağlanabilir (URL_1).

Kadirli İlçesi Almacık Yaylası,

Bir tepe yamacına kurulmuş ve ormanlarla çevrilmiş bir yayladır. Yaylaya minibüs gidilebilir (URL_1).

Mitisin Yaylası

Mitisin Yaylası, Zorkun Yaylasının kuzey kısmında olup yaklaşık 2 km uzağındadır (Fotoğraf 11). İçerisinde bulunan eski Mitisin Kalesi bu yaylanın tarihinin oldukça geriye gittiğini göstermektedir. Yaylada toplam 300 civarında ev vardır. İçme ve sulama suyu mevcut olup aynı zamanda çok sayıda meyve bahçesi vardır. En çok kiraz ve çilek yetişmektedir (URL_2).



Fotoğraf 11: Mitisin Yaylası (URL_2).

MATERYAL VE METOD

Bir durumun veya varlığın rakiplerine kıyaslandığında nasıl bir durumda olduğunu değerlendiren yönteme SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analizi yöntemi denir. Bu yöntemde güçlü-zayıf yönler ile fırsat-tehditler sıralanır ve bir iş geliştirme aracı olarak kullanılır. Bu yöntemle, bir varlığın durumu rakiplerine göre daha fazla veya daha eksik olup olmadığı değerlendirilmiş olur (Türkseven; 2023). Çalışmada yapılan SWOT analizi ile Osmaniye ilindeki yayla turizmi potansiyeline etkisi eden veya edebilecek güçlü-zayıf yönler ile fırsat-tehditler belirlenmiştir (Tokat, 2023).

BULGULAR

Osmaniye ilinin yayla turizmi açısından SWOT analizi sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur (Doğaka Bülten, 2021; Tokat, 2023):

Güçlü yönler

- Kışların ılıman geçmesinin yayla turizmi için çok uygun olması.
- Bu alanda tecrübesi olan yeteri kadar personelin bulunması.
- Yaylalarda yapılabilecek doğa sporları için uygun altyapının olması,
- Karar almada ve uygulamada karar vericilerin hızlı hareket edebilmesi.
- İlin özel konumundan dolayı doğu ve batı bölgelerine ulaşım kolaylığı sağlaması,
- Yayla turizmi için genel olarak altyapının hazır durumda olması.
- Yaylalara ulaşımının kolay olması,
- Yaylalardaki akarsular, göller, şelale ve orman vb. doğal kaynakların turizm amaçlı kullanılabilmesinin mümkün olması,
- Halkın yayla turizmi konusuna yatkın olması ve bu konuya yoğun ilgisinin bulunması,
- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesinde turizm işletmeciliği, gastronomi, tercümanlık, rekreasyon gibi bölümler ile Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulunun ilgili bölümlerinin kurulmuş olması,
- İlin çevresindeki Adana, Gaziantep ve Kahramanmaraş gibi büyük şehirlere komşu ve yakın olması,

Zayıf yönler

- Yayla turizmi konusunda uzmanlaşmış teknik personelin yetersiz olması,
- İlin 1. derece deprem bölgesinde yer alması ve 6 Şubat depremlerinden etkilenmiş olması,
- Yayla yol ağının bazı bölümünde genişletme ve modernizasyon ihtiyacının olması,
- Yayla turizmi konusunda teorik eğitim ve tanıtım seminerlerinin verilebileceği yerlerin olmaması.
- En yakın havaalanının Mersin Bölgesel Havalimanı olması,
- İlin daha önceki yıllarda turizm ve tanıtım konudaki başarılı faaliyetlerinin devam ettirilememesi,
- Yaylaların yenilenme, yeniden tasarlanması ve çevre düzenlenmelerindeki eksiklikleri,
- Yayla turizmini geliştirme konusunda nitelikli işgücü sorunu,
- Yaylalara ilişkin tanıtım araçlarındaki yetersizlik; yol tabelaları, broşürler gibi.

- Yaylaların dağınıklığı ve küçük, verimsiz, içe kapalı yönetim modellerinin olması,
- Turizme yönelik varlıkların tam olarak tanıtılamaması,
- Yaylaların daha fazla geliştirilmesi ve ekonomiye de kazandırılmasında yaşanan zorluklar,
- Yaylaların profesyonel bir turizm ürünü sunumuna ilişkin eksiklikler,
- Yaylalarda Türkçe ve İngilizce olarak değişik dillerde hazırlanmış, yaylanın tarihini, doğa güzelliklerini ve önemini vurgulayan tanıtıcı materyallerin olmaması,

Fırsatlar

- Yayla turizminin geliştirilmesi konusunda çeşitli faaliyetlerinin yapılıyor olması,
- Yerli ve yabancı turistlere yönelik yayla turizmi konusundaki politikaların artması.
- Yaylaların yıl boyunca mevsim şartlarına göre kullanılabilecek olması,
- Son zamanlarda doğa turizmi konusundaki önemli artış.
- İlin yayla turizmi açısından çok uygun coğrafi ve topografik koşullara sahip olması,
- Yaylalarda çeşitli doğal, tarihi ve kültürel güzelliklere ve zengin yaban hayatına sahip olunması,
- Devletin yayla turizmi konusuna yönelik destekleyici politikalarının ve uygulamalarının artması.
- Yayla turizmine ilginin dünya genelinde artmış olması,
- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesinde ön lisans, lisans, yüksek lisans gibi çeşitli düzeylerde yayla turizmi konusunda derslerin veriliyor olması ve bu konuda akademik çalışmaların da yapılıyor olması,

Tehditler

- Yaylalar ve çevresindeki toprak, hava, su gibi doğal kaynakların gün geçtikçe kirlenmesi,
- İlin büyükşehirlere oldukça uzak olması,
- Özelikle 6 Şubat depremlerinden sonra bölgeye olan turist ilgisinin azalması,
- Turistler için konaklama imkânlarının yeterli olmaması.
- İlin Adana, Gaziantep ve Kahramanmaraş gibi büyükşehirlere yakın ve komşu olmasından kaynaklı cazibesinin nispeten az olması,
- Bu alanda yeterli düzeyde tanıtımın yapılamaması,
- İldeki yayla turizmine yönelik altyapının oldukça düşük olması,

- Osmaniye İli kalkınma bölgesinde olmasına kaşın yerel halkın yayla turizmine yönlendirilmesi ile sürdürülebilir programların olmaması.
- 6 Şubat depremlerinden sonra ildeki nüfusun ve memurların bir kısmının başka illere göç etmesi,
- İldeki ormanlık alanların bazı bölgelerinde tarım ve hayvancılık faaliyetleri gibi amaç dışı kullanımların olması,

SONUÇ ve ÖNERİLER

Osmaniye İli yaylaları, sahip olduğu doğal güzellikleri, çok sayıda bitki ve hayvan çeşitliliği ile zengin bir ekosisteme sahiptir. Dağlık ve ormanlık alanların çok olması da ilin yayla turizmi yönünden önemli bir potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca mevsim koşullarının yıl boyunca farklı doğa sporlarının yapılabilmesine imkân vermesi ildeki bu yayla kültürü ve turizminin artmasına katkı sağlayabilecektir.

Türkiye Turizm Stratejisi 2023 Eylem Planı'nda belirtilen konular (KTB, 2007), Osmaniye İl'indeki yayla turizminin geliştirilmesi için uyarlandığında yapılması gerekenler (Tekin, 2016):

- Osmaniye İl'inde küçük büyük yaklaşık 19 tane yayla vardır. Bölgenin en büyük yaylası olan başta Zorkun Yaylası olmak üzere, bütün yaylaların, yayla turizmi için değerlendirilmesi il turizmine de çok büyük katkısı olacaktır. Bu bağlamda Osmaniye İl'indeki bütün yaylalar yayla turizmi kapsamında değerlendirilmesi gerekir.
- Osmaniye yaylalarındaki halka hediyelik eşya yapımı ve kaliteli hizmet servisi konularında eğitim verilmesi gerekir.
- Osmaniye yaylalarının ekolojik ve arkeolojik varlıklarının sergilenebileceği müzeler açılmalıdır.
- Osmaniye yayla kültürünü korumak ve geliştirmek amacıyla tarihi ve yöresel özelliği olan yerleşim alanları oluşturulmalıdır.
- Yayla alanlarına girişlerde danışma noktaları oluşturulmalı ve ziyaretçilere güzergâhlar, dinlenme noktaları, yürüyüş rotalarını gösteren dijital haritalar sunulmalıdır. Ayrıca, yönlendirme ve bilgilendirme levhaları konulmalı, görselliği ve kullanılırlığı arttırılmalıdır.
- Yaylalardaki yürüyüş rotaları ve önemli yapısal yerler sayısal haritalara tanıtılmalıdır.

- Osmaniye yaylalarının turistik değerlerini tanıtan bilgilendirme kitapçıkları ve ayrıntılı sayısal bölge haritaları hazırlanmalı ve broşürler bastırılmalıdır.
- Osmaniye'de yayla turizminin geliştirilmesi için yollar düzeltilmeli, yaylaların sağlık, güvenlik altyapısı sorunları çözülmelidir.
- Elektronik ortamdaki tanıtım, pazarlama ve ticaret gibi yayla turizmini etkileyen teknolojilere önem verilmelidir. Bölge odaklı elektronik tanıtım ve pazarlama faaliyetleri yapılmalıdır.
- Osmaniye yaylalarının tanıtımı ve turizme kazandırılması için devlet kurumları, özel sektör ve sivil toplum kuruluşları desteklenmeli, hep birlikte iş birliği içinde hareket edilmesi için fon sağlanmalı, teşvik ve kredilerde kolaylıklar geliştirilmelidir.
- Osmaniye yaylalarının tanıtımı ve turizme kazandırılması için turist rehberlerine eğitim vermekte olan Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi ve diğer meslek kuruluşları ile iş birliği yapılmalıdır.
- Her ne kadar Osmaniye ili kaleler şehri olarak anılsa da yöredeki yaylaların da turizme kazandırılması önem arz etmektedir. Her iki tarihi ve kültürel zenginlik bir arada turizme kazandırılabilir.
- İl, yayla turizmi için zengin bir coğrafyaya sahiptir ancak bu doğal varlıklar yeterince geliştirilmemiştir. Yaylalar, göl ve şelalelerden oluşan doğa turizmi varlıkları genellikle iç turizm yöneliktir. Ancak altyapı, tesis ve ulaşım gibi unsurları geliştirilmesi ile dış turizme de kazandırılabilmeleri mümkündür.
- Bölgeye ait yöresel el sanatlarından birisi olan ve ülke çapında üne kavuşan Karatepe Kilim dokumacılığı uluslararası boyuta taşınmalıdır. Böyle bir faaliyet yayla turizmini dolaylı da olsa olumlu derecede etkileyecektir.

REFERANSLAR

Sahin, S., Ocak, M.A., ve Uluyol, C. (2009). *A systematic evaluation of preservice teachers' opinions on learning objects.* International Journal of Human Sciences, 6(2), 723-736.

Doğaka Bülten, T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, 3 aylık dergi, Mart 2021, sayı 24, TR63 bölgesi, Hatay-Kahramanmaraş-Osmaniye.

Düziçi Belediyesi (2014, 19 Mayıs). Düziçi Düldül Dağı teleferik tesisi fizibilite çalışması nihai raporu (Proje No: TR63/13/DFD/0025). https://www.dogaka.gov.tr/dokuman-merkezi/arastirma-ve-planlama/duzici-duldul-dagi-teleferik-tesisi-fizibilite-calismasi/

Ege, İ. (2017). *Düldül Dağı'nın doğal ortam özellikleri ve turizm potansiyeli (kuzey Amanoslar), Düziçi/Osmaniye*. Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi/UUSBD, 10(4), 586-617.

Ege, İ., (2016). Akdeniz Bölgesi Yirce Platosu'nda (Bağdaş/Kadirli/Osmaniye) Kayın Ormanı, Studies of the Ottoman Domain (Osmanlı Hakimiyet Sahası Çalışmaları) Cilt: 6 Sayı: 11

Ege. İ. ve Geçen, R., (2008). *Determination of Optimum Areas For Camping at Crest Zones of East Part of Bolkar Mountains, Using GIS*. 5. International Conferance on Geographic Information Systems Sempozyum, 1

İHA, (İhlas Haber Ajansı). (2022). Vali Yılmaz: "Düldül Dağı'na yapılan teleferik 1 ay sonra yolcu taşımaya başlayacak" https://www.iha.com.tr/osmaniye-haberleri/-3842266

Karadeniz, E., Güdük, T. (2020). Mersin ili spor turizmi potansiyelinin SWOT analiziyle değerlendirilmesi. Journal of Tourism Theory and Research, 6(2), 115-129. https://doi.org/10.24288/jttr.696503

Koç, E. (2008). *Osmaniye'nin Sosyo-Ekonomik ve Kültürel Yapısı*, Osmaniye Valiliği, İl Özel İdaresi, ISBN: 978-9944-0426, Osmaniye.

Koday, Zeki (1999). "Akarca Yaylası". Türk Coğrafya Dergisi. 15 Ocak 2017 tarihinde kaynağından arşivlendi. Erişim tarihi: 5 Aralık 2016.

KTB (2007). Türkiye Turizm Stratejisi (2023), Kültür ve Turizm Bakanlığı Ankara, 2007

OİKTM (Osmaniye İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü) http://www.osmaniyekulturturizm.gov.tr (Erişim: 14/01/2025).

Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr

Osmaniye İl Gelişim Planı 2019 | 2023, Osmaniye Valiliği, www.osmaniye.gov.tr

Rapor 1: Osmaniye Valiliği, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, Osmaniye İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu, Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, ÇED ve Çevre İzinleri Şube Müdürlüğü, Osmaniye – 2022.

Tekin, Ö. F. (2016). Alternatif Bir Turizm Türü Olarak Yayla Turizmi ve Bozkır İlçesinin Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Selçuk Üniversitesi, Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Yayınları: 9, Uluslararası Sempozyum: Geçmişten Günümüze Bozkır (06-08 Mayıs 2016), Bildiri Kitabı, Konya

Tıraş, M. ve Besnek, F., (2017). Osmaniye İli'nin Turizm Potansiyeli, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Haziran 2017 21(2): 757-777

Tokat, F. (2023). Erzincan İlinin Doğa Sporları Potansiyeli: Swot Analizi, Anatolia Sport Research, 4(3): 1-7.

Türkseven, Y. Ç. (2023). Düldül Dağı'nın (Osmaniye/Düziçi) alternatif turizm potansiyeli üzerine nitel bir araştırma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 62, 74-95

URL_1: http://www.osmaniye.gov.tr/osmaniye-yayla-turizmi, (Erişim Tarihi: 07.08.2025).

URL_2: http://zorkunyaylasi.blogspot.com/p/zorkun-yaylasi-zorkun-cukurova.html, (Erişim Tarihi: 10.08.2025).

URL_3: https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/osmaniye/gezilecekyer/zorkun-yaylasi, (Erişim Tarihi: 12.08.2025).

URL_4: https://tr.wikipedia.org/wiki/Akarca_Yaylas%C4%B1, (Erişim Tarihi: 10.08.2025).

URL_5: Osmaniye İl Turizm Stratejisi ve Eylem Planı, www-dogaka-gov-tr-447-co8p11xx-osmaniye-ili-turizm-stratejisi-ve-eylem-plani

URL_6: Osmaniye, Adana ve İçel Yaylaları İle Genel Vejetatif Yapıları, 2001, İçel, https://www.researchgate.net/profile/Ayse-Everest/publication/312196545_OSMANIYE_ADANA_ve_ICEL_YAYLALARI_ile_GENEL_VEJET_A_TIF_YAPILARI_The_Highplateaus_of_Osmaniye_Adana_Icel_and_the_Structure_of_General_Vegetation/links/5875d04d08ae329d6220c154/OSMANIYE-ADANA-ve-ICEL-YAYLALARI-ile-GENEL-VEJET-A-TIF-YAPILARI-The-Highplateaus-of-Osmaniye-Adana-Icel-and-the-Structure-of-General-Vegetation.pdf

Yıldırım, O. (2014). Ankara'daki Özel Spor Merkezlerine Devam Eden Bireylerin Spor Ekonomisine Katkısı. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Zorba, E., Micoogullari, B. O., Zorba, E., & Tekin, A. (2004). Sports tourism in Turkey. Journal of Sport & Tourism, 9(4), 325-329.

Girit Adası ve Civarının Jeofizik (Depremsellik ve Manyetik) Durumu

Sercan KAYIN[1]
M. Nuri DOLMAZ [2]

1- Dr. Öğr. Üyesi; Gümüşhane Üniversitesi Gümüşhane Meslek Yüksekokulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü sercankayin@gumushane.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2279-0579
2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. nuridolmaz@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9185-9835

ÖZET

Bu çalışma, Afrika ve Avrasya levhaları arasındaki karmaşık yakınsak sınırda yer alan Girit Adası ve çevresindeki bölgenin yeraltı yapısını ve tektonik çerçevesini araştırmak için manyetik anomalilerin analizi ile depremsellik verilerinin bütünleşik yorumunu sunmaktadır. Ege mikro levhası ve Helen Yayı üzerinde konumlanan Girit, yoğun kabuk deformasyonu, aktif dalma-batma süreçleri ve dikkate değer sismik aktivite ile karakterize jeodinamik olarak aktif bir segmenti temsil etmektedir. Bölge ayrıca hızlı ön yay göçü ve bir yığışım prizmasının varlığıyla şekillenmiştir. Bölgenin tektonik yapılarını yorumlamak amacıyla EMAG2-v3 veri setinden elde edilen aeromanyetik anomali verilerine kutup indirgeme (RTP), birinci düşey türev (FVD) ve analitik sinyal (AS) teknikleri uygulanmıştır. Birinci düşey türev yönteminden elde edilen veriler sığ manyetik kaynakları vurgularken, Analitik Sinyal tekniği yapısal sınırları belirlemek ve manyetik temel derinliklerini hesaplamak için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, adanın çarpışma bölgesi ile kuzey ve güney kesimlerinde yoğunlaşan ve muhtemelen volkanik aktivite ve levha yakınsamasının neden olduğu deformasyonla bağlantılı güçlü manyetize kabuk gövdeleriyle ilişkili önemli manyetik anomalileri ortaya koymaktadır. Analitik Sinyal tekniğinden elde edilen manyetik temel derinlikleri irdelendiğinde, manyetik temelin belirli bölgelerde 18,9 km'ye kadar ulaştığını göstermektedir. 1976-2025 yılları arasındaki sismik aktivite verileri irdelendiğinde ise, Kıbrıs-Helen dalma zonu boyunca yoğun deprem aktivitesi gözlenmekte olup, bunun yorumlanan manyetik yapılarla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu bütünleşik yorum, bölgenin jeodinamik evrimi ve yapısal karmaşıklığı hakkında fikir vermektedir.

Anahtar Kelimeler – Girit Adası, Manyetik Anomali, Deprem Dağılımı, Ege Levhası, Derinlik Tahmini.

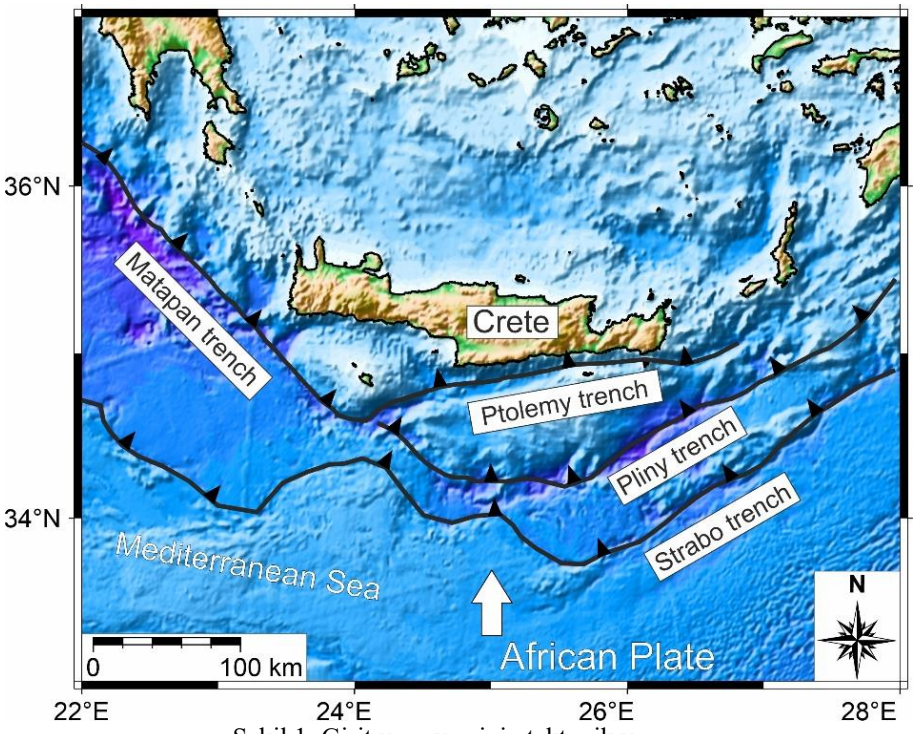
GİRİŞ

Girit Adası, dalan Afrika Levhası ile üstteki Ege mikro levhası arasındaki sınırı belirleyen tektonik olarak aktif bir bölge olan Helenik Yay içinde merkezi bir konuma sahiptir. Afrika Levhası şu anda yılda yaklaşık 4 cm hızla Ege Levhası'na doğru yaklaşmakta (Hollenstein vd., 2008), Helenik hendeği boyunca dalma hareketi yaparak hem sığ hem de orta derinlikte sismik aktiviteye neden olmaktadır. Çalışma alanı civarında tarihsel ve aletsel olarak çok sayıda önemli depremler kaydedilmiş olup, bu durum hem bilimsel bilgi hem de sismik tehlike değerlendirmesi için detaylı sismik ve tektonik araştırmaların önemini vurgulamaktadır.

Girit Adası ve çevresindeki bölge, Afrika ve Avrasya tektonik levhaları arasındaki devam eden yakınlaşmanın şekillendirdiği jeodinamik

olarak karmaşık bir bölge içinde yer almaktadır (Şekil 1). Bu alan, şu anda Helenik Yayı boyunca altındaki Afrika Levhası'nın dalması nedeniyle güneybatıya doğru hareket eden Ege mikro levhasının bir parçasını oluşturmaktadır. Helenik dalma batma zonu, Avrupa'nın sismik açıdan en aktif bölgelerinden biri olarak kabul edilmekte olup, sıklıkla çeşitli büyüklüklerde depremler üretmektedir (McKenzie, 1978; Le Pichon ve Angelier, 1979; Shaw ve Jackson, 2010).

Bölgedeki deprem dağılımı, güneydeki Helenik hendeği ve Girit adasını kat eden fayları da dahil olmak üzere başlıca tektonik özelliklerle mekansal olarak ilişkilidir. KOERI ve Global CMT Projesi (Dziewonski vd., 1981; Ekström vd., 2012) gibi kaynaklardan elde edilen deprem katalogları ve moment tensör verileri, sismik aktivitenin tekdüze olmadığını, bunun yerine gelişmiş litosferik deformasyon bölgelerinde kümelendiğini göstermektedir (Şekil 2, 3).

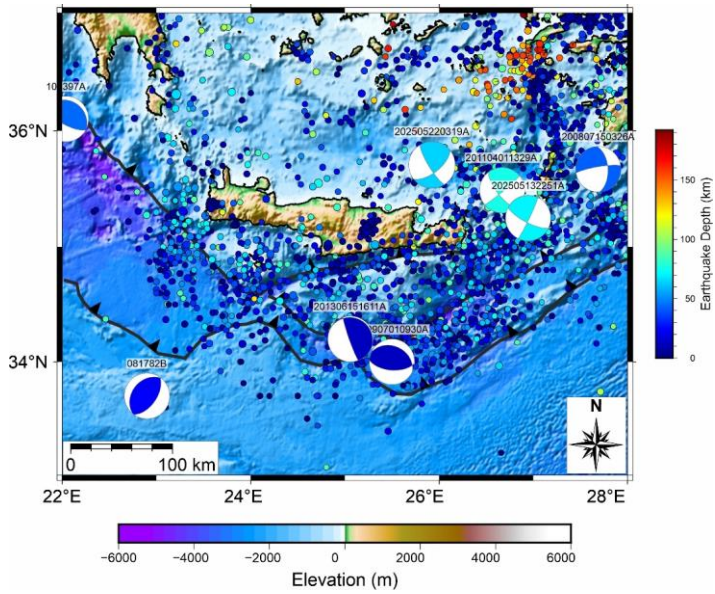


Şekil 1: Girit ve çevresinin tektonik yapısı

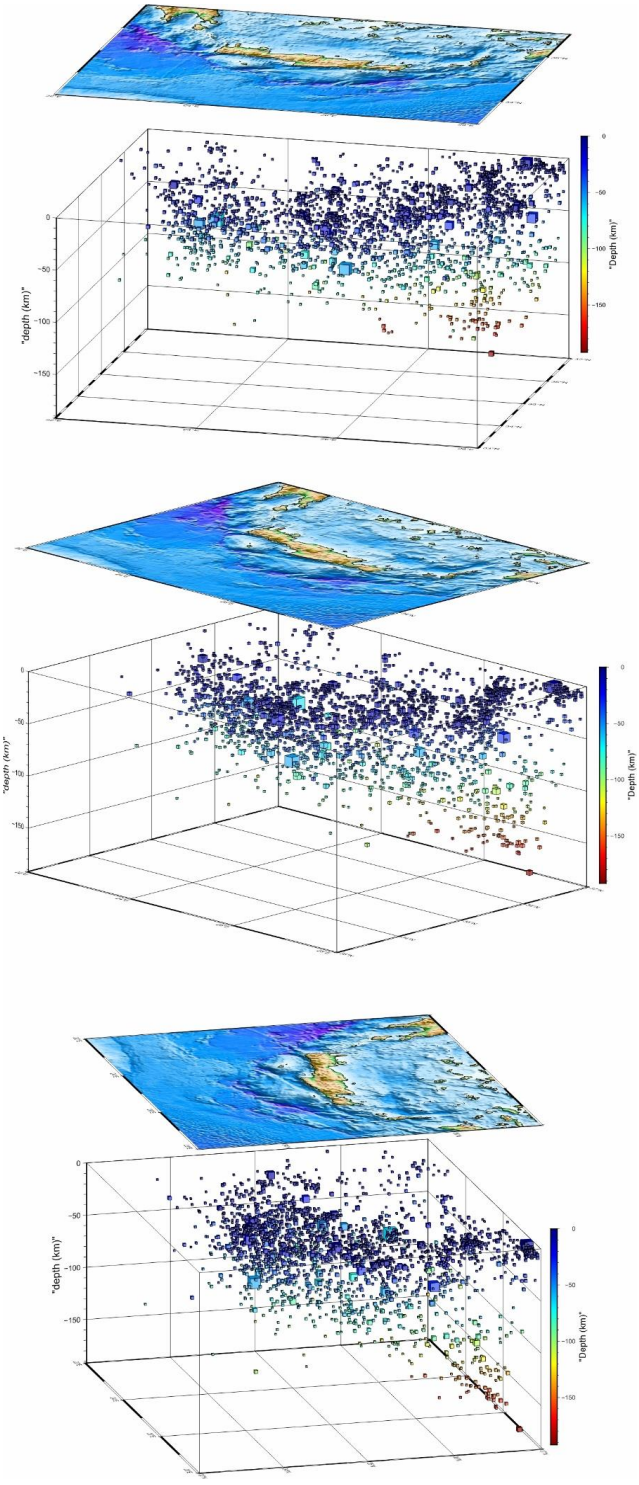
Ege bölgesinde daha önce yapılan jeofizik ve jeodinamik çalışmalar, levha geri çekilmesi, üstteki levhadaki genişlemeli tektonikler ve kabuk deformasyonu gibi depremlerin mekansal ve zamansal dağılımını etkileyen temel süreçleri vurgulamıştır. Bu tektonik mekanizmalar, değişken fiziksel ve manyetik özelliklerle karakterize edilen heterojen bir kabuk yapısının gelişmesine yol açmıştır.

GİRİT VE ÇEVRESİNİN SİSMİK AKTİVİTESİ

Kullanılan deprem kataloğu, 1976 ile 2025 yılları arasında Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (KOERI) ve Global CMT veri tabanından derlenen, büyüklüğü 4,0'dan büyük tüm depremleri içermektedir. Büyük depremlerin odak mekanizması çözümleri (M > 6,0) incelendiğinde (Şekil 2), dalma batma yakınında ters fayların baskın olduğu bir mekanizma ve kuzeyde bulunan levha üzerinde ise doğrultu atımlı veya normal faylanmaların baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 2, deprem episantrlarının ve odak mekanizmalarının mekansal dağılımını göstermektedir. Girit'in güney kenarı ve Helenik hendeği boyunca, devam eden Afrika levhasının dalması ile tutarlı olarak yoğun bir deprem kümelenmesi gözlenmektedir. Girit Adası'nın hemen güneyinden kuzeyine doğru artan deprem derinlikleri (70-150 km), kuzeye doğru uzanan eğimli bir dalan levhanın varlığını düşündürmektedir (örn., Dolmaz vd., 2005; Kalyoncuoglu vd., 2011; Erbek ve Dolmaz, 2019; Şahin vd., 2019; Şahin ve Parlak, 2022). Bu sismik özellikler, bilinen tektonik alanlarla uyumludur ve muhtemelen yüksek gerilim ve kabuk heterojenliği bölgelerine karşılık gelmektedir.

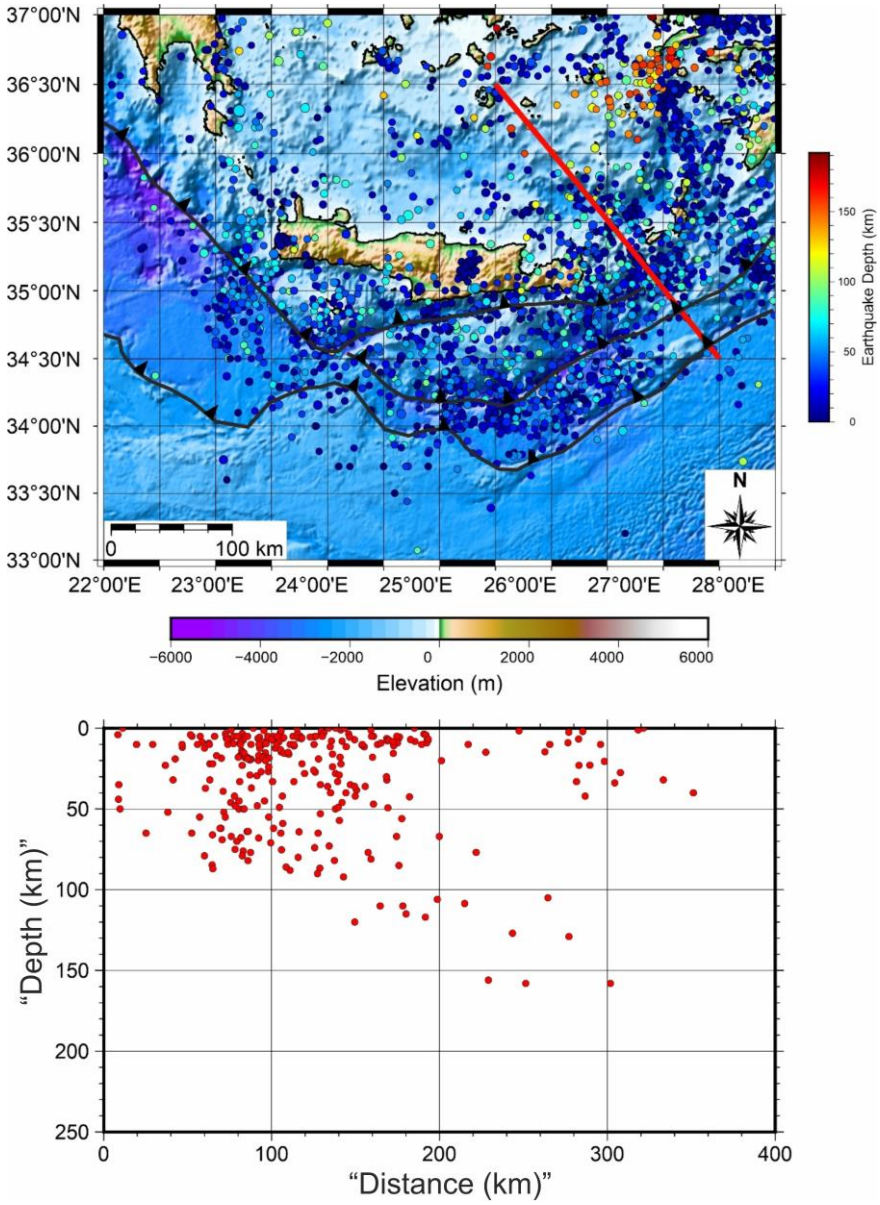


Şekil 2: Girit ve çevresinin depremselliği (Episantr verileri, 1976-2025 yılları arasında M>4,0 depremler Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'nden (KRDAE) alınmıştır. Odak mekanizması çözümleri ise 1976-2025 yılları arasında M>6,0 depremler "Global Centroid Moment Tensor, GCMT Catalog"dan alınmıştır (Dziewonski vd., 1981; Ekström vd., 2012)). Haritalar, "Generic Mapping Tools" yazılımı (GMT), sürüm 6.0.0 (Wessel vd., 2019) kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3: Bölgedeki deprem derinliklerinin farklı açılardan 3 boyutlu blok diyagramı

Girit Adası'nın güneydoğusundan kuzeybatısına doğru meydana gelen depremler derinliklerine göre çizdirildiğinde, Kıbrıs-Helen yayı boyunca Avrasya levhası altına Afrika levhasının dalan litosfer parçası görülebilmektedir (Şekil 4). Buradan dalan litosfer parçasında yaklaşık 160 km derinliklerine kadar depremler meydana geldiği de izlenebilmektedir (örn., Dolmaz vd., 2005; Kalyoncuoglu vd., 2011; Erbek ve Dolmaz, 2019; Şahin vd., 2019; Şahin ve Parlak, 2022).



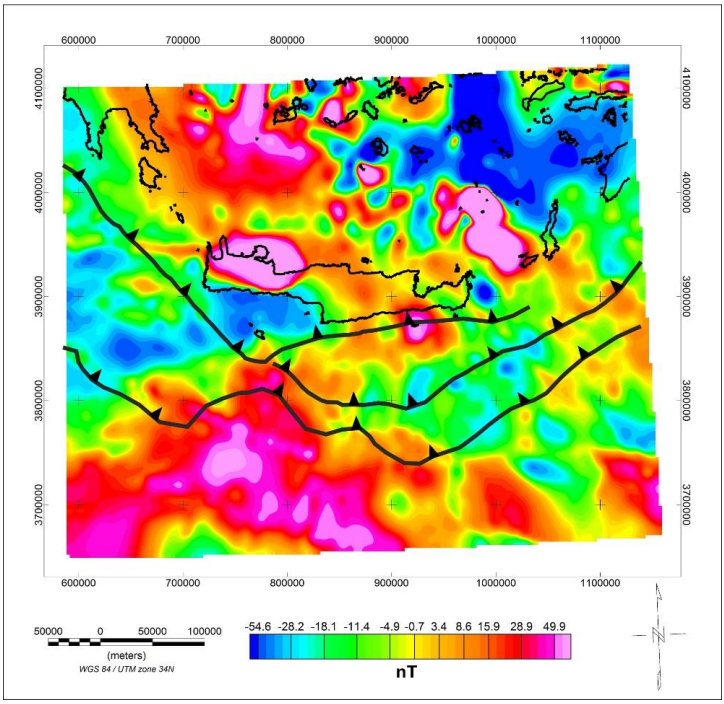
Şekil 4. Çalışma alanında kalın kırmızı çizgiyle çizilmiş hat boyunca meydana gelen depremlerin kesit haritası (üstteki şekil). Yaklaşık 160 km derinliğe kadar meydana gelen depremlerin, dalan levhayı gösterdiğine dikkat edilmelidir (alttaki şekil).

MATERYAL VE YÖNTEM

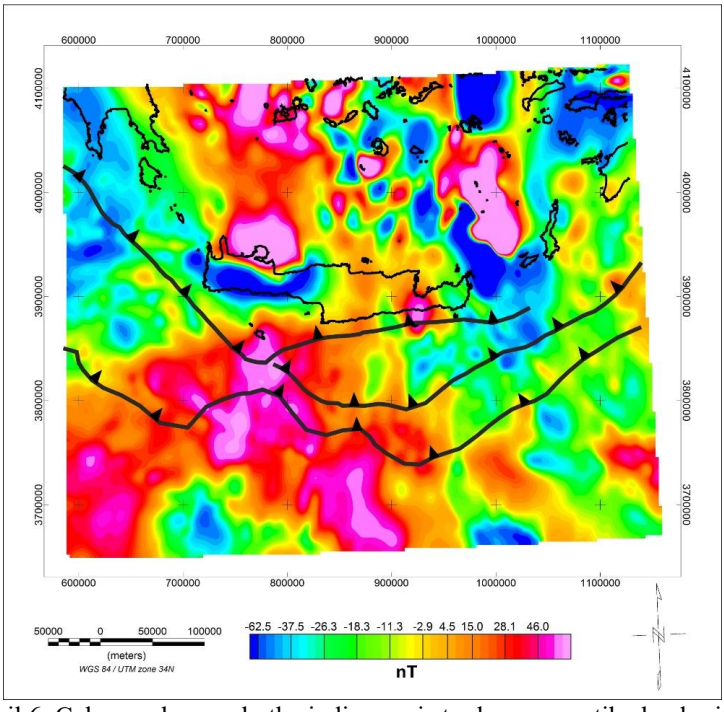
Bu çalışma, Girit adasının üzerinde bulunduğu kabuk altındaki derin yapıyı daha iyi anlamak için manyetik verileri sismik gözlemlerle bütünleştirmeyi amaçlamaktadır. Manyetik teknikler, özellikle yüksek gerilme veya kabuk zayıflığı bölgeleriyle ilişkili olabilecek yeraltı özelliklerinin görüntülenmesinde etkilidir. Bu çalışmada, aeromanyetik veriler kullanılmakta olup, manyetik anomalilerin yorumlanması için Kutba İndirgeme (RTP), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Analitik Sinyal (AS) dahil olmak üzere bir dizi manyetik veri işlem tekniği uygulanmaktadır. Bütünleşik analiz, bu kritik jeodinamik bölgedeki deprem aktivitesinin hem dağılımını hem de yoğunluğunu kontrol eden litosferik yapıya dair fikir vermektedir.

"The Earth Magnetic Anomaly Grid" (EMAG2-v3), 2 ark dakikalık bir mekansal çözünürlükte geliştirilen EMAG2 global manyetik anomali modelinin en son ve geliştirilmiş versiyonunu temsil etmektedir (Meyer vd., 2017). Bu versiyon, hava ve denizden yapılan ölçümler ve uydudan elde edilen verileri kapsamakta ve böylece hem kıtasal hem de okyanusal alanlarda geniş bir kapsama alanı sağlamaktadır. Veri setinde, deniz ve kıyı bölgelerinde, bölgesel ve global manyetik anomalilerin daha doğru yorumlanmasını kolaylaştırmak için deniz seviyesi ve geoidin 4 km yukarısı olmak üzere iki ayrı referans seviyesinde sağlanmaktadır (Meyer vd., 2017). Böyle çift seviyeli bir temsil, bu konuda araştırma yapacak olan araştırmacıların yüzeye yakın kaynaklar ile daha derin litosferik katkılar arasında ayrım yapmalarını sağlayarak kabuksal ve tektonik yorumların çözünürlüğünü artırmaktadır. Kapsamı ve gelişmiş çözünürlüğü sayesinde EMAG2-v3 manyetik veri seti, litosfer yapısı, levha tektoniği ve jeodinamik evrim çalışmalarında temel bir kaynak olarak kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, NOAA tarafından geliştirilen EMAG2-v3 aeromanyetik veri seti kullanılmıştır. Manyetik verilerin işlenmesi ve yorumlanması için ise Oasis Montaj yazılımı kullanılmıştır.

Dünya'nın manyetik alanının eğimli yapısı nedeniyle, anomaliler kaynaklarından farklı yerde görünebilmektedir. Bu nedenle, manyetik eğim ve sapmada meydana gelen bu değişimi düzeltmek için Kutba İndirgeme (Reduction to the pole, RTP) yöntemi uygulanmış ve anomaliler, ona neden olan kaynakların üzerine taşınmıştır (Baranov, 1957; MacLeod vd., 1993; Blakely, 1995; Ansari ve Alamdar, 2009). Şekil 5'te çalışma alanı ve civarının toplam manyetik alan haritası ve Şekil 6'da ise kutba indirgenmiş toplam manyetik alan haritası gösterilmektedir

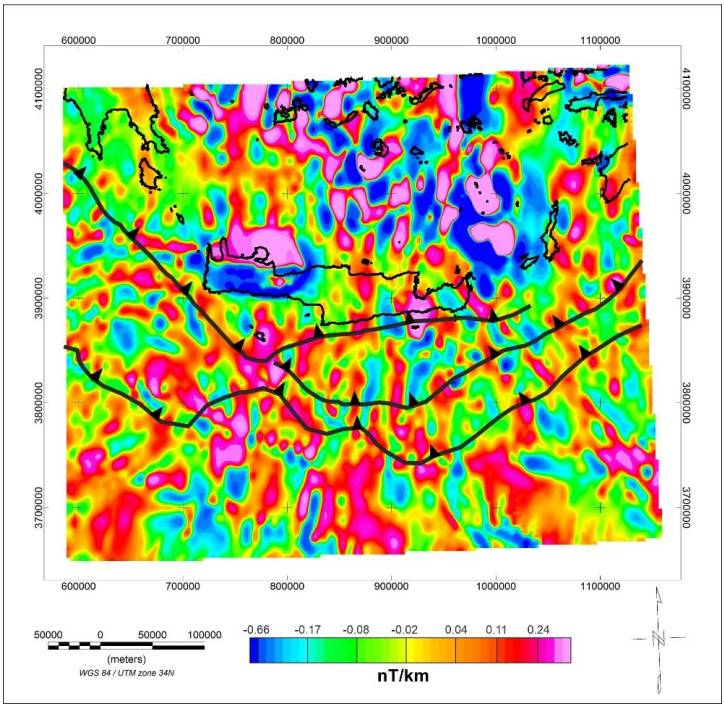


Şekil 5. EMAG2-v3 verisinden çalışma alanının toplam manyetik alan haritası



Şekil 6. Çalışma alanının kutba indirgenmiş toplam manyetik alan haritası

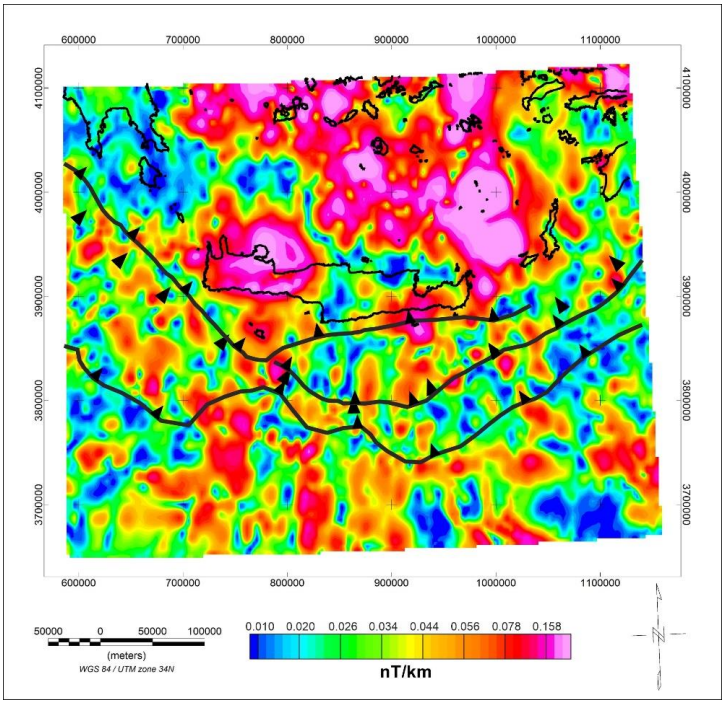
Düşey türev işlemleri genellikle manyetik verilerde, anomali ve diğer yapısal özelliklerin kenarlarını daha açık bir şekilde ortaya çıkarmak için kullanılır. Sığ yüzey özelliklerini vurgulamak ve anomali sınırlarını keskinleştirmek için Birinci Düşey Türev (FVD) (Reeves, 2005) kullanılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Çalışma alanının düşey türev haritası

Potansiyel alan verilerinin değerlendirilmesinde en önemli aşamalardan biri, anomaliye neden olan yapıların hem konumlarını hem de yer altındaki derinliklerini doğru biçimde belirleyebilmektir. Manyetik anomaliye sebep olan kaynakların sınırlarını daha da belirginleştirmek için, mıknatıslanma yönünden bağımsız olan ve kaynak kenarlarının tahmin edilmesine olanak tanıyan Analitik Sinyal (AS) yöntemi (Roest vd., 1992) kullanılmıştır. Bu yöntemin öne çıkmasının temel nedeni, yer manyetik alanın karakteristikleri ile mıknatıslanma yönünden etkilenmemesidir (Roest vd., 1992; Blakely, 1995). Manyetik anomalilerin analitik sinyali ise, düşey ve yatay türevlerin karelerinin toplamının karekökü şeklinde tanımlanmaktadır (Roest vd., 1992; Roest ve Pilkington, 1993; Salem vd., 2002). Şekil 8'de çalışma alanının analitik sinyal haritası verilmiştir.

Manyetik taban derinliği ise, analitik sinyalin genliği ile düşey türevi arasındaki oran kullanılarak hesaplanmaktadır (Reid vd., 1990). Böylece sismik verilerle karşılaştırılabilen 3 boyutlu bir manyetik yeraltı modeli üretilmiştir.

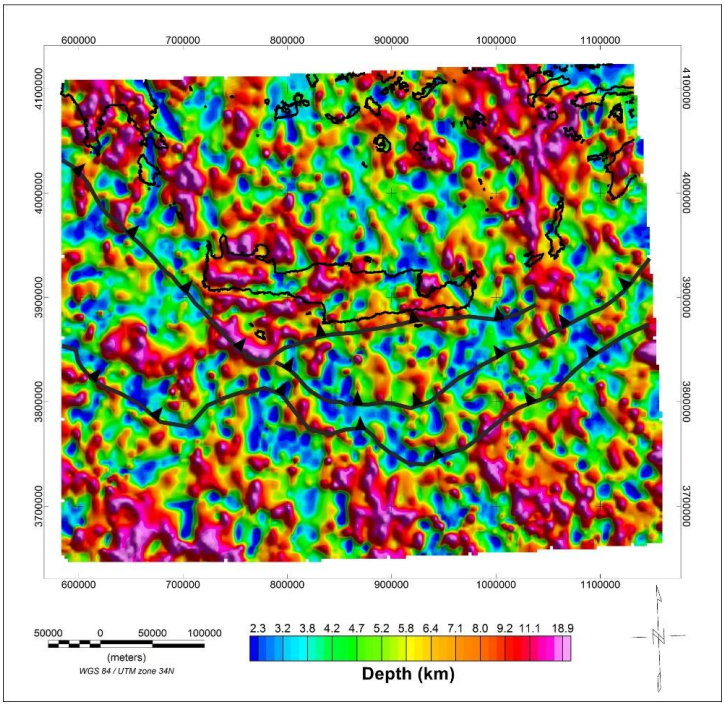


Şekil 8. Çalışma alanının analitik sinyal haritası.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Kutba indirgeme yapılarak düzeltilmiş manyetik anomali haritası, Girit Adası'nın çarpışma zonu ve her iki yamacı boyunca güçlü bir manyetik işaret ortaya koymuştur. Düşey türev filtresiyle vurgulanan yüksek genlikli anomaliler, muhtemelen volkanik sokulumlar veya metamorfik temel kayaçlarla ilişkili sığ, mıknatıslanmış tabakaların varlığını düşündürmektedir. Analitik sinyal haritası, büyük fay sistemleri ve dalma-batma ile ilişkili yapılarla uzamsal olarak ilişkili yüksek gradyanlı bölgelerle birlikte 0,158 nT/km'lik tepe genlikleri sergilemiştir. Derinlik hesaplamaları, özellikle çalışma alanının güneybatı kesiminde en derin manyetik kaynakların yaklaşık 18,9 km'ye ulaşmasıyla önemli düşey değişimler göstermektedir (Şekil 9). Bu bölgeler, dalma-batma süreçleriyle ilişkili olası kabuk kalınlaşması veya eski magmatik bölgeler olarak yorumlanmaktadır. Çalışma alanındaki depremlerin dağılımı ve derinliklerinin değişimi ile manyetik anomalilerin karşılaştırılması, çarpıcı bir uyum ortaya

koymaktadır. Yüksek sismisite gözlemlenen bölgeler, büyük manyetik sınırlarla örtüşmekte ve yapısal süreksizliklerin ve manyetik kontrastların mekanik zayıflık bölgelerine karşılık geldiği hipotezini desteklemektedir.



Şekil 9. Çalışma alanının manyetik taban derinliği haritası

Manyetik anomalilerin ve çalışma alanının depremselliğinin birlikte analizi, Girit Adası ve çevresindeki Ege bölgesinin altındaki tektonik mimariye dair kapsamlı bir görüş sunmaktadır. Gözlenen manyetik yapılar ve taban derinlikleri, devam eden dalma-batma ve yay önü göçüyle ilişkili aktif kabuk deformasyonu yorumlarını desteklemektedir. Deprem dağılım örüntüleri, gerilim birikiminin sık sık sismik salınıma yol açtığı mekanik olarak karmaşık bölgelerin varlığını daha da doğrulamaktadır. Bu bulgular, Girit'in litosferik konfigürasyonu ve sismik tehlike potansiyeli hakkındaki anlayışı geliştirmekte ve daha geniş Doğu Akdeniz tektoniği için değerli jeofizik bağlamlar sunmaktadır.

REFERANSLAR

Ansari, A.H., and Alamdar, K., 2009. Reduction to the pole of magnetic anomalies using the analytic signal. World Appl Sci J, 7: 405-409.

Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps, pseudo-gravimetric anomalies. Geophys, 22: 359-363.

Blakely, R.J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, pp 441.

Dolmaz M.N., Ustaömer T, Hisarlı Z.M., and Orbay, N., 2005. Curie point depth variations to infer thermal structure of the crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey. Earth Planet Spa., 57(5): 373–383.

Dziewonski, A. M., Chou, T. A., and Woodhouse, J. H., 1981. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. J. Geophys. Res., 86: 2825-2852.

Ekström, G., Nettles, M., and Dziewonski, A. M., 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. Phys. Earth Planet. Inter., 200-201: 1-9.

Erbek, E., and Dolmaz, M.N., 2019. Investigation of the thermal structure and radiogenic heat production through aeromagnetic data for the southeastern Aegean Sea and western part of Turkey. Geothermics, 81: 113-122.

Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., and Kahle, H. G., 2008. Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003. Tectonophysics, 449(1-4): 17-40.

Kalyoncuoğlu U.Y, Elitok Ö, Dolmaz, M.N., and Anadolu, N.C., 2011. Geophysical and geological imprints of southern Neotethyan subduction between Cyprus and the Isparta Angle, SW Turkey. J. Geodyn., 52: 70–82.

Le Pichon, X., and Angelier, J., 1979. The Hellenic arc and trench system: a key to the neotectonic evolution of the eastern Mediterranean area. Tectonophysics, 60(1-2): 1-42.

MacLeod, I.N., Jones, K., and Dai, T.F., 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic feld data at low magnetic latitudes. Explor Geophys, 24: 679–688.

McKenzie, D., 1978. Active tectonics of the Alpine–Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. Geophysical Journal International, 55(1): 217-254.

Meyer, B., Chulliat, A., and Saltus, R., 2017. Derivation and error analysis of the Earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3). Geochem Geophys Geosyst, 18: 4522-4537.

Reeves C., 2005. Aeromagnetic Surveys; Principles, Practice and Interpretation. GEOSOFT, 155pp.

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., and Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. Geophysics, 55: 80-91.

Roest, W. R., and Pilkington, M., 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. Geophysics, 58(5), 653-659.

Roest, W.R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, 57: 116–125.

Şahin, Ş, Öksüm, E., Abubakar, I., Özçelik, M., and Abdelwahed, M.F., 2019. Neotectonic structures imaged by seismic velocity along the Isparta Angle. Arabian Journal of Geosciences, 12(7): 230.

Şahin, Ş., and Parlak, J., 2022. The Determination of Subduction Geometry under the Aegean-Anatolian Plate along Aegean and Cyprean Arcs in the Eastern Mediterranean. International Journal of Advanced Engineering and Management Research, 7(4): 80-104.

Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. Journal of Appied Geophysics, 49: 231–244.

Shaw, B., and Jackson, J., 2010. Earthquake mechanisms and active tectonics of the Hellenic subduction zone. Geophysical Journal International, 181(2): 966-984.

Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D., 2019. The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20 (11): 5556–5564.

Geniş Sayı Aralığını Garanti Eden İlkel Polinom Temelli Sözde Rasgele Sayı Üreteci Tasarımı

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, donanım tabanlı sözde rasgele sayı üreteci (PRNG) için Fibonacci temelli ve polinom tabanlı bir tasarım yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yapı, LFSR (Linear Feedback Shift Register) temelli klasik rastgele sayı üreteçlerinden farklı olarak, entropi değerinin kullanıcı tarafından dışarıdan belirlenmesine olanak tanımakta ve böylece sistemin rassallık karakteristiği dinamik biçimde kontrol edilebilmektedir. Tasarlanan mimari, belirli bit genişliklerine (4, 5, 6 ve 8-bit) karşılık gelen tüm olası sayı aralıklarında hiçbir sayının atlanmadan üretilebildiği bir yapı sunmaktadır. Bu sayede, oluşturulan dizilerde tam kapsama (full coverage) sağlanmakta ve sayılar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir rassal dağılım elde edilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen polinom genişletme yöntemiyle klasik LFSR yapısına kıyasla sayı uzayının önemli ölçüde genişletildiğini göstermiştir. FPGA üzerinde gerçekleştirilen donanım doğrulama sonuçları, tasarımın hem donanım verimliliği (alan ve hız açısından) hem de istatistiksel rassallık bakımından etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, düşük kaynak kullanımıyla yüksek kalitede rassal sayı üretimi gerektiren gömülü sistem uygulamaları için esnek ve ölçeklenebilir bir alternatif sunmaktadır.

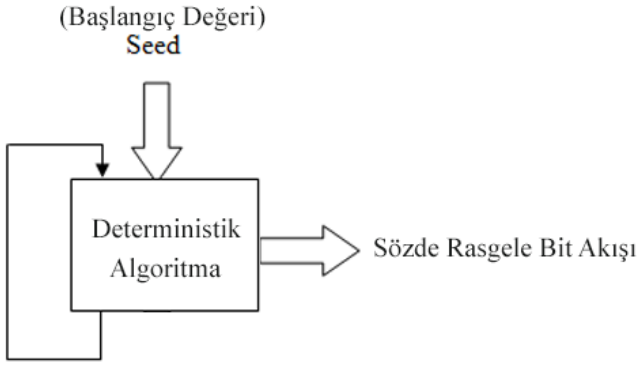
Anahtar Kelimeler – LFSR, Rasgele Sayılar, FPGA, Siber Güvenlik, Gömülü Sistemler.

GİRİŞ

Rastgele sayı üreteçleri (RNG — Random Number Generators), kriptografi (Mengdi vd., 2021:2), güvenlik uygulamaları, simülasyon, test (Govindaraj vd., 2024:1) ve gömülü sistemler gibi birçok alanda kritik bir bileşen olarak yer almaktadır. Yazılım temelli yaklaşımlar genellikle esneklik sunsa da, gerçek zaman gereksinimleri, enerji verimliliği ve donanım maliyeti sınırları, donanım tabanlı sözde rasgele sayı üreticilerinin (PRNG) önemini artırmaktadır. Çalışma akışı Şekil-1'de görülen donanım PRNG'lerinde, Lineer Geribeslemeli Kaydırma Yazmaçları (LFSR) en yaygın kullanılan yapılardandır; bunlar, basit donanım yapısı, yüksek hız ve kolay analiz edilebilirlik özellikleriyle öne çıkar (Oommen vd., 2018:2).

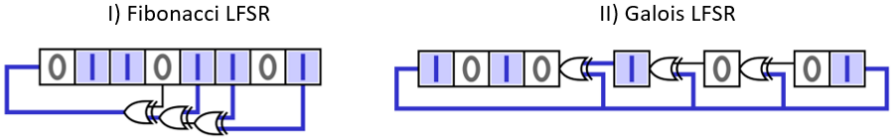
LFSR'ler Şekil-2'de mimari olarak görüldüğü üzere genellikle Fibonacci veya Galois konfigürasyonlarıyla uygulanır (Beletsky, 2022:1). Fibonacci konfigürasyonu, klasik polinom temelli geri beslemeyle durumu ileri kaydırırken (Madhav vd., 2024:2), Galois konfigürasyonu paralel ve bölünmüş geri besleme dallarıyla daha düşük lojik derinliği sağlama potansiyeli sunar (Miao vd., 2025:1). Literatürde her iki yapı da iterasyon, geri besleme polinomlarının optimizasyonu ve istatistiksel kalite analizi gibi

farklı avantaj ve dezavantajları bakımından sıkça çalışılmıştır (Li ve Yang, 2015: 2).



Şekil 1: Sözde rasgele sayı üreteci genel mimarisi

Bununla birlikte, klasik LFSR'lerin doğasında bulunan lineer yapı ve dönem sınırlamaları, belirli uygulamalarda istenen sayı uzayı kapsama (coverage) gereksinimlerini doğrudan karşılamayabilir. Bu sorunu çözmek için literatürde farklı stratejiler önerilmiştir: çoklu LFSR birleştirmeleri, sayaç-tetiklemeli başlatma yöntemleri ve LFSR periyodunu uzatmaya yönelik polinom genişletme teknikleri bunlardan bazılarıdır. Bu yaklaşımların amacı genelde periyodu ve istatistiksel özellikleri artırmak olsa da, "belirlenen dar bir aralıktaki tüm sayıları hiçbir atlama olmadan garanti etme" gereksinimi her zaman doğrudan elde edilememiştir (Dereli, 2020:2).



Şekil 2: Fibonacci ve Galois sözde rasgele sayı üreteci mimarileri

Ayrıca, modern uygulamalarda entropi kaynağının yönetimi önemli bir tasarım kararıdır: bazı sistemler gerçek entropi (TRNG) kaynaklarına dayanırken, birçok gömülü uygulamada entropi değeri harici yazılım/operatör tarafından sağlanmakta ve PRNG tasarımı bu değeri disiplinli biçimde kullanacak şekilde şekillendirilmektedir. Entropi parametresinin dışarıdan denetlenebilmesi, hem test edilebilirlik hem de uygulama düzeyinde esneklik sağlar; ancak bu kontrolün PRNG'nin kapsama ve istatistiksel özellikleri üzerindeki etkileri dikkatle incelenmelidir.

Literatürde konu önemi itibariyle sıklıkla çalışılmıştır. Zülfikar (Zülfikar vd., 2017:1) Fibonacci konfigürasyonunu iki segmentli bir yapıda kullanarak daha çeşitli sıra üretmeyi hedefler. Tasarımda ikinci segmentin saatinin bir kontrolörle değiştirilmesiyle sıra yapısı güncellenip farklı periyod davranışları oluşturulmaktadır. Özellikle dikkat çeken nokta, Fibonacci tabanlı segmentasyonun donanım karmaşıklığını artırmakla birlikte üretilen dizinin çeşitliliğini nasıl etkilediğinin detaylı şekilde ölçülmüş olmasıdır. Fakat makalede "belirlenen aralıkta tüm değerlerin eksiksiz üretimi" gibi bir garanti ele alınmamıştır. Geymel (Geymel, 2024:2) LFSR tabanlı sayaçların durum uzatma (state-extension) teknikleriyle nasıl 2^m-1'den daha fazla duruma (ve hatta 2^m duruma kadar) genişletilebileceğini göstermiştir ve LFSR durumunun ikili değere dönüştürülmesini hızlandıran otomatik kodlama algoritmaları sunmuştur. Öne çıkan nokta, LFSR dizilerini programlanabilir ve tam aralıklı sayıcılar olarak kullanma yaklaşımlarının donanım verimliliği açısından incelenmesidir ki amaç itibariyle bu çalışmaya benzese de esas vurgu otomatik kodlama ve EOC (end-of-count) tespiti üzerindedir. Bu yüzden kıyaslamada donanım verimliliği ve "state-extension" tekniklerinin etkileri ile karşılaştırmak mantıklı olacaktır. Ramasamy ve Samiappan (Ramasamy ve Samiappan, 2022:2) ise güvenlik ve tahmin edilebilirliği azaltma amacıyla dikey yığılı (vertical-stacked) LFSR yapıları ve primitif polinomların birleştirilmesine odaklanır. Özellikle ele aldığı nokta, klasik LFSR'lerin öngörülebilirliğini azaltmak için polinomların/katmanların nasıl düzenlenebileceği ve bunun donanım maliyeti ile güvenlik arasındaki takasıdır. Bae vd. (Bae vd., 2022:3) ise LFSR sayaçlarının durum uzatma yoluyla 2^m yerine 2^m-1 sınırının ötesine nasıl geçebileceğini ve yüksek hızda sayaç olarak kullanılabileceğini sunar; tasarım iki alt-sayaç kullanarak düşük-sıralı bitlerin sık değiştiği varsayımından yararlanır. Dikkat edilmesi gereken nokta, state-extension yaklaşımlarının sadece periyodu genişletmekle kalmayıp aynı zamanda sayıcı uygulamalarında donanım karmaşıklığını ve dönüşüm gecikmesini nasıl etkilediğidir. Yu vd. (Yu vd., 2019:3) ise TRNG ve hibrit yaklaşımları, entropi kaynaklarını ve donanım uygulamalarını gözden geçirmekle birlikte ayrıca PRNG ve TRNG çözümlerinin uygulanabilirliğini, güvenlik gereksinimlerini ve istatistiksel testlerini karşılaştırmıştır. Özellikle dikkat edilmesi gereken bölüm, entropi kaynaklarının kalite ölçümü ve PRNG/DRBG'lerle birleştiğinde ortaya çıkan güvenlik/performans ödünleşmeleridir. Bu çalışmada ise özellikle bitsel düzeyde en yüksek kapsama aralığı oluşturma sorununa odaklanılmıştır. Klasik LFSR'nin Fibonacci temelli gösterimini polinom tabanlı genişletme ile birleştirerek kullanıcı tarafından belirlenen entropi girdisi ile çalışan ve hedeflenen bit-aralığında (ör. 4, 5, 6, 8 bit) sayıların çoğunluğunu kapsayabilen bir donanım PRNG'si sunulmuştur. Literatürde LFSR periyodunu uzatmaya ve LFSR tabanlı donanım PRNG'lerini iyileştirmeye yönelik birçok girişim olmasına

karşın, bu çalışmada önerilen yaklaşım özetle şu farklılıkları literatüre kazandırmaktadır:

(i) Polinom genişletme yoluyla hedef bit-aralığında tam kapsama (full coverage) garantisi,
(ii) Entropinin dışarıdan parametre olarak verilmesiyle tasarımda kullanım esnekliği ve denetim kolaylığı,
(iii) FPGA ve/veya ASIC üzerinde düşük kaynaklı, çevrilebilir bir donanım mimarisi.

Bu avantajlar deneysel bölümde hem 4, 5, 6 hem de 8-bit aralıklar için gösterilmiş; her bir aralıkta tüm sayılar başarıyla elde edilmiştir. Ancak daha geniş bit dizilimleri içinde benzer çıktılar oluşturulabilmektedir.

ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu çalışmada önerilen rasgele sayı üreteci yaklaşımı, Galois Field (GF(2)) aritmetiği temeline dayanmaktadır. GF(2) sonlu alanı, yalnızca iki elemandan (0 ve 1) oluşan, toplama ve çarpma işlemlerinin mod-2 aritmetiği ile tanımlandığı bir cebirsel yapıdır. Bu yapı, donanım tabanlı uygulamalarda özellikle Linear Feedback Shift Register (LFSR) mimarilerinin temelini oluşturmakta ve düşük donanım maliyetiyle yüksek hızda bit dizileri üretebilme olanağı sağlamaktadır. Önerilen yöntemde, polinom tabanlı geri besleme yapısı kullanılarak GF(2) alanında gerçekleştirilen işlemler sayesinde üretilen bit dizilerinin doğrusal bağımlılığı en aza indirgenmiştir (Mishra vd., 2015: 5). Ayrıca, sistemde kullanılan polinomların seçimi, maksimum uzunluklu dizilerin (maximum-length sequence, m-sequence) elde edilmesine imkân tanımakta ve böylece belirlenen bit genişliği aralığındaki tüm olası sayıların herhangi bir atlama olmaksızın rassal olarak üretilebilmesini sağlamaktadır.

Rassal sayı üreteçlerinde kullanılan polinomların seçimi, üretilen dizinin periyodu, rassallık seviyesi ve tüm olası değerlerin elde edilebilmesi açısından belirleyici bir faktördür (Singh vd., 2016:3). Bu çalışmada kullanılan polinomlar, Galois Field GF(2) üzerinde tanımlanmış ilkel (primitive) polinomlar arasından seçilmiştir. GF(2) alanında toplama işlemi "XOR" ($\oplus$) ile, çarpma işlemi ise "AND" ($\wedge$) ile tanımlandığından, her bir polinom yalnızca katsayıların 0 veya 1 değerlerini alabildiği bir yapıya sahiptir. Böylece, $P(x)=xn+xk+1$ biçimindeki bir polinom, donanım düzeyinde geri besleme noktalarının seçilmesiyle doğrudan LFSR devresine dönüştürülebilmektedir.

Bir polinomun ilkel (primitive) olarak kabul edilebilmesi için, GF(2) alanında tanımlanan bu polinomun 2^n-1 uzunluğunda bir maksimum periyotlu diziyi üretmesi gerekir. Bu koşul, polinomun köklerinden birinin alanın üreteci (generator element) olmasıyla sağlanır. Başka bir ifadeyle, seçilen polinomun mod-2 işlemleri altında tam periyotlu bir dizi oluşturabilmesi, dizideki her sayının yalnızca bir kez oluşmasını garanti eder. Böylece, belirlenen bit genişliğinde n için, tüm 2^n-1 farklı kombinasyonun herhangi bir tekrar veya atlama olmaksızın elde edilmesi mümkün hale gelir. Özetle bir polinomungeniş periyotlara sahip olmasının iki temel kurala uyması gerekmektedir (Mishra vd., 2019):

- Polinomun indirgenemez olması gerekir ki bu da köklerinin olmaması demektir.
- Polinomun ilkel olması gerekir.

Misra ve arkadaşları (Sawicki vd., 2025) çalışmalarında bu kuralları açıkça ifade etmişlerdir. Bu kurallara göre yapılan hesaplamalar neticesinde Tablo-1'de görüldüğü üzere 4, 5, 6 ve 8 dereceli polinomlardan başarılı (ilkel ve indirgenemez) ve başarısız (ilkel değil veya indirgenebilir) örnekler verilmiştir.

Tablo 1: Geniş aralık açısından bazı başarılı ve başarısız polinom örnekleri

Derece	Polinom	Başarılı mı?	Açıklama
4	x^4+x^3+1	Evet	Standart ilkel polinom
4	x^4+x^2+1	Hayır	İndirgenemez ama kök 15 yerine daha küçük bir periyoda sahip
4	$x^4+x^3+ x^2+x+1$	Hayır	Tüm kökler 1 olduğu için periyot küçük
5	x^5+x^3+1	Evet	31 periyotlu LFSR üretir
5	x^5+x^4+1	Hayır	31 yerine daha kısa periyot
5	x^5+x^2+1	Evet	Alternatif ilkel polinom
6	x^6+x+1	Evet	63 periyotlu LFSR
6	$x^6+x^5+ x^3+x+1$	Hayır	Kökler periyodu tam üretmiyor
6	x^6+x^5+1	Evet	Alternatif ilkel polinom
8	$x^8+x^6+ x^5+ x^4+ x^3+x+1$	Evet	255 periyotlu LFSR
8	$x^8+x^4+ x^3+ x^2+1$	Hayır	Kökler tüm 255 elemanı üretmiyor
8	$x^8+x^6+ x^5+x^3+1$	Evet	Alternatif ilkel polinom

Tablo-1'de verilen polinomlardan başarılı olanlar LFSR tekniğiyle rasgele sayı üretme aşamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Bu sayede belirlediğiniz bit değerinde maksimum değer kümesi elde etmeniz garanti edilmiş olacaktır.

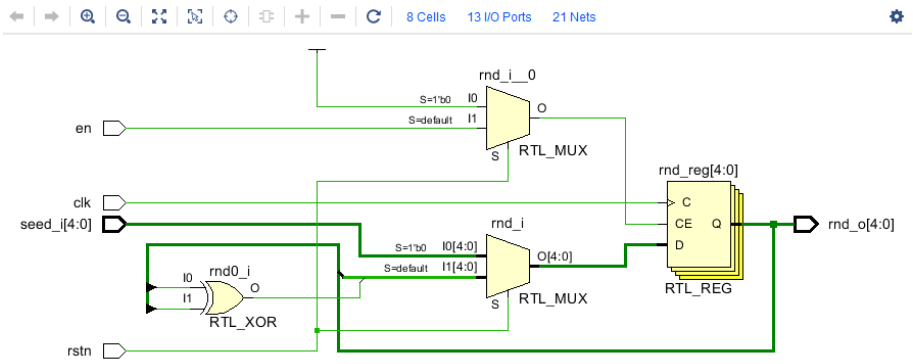
DENEYLER VE ANALİZLER

Bu çalışmada GF(2) üzerindeki ilkel polinomların dağılımlarına göre rasgele sayı üreteçlerinde uygun polinomların kullanılarak en geniş değer kümesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneylerde ölçme ve gözlemlemenin kolay olduğu düşük bit değerleri tercih edilmiş olup kullanılan polinomların uygunluğu ve uygun olmama durumları açıkça gösterilmiştir. Deneylerde Tablo-2'de görülen polinomlar Verilog HDL dili ile tasarlanmış ve bu tasarımların koşturulması sonucunda elde edilen değerler yorumlanmıştır. Bu tabloda hem kullanılan polinom hem de polinomun derecesine göre geri besleme bitinin elde edilme şekli verilmiştir. Tabloda açıkça görüleceği üzere elde edilen geri besleme biti üretilecek rasgele sayının LSB biti olarak işlem görecektir.

Tablo 2: Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan polinomlar

Deney	Derece	Polinom	Geri Besleme
1	4	x^4+x^3+1	LSB = n[3] ^ n[2]
2	5	x^5+x^3+1	LSB = n[4] ^ n[2]
3	6	x^6+x^5+1	LSB = n[5] ^ n[4]
4	8	$x^8+x^6+x^5+x^3+1$	LSB = n[7] ^ n[6] ^ n[4] ^ n[2]

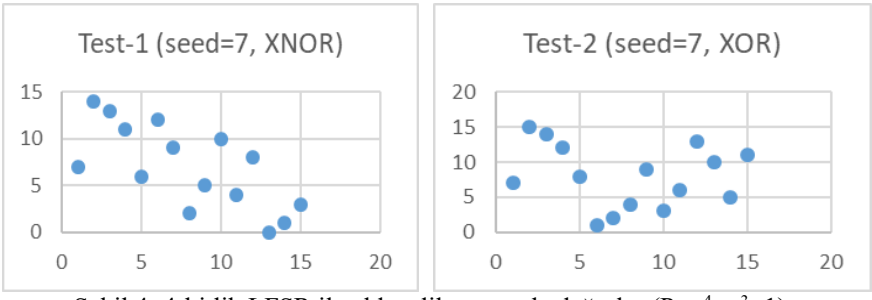
Şekil-3'te bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde kullanılan LFSR sözde rasgele sayı üreteci RTL şeması görülmektedir. Teknikte XOR kapısı üzerinden geri besleme bitleri oluşturulmuştur. XOR yerine XNOR kullanılmasının elde edilen geniş sayı kümesine farklı sayı akışlarını oluşturma dışında herhangi bir etkisi olumsuz etkisi olmamıştır.



Şekil 3: Sayısal olarak tasarlanan LFSR modülü

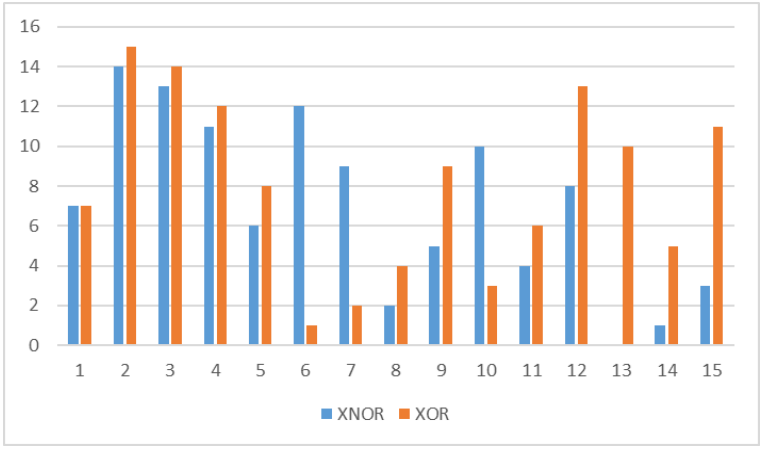
Yapılan ilk deney Şekil-4'te de görüldüğü üzere 4-bitlik rasgele sayı üreteci ile ilgili olmuştur. Geri bildirim bitinin XOR ve XNOR ile elde edildiği iki farklı olarak yapılan deneyde başlangıç değeri "7" olarak verilmiştir. Genel kural XNOR ile elde edilen geri bildirim işleminde "1"

değeri, XOR ile elde edilen geri bildirim işleminde ise "0" değeri tasarımı kilitlediği için 4-bitlik bir LFSR işleminde değer kümesi 15'tir. Bu deneylerde de 15 farklı değerin elde edildiği açıkça görülmektedir.



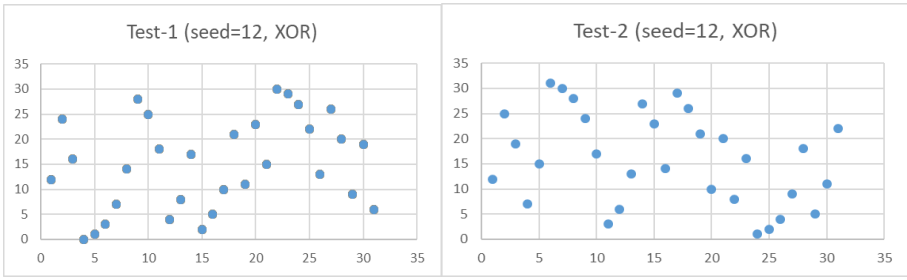
Şekil 4: 4-bitlik LFSR ile elde edilen rasgele değerler ($P=x^4+x^3+1$)

Şekil-5'te XOR ve XNOR ile elde edilen geri bildirim bitlerinin işlem farkı nedeniyle rasgele akışa olan etkisi görülmektedir. Şekilde başlangıç değerlerinin aynı (7) olduğu ama akışın işlem fark nedeniyle değişmesine karşın değer kümesinin her iki işlemde de 15 olduğu açıkça görülmektedir.



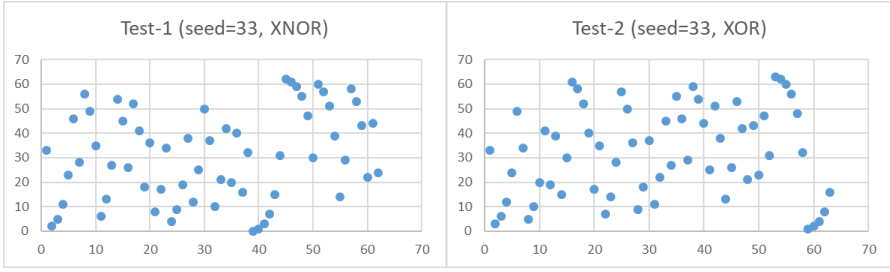
Şekil 5: 4-bitlik LFSR'de geri bildirim bitinin XOR ve XNOR ile elde edilmesi

Şekil-5'te 5-bitlik LFSR tasarımı sonucunda elde edilen bitlerin değer kümesi ve dağılımı görülmektedir. Dağılımın aynı olduğu ama XOR ve XNOR farkı nedeniyle değer akışının farklı olduğu açıkça görülmektedir. 5-bit ile (1 ve 0 dışında) elde edilmesi gereken en fazla 31 sayının bu şekilde elde edildiği açıkça görülmektedir.



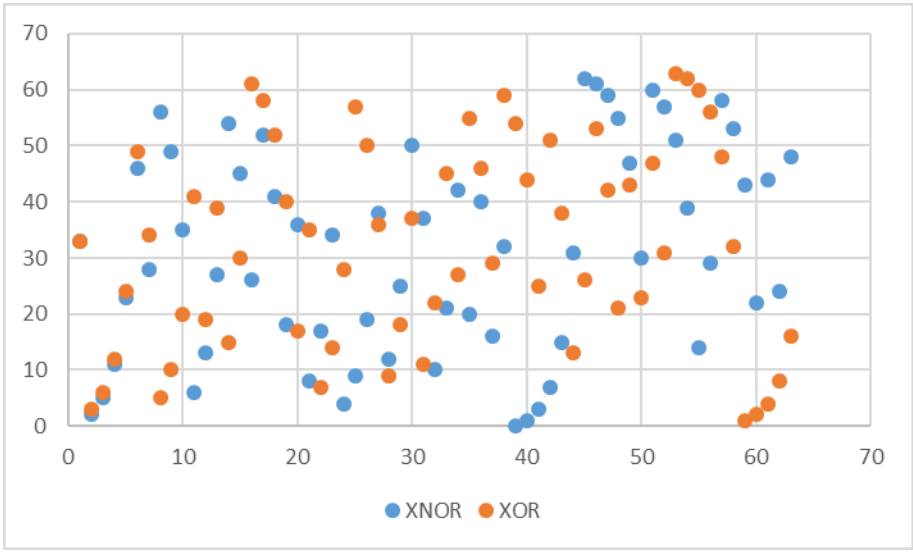
Şekil 5: 5-bitlik LFSR ile elde edilen rasgele değerler (P= x^5+x^3+1)

Şekil-6'da ise yapılan bir diğer 6-bitlik rasgele sayı üretecine dair simülasyon çıktıları görülmektedir. Yine başlangıç değerleri aynı olan ama geri bildirim bitinin birinde XNOR ve diğerinde ise XOR ile elde edildiği tasarımlarda önceki deneylere benzer şekilde 63 farklı değeri farklı bir sıra ile elde ettikleri açıkça görülmektedir.



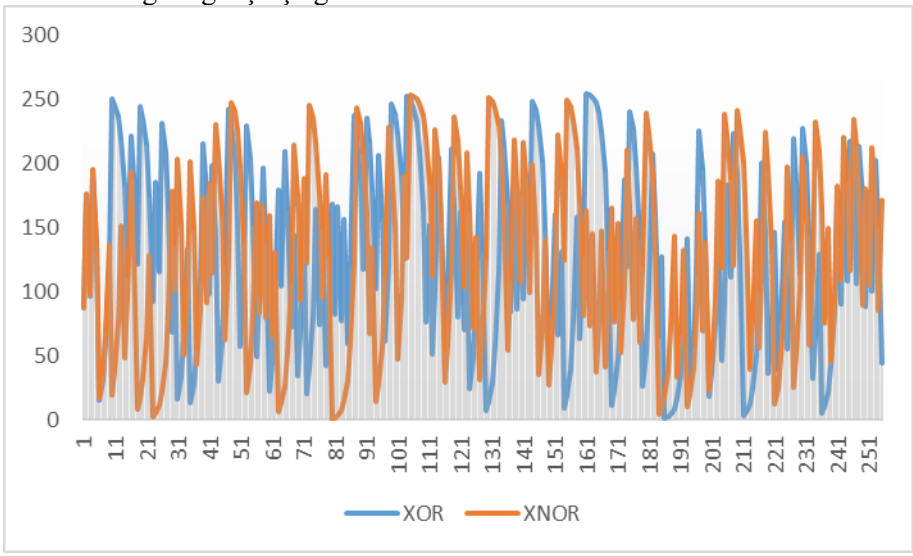
Şekil 6: 6-bitlik LFSR ile elde edilen rasgele değerler (P= x^6+x^5+1)

Şekil-7 geri bildirim bitlerini elde ederken kullanılan XOR ve XNOR işlem farkını ortaya koyan diğer bir şekildir. Burada da açıkça görüldüğü üzere değer kümesi aynı kalırken değer akışında fark ortaya çıkmaktadır. Bu durum rasgele sayı üretecinin kalitesini düşürmemektedir.



Şekil 7: 6-bitlik LFSR'de geri bildirim bitlerinin XOR veya XNOR ile elde edilmesi

Şekil-8'de ise XNOR ve XOR ile elde edilen geri bildirim bitleri neticesinde oluşan 8-bitlik rasgele değerlerin dağılımı ve sırası görülmektedir. Yine 8-bitlik değer kümesinde de seçilen uygun polinomun maksimum değer kümesini sağladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 8: 8-bitlik LFSR ile elde edilen rasgele değerler ($P=x^8+x^6+x^5+x^3+1$)

Tablo-3'te ise yanlış olarak seçilen polinomlar vasıtasıyla elde edilen geri bildirim bitleriyle oluşturulan rasgele sayıların değer kümesi ile ilgili sonuçları görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere polinomların kurala

uygun şekilde seçilmediğinde olabilecek riskler açıkça görülmekte ve değer kümesi oldukça negatif etkilenmektedir.

Tablo 3: Yanlış polinom tercihlerinde karşılaşılan değer kümesi büyüklükleri

Derece	Polinom	Mak. İterasyon	Gerçekleşen İterasyon
4	x^4+x^2+1	15	6
5	x^5+x^4+1	31	20
6	x^6+x^3+1	63	9
8	x^8+x^6+1	255	30

SONUÇ

Bu çalışmada kriptoloji, bilgi güvenliği, test ortamları ve oyunlar gibi pek çok uygulamada kritik görev yapan rasgele sayı üreteçlerine odaklanılmıştır. Rasgele sayılarda rasgelelilik kadar iterasyon sayısı da büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmanın odağında da özellikle geniş değer kümelerinin garanti edilmesi konusu ele alınmış ve bunun için geri besleme bitlerinin elde edilmesi hususu matematiksel dayanağa bağlanmıştır. Bunun için sonlu elemanların cebirsel ifadesi olarak da bilinen Galois Alanı teorisi bu konuda en dikkat çekici konu olmuştur. Bu çalışmada özellikle GF(2) alanı içerisinde kalan polinomlara odaklanılmıştır. Polinomların, indirgenemez ve ilkel olması en önemli konudur ki bu kuralı sağlayan polinomlar doğrudan LFSR tekniği ile rasgele sayı üreteçlerinde geri besleme bitlerini üretmede rahatlıkla kullanıldıklarında en geniş değer kümesinin elde edilmesini sağlamaktadırlar. Bu çalışmada 4-bit, 5-bit, 6-bit ve 8-bitlik rasgele sayı üreteçleri Verilog HDL ile donanım temelli tasarlanmış ve geri besleme bitleri hem kurala uyan polinomlarla hem de kurala uymayan polinomlarla elde edilerek sonuçları analiz edilmiştir. İşter XOR isterse de XNOR işlemi ile kurala uyan polinomlarla yapılan geri beslemelerle elde edilen rasgele sayıların en geniş değer kümesinde temsil edildiği test edilen tüm bit genişliklerinde görülmüştür.

REFERANSLAR

Mengdi, Z., Xiaojuan, Z., Yayun, Z., & Siwei, M. (2021, March). Overview of randomness test on cryptographic algorithms. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1861, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

Govindaraj, V., Dhanasekar, S., Martinsagayam, K., Pandey, D., Pandey, B. K., & Nassa, V. K. (2024). Low-power test pattern generator using modified LFSR. Aerospace systems, 7(1), 67-74.

Madhav, A., Hridya, P., Geethu, R. S., & Bhakthavatchalu, R. (2024, August). Programmable pseudorandom pattern generator based on lfsr. In 2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC) (pp. 106-112). IEEE.

Li, W., & Yang, X. (2015, August). A parallel and reconfigurable united architecture for Fibonacci and Galois LFSR. In 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (Vol. 1, pp. 203-206). IEEE.

Dereli, S. (2020). Yüksek Hızlı FPGA ile Yeni Bir LFSR Tabanlı 32-Bit Kayan Noktalı Rastgele Sayı Üreteci Tasarımı. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 32(3), 219-228.

Miao, Z., Liang, H., Li, X., Lu, Y., & Yao, L. (2025). A design of lightweight true random number generator based on Galois LFSR with dynamic feedback path. Microelectronics Journal, 159, 106652.

Oommen, R., George, M. K., & Joseph, S. (2018, December). Study and analysis of various LFSR architectures. In 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET) (pp. 1-6). IEEE.

Beletsky, A. (2022). Generalized Galois and Fibonacci Matrices in Cryptographic Applications. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 21, 1-19.

Zulfikar, Z., Away, Y., & Shahnaz Noor, R. (2017). FPGA-based design system for a two-segment fibonacci lfsr random number generator. Int. J. Electr. Comput. Eng.(IJECE), 7(4), 1882-1891.

Grymel, M. (2024). New Programmable LFSR Counters with Automatic Encoding and State Extension. Electronics, 13(2), 405.

Ramasamy, J., & Samiappan, D. (2022). A modified PRBS: vertical stacked LFSR primitive polynomial for secure data communication. Procedia Computer Science, 215, 947-954.

Bae, H., Hyun, Y., Kim, S., Park, S., Lee, J., Jang, B., ... & Park, I. C. (2022). High-speed counter with novel LFSR state extension. IEEE Transactions on Computers, 72(3), 893-899.

Yu, F., Li, L., Tang, Q., Cai, S., Song, Y., & Xu, Q. (2019). A survey on true random number generators based on chaos. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2019(1), 2545123.

Singh, I., & Pais, A. R. (2016, September). A random key generation scheme using primitive polynomials over GF (2). In International Symposium on Security in Computing and Communication (pp. 42-51). Singapore: Springer Singapore.

Mishra, P. R., Gupta, I., & Gaba, N. (2015). Distribution of Primitive Polynomials Over GF (2) with Respect to Their Weights. In Mathematics and Computing: ICMC, Haldia, India, January 2015 (pp. 441-449). New Delhi: Springer India.

Sawicki, P., Maksymovych, V., Harasymchuk, O., Lupenko, S., Shabatura, M., Marczak, K., & Karpinski, M. (2025). Optimization of Additive Fibonacci Generators Based on Primitive Polynomials Over GF (p). IEEE Access.

Arıtma Çamurları

Baybars Ali FİL[1]
Sermin GÜNASLAN[2]

1- Prof. Dr. Baybars Ali Fil Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü baybars@balikesir.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3085-224X
2- Öğr. Gör. Sermin Günaslan Kastamonu Üniversitesi Abana Sabahat Mesut Yılmaz Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü sgunaslan@kastamonu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2395-2808

ÖZET

Günümüzde, nüfus artışı ve yaşam standartlarındaki yükselişe paralel olarak tüketim miktarında yaşanan artış, oluşan atık miktarının da önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, kişi başına düşen su tüketiminin artması ve endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaşması, atıksu miktarında da dikkate değer bir artışa yol açmaktadır. Artan atıksu hacmi, arıtma tesislerinde daha fazla arıtma çamuru oluşumunu beraberinde getirmektedir. Ortaya çıkan bu çamurların miktarındaki artış, çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak yönetimi açısından önemli bir sorun alanı haline gelmiştir. Atıksu arıtma tesislerinde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemler sonucunda oluşan arıtma çamurları, suyun arıtımı sürecinde ortaya çıkan en önemli yan ürünlerden biridir. Arıtma çamuru, içerdiği yüksek orandaki su, organik madde, mikroorganizma, ağır metal ve besin elementi nedeniyle hem çevresel hem de ekonomik açıdan dikkatle yönetilmesi gereken bir atıktır. Çamurun özellikleri; kaynağına, arıtma prosesine, kullanılan kimyasallara ve işletme koşullarına bağlı olarak farklılık gösterir. Fiziksel özellikler; nem içeriği, yoğunluk, partikül boyutu ve viskozite gibi parametrelerle tanımlanırken, kimyasal özellikler organik madde miktarı, azot, fosfor, ağır metal ve tuz içeriğiyle belirlenir. Biyolojik özellikler ise çamurdaki mikroorganizma türleri, patojen varlığı ve biyolojik bozunabilirlik potansiyeli ile ilişkilidir. Arıtma çamurlarının çevreye zarar vermeden yönetilebilmesi için stabilizasyon işlemleri uygulanır. Bu işlemler, çamurun biyolojik olarak kararlı hale getirilmesini, kötü koku oluşumunun önlenmesini ve patojenlerin giderilmesini amaçlar. Stabilizasyon yöntemleri arasında anaerobik ve aerobik çürütme, kireç stabilizasyonu, kompostlaştırma ve termal kurutma yer alır. Arıtma çamurlarının uygun şekilde yönetilmesi, hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de geri kazanım ve yeniden kullanım olanaklarının değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde arıtma çamurunun tanımı, oluşum kaynakları, temel özellikleri ve stabilizasyon süreçleri ele alınarak çamur yönetiminin sürdürülebilir çevre politikalarındaki önemi vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Arıtma Çamurları, Atıksu Arıtımı, Çamur Kaynakları, Çamur Miktarı, Çamur Stabilizasyonu.

GİRİŞ

Su arıtımı ve dağıtımı ile kanalizasyonun toplanması, uzaklaştırılması ve arıtılması, halk sağlığının korunması ve atık suların alıcı su ortamları üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, tüm endüstriyel süreçlerde olduğu gibi, bu sistemler de çeşitli yan ürünlerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu yan ürünler arasında en dikkat çekici olanı ise, fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçlerinin

bir sonucu olarak ortaya çıkan arıtma çamurudur. Arıtma çamuru, oluşum koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösteren karmaşık bir bileşime sahiptir ve bu nedenle yönetimi çevresel açıdan özel bir önem taşımaktadır (Babatunde & Zhao, 2007; Urban, Nakada, & Isaac, 2023). Su arıtma tesislerinden (WTP) kaynaklanan çamur, başlıca mineral katı partiküller, humik maddeler ve koagülasyon işlemlerinde kullanılan kimyasal maddeler (koagülantlar veya koagülasyon yardımcıları) gibi bileşenlerden oluşmaktadır (Owen, 2002).

Atık su arıtma tesisi (AAT) çamuru, su arıtma çamurundan farklı özelliklere sahip bir atık ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Kanalizasyonun içeriği, özellikle yüksek organik yükü nedeniyle, atık suyun organik maddelerin uygun şekilde parçalanması ve giderilmesi amacıyla biyolojik arıtma süreçlerinden geçirilmesini zorunlu kılar. Başlangıçta evsel kaynaklı olan kanalizasyon, zamanla bu kaynaktan gelen çeşitli karmaşık kirleticilerin yanı sıra kanalizasyon sistemine kontrolsüz veya yasa dışı deşarjlarla karışan endüstriyel ve kimyasal kirleticileri de içerebilmektedir (Delatorre Junior & Morita, 2007). AAT çamuru çok bileşenli bir yapıya sahiptir ve yüksek oranda organik madde ile birlikte ağır metaller, patojen mikroorganizmalar, organik ve yeni ortaya çıkan kirleticiler ile mineral partikülleri içerebilir (Von Sperling & Andreoli, 2007; Von Sperling & Gonçalves, 2007). Atık su arıtma tesislerine (AAT) giren çamurun yaklaşık %50 oranında organik madde (OM), %35 toplam azot (TN), %90'dan fazla toplam fosfor (TP) ve çeşitli ağır metaller (HM) içerdiği bilinmektedir. Bu değerler dikkate alındığında, çamurun uygun şekilde arıtılmaması veya bertaraf edilmemesi durumunda, hem önemli bir kaynak kaybı hem de ciddi çevre kirliliği potansiyeli ortaya çıkmaktadır (Yoshida, Christensen, Guildal, & Scheutz, 2015).

Bu bölümde arıtma çamurlarının özellikleri ve kaynakları ele alınmıştır.

ARITMA ÇAMURU TANIMI VE ÇAMUR KAYNAKLARI

Atık su arıtım sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde kokulu; uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0,25 - %12 katı içeren atıklar "arıtma çamuru" olarak adlandırılır (Filibeli, 2013) . Çamurların çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir biçimde işlenmesi, arıtılması ve bertaraf edilmesi için, oluşan katı maddelerin kaynaklarının ve miktarlarının doğru biçimde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Arıtma tesislerinde ortaya çıkan çamurların özellikleri, tesisin tasarımına ve bünyesinde yer alan arıtma birimlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle çamurların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması, hem

çamur arıtma ve bertaraf süreçlerinin etkin şekilde yürütülmesi hem de uygulanan proseslerin performansının izlenmesi açısından kritik bir gerekliliktir (Gazete, 2010). Arıtma ile giderilen maddelere bağlı olarak büyük hacimlerde çamur oluşumunun yanı sıra çamurun işlenmesi ve bertarafı atık su arıtımı açısından karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. Çamur probleminin kompleks olmasının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir .

1. Arıtılmamış atık su içinde önemli miktarda bulunan ve ona kokulu karakterini veren maddeler içerir.
2. Biyolojik arıtımda oluşan ve uzaklaştırılması gereken çamur ham atık su içerisindeki organik maddelerin bileşimi halinde fakat başka bir yapıda bozunma ve kokuşma eğilimindedir.
3. Çamurun sadece küçük bir kısmı katı madde, önemli bir kısmı ise sudur. Bu nedenle büyük hacimler işgal eder (Kiliç, 2018).

Arıtma tipine ve amacına göre arıtma çamurlarının cinsleri farklılık gösterir. Çökebilen katı madde oluşturduğu ön çökeltim çamurları, kimyasal arıtma ve koagülasyon sonucu oluşan kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma işlemleri sonucu oluşan çamurlar gibi sıralanabilir.

Atık bünyesinde kirlilik oluşturan maddeler;

- Çökebilen Katı Maddeler
- Askıda Katı Maddeler
- Çözünmüş Katı Maddeler olarak sınıflandırılabilir.

Çökebilen katı maddeler; ızgara, kum tutucu ve ön çökeltim havuzlarında tutulurlar. Özellikle ızgarada tutulan katı nitelikli çökebilen katı maddeler evsel katı atık niteliğinde olduğundan herhangi bir işleme gerek duyulmadan kentsel katı atıklarla birlikte uzaklaştırılır. Kendiliğinden çökebilen katı maddeler ise ön çökeltim havuzlarında tutularak su ortamından uzaklaştırılır. Bunların organik madde içeriği %60 – 80 arasındadır ve su muhtevası oldukça yüksektir (Bahar, 2016; Tchobanoglus, Burton, & Stensel, 2003).

Mekanik arıtma işlemleriyle giderilemeyen askıda ve çözünmüş haldeki katı maddeler ise ya kimyasal yumaklaştırma işlemleriyle ya da biyolojik arıtma işlemlerinde oluşturulan yumaklar yardımıyla çökeltilerek veya yüzdürülerek su ortamından uzaklaştırılır.

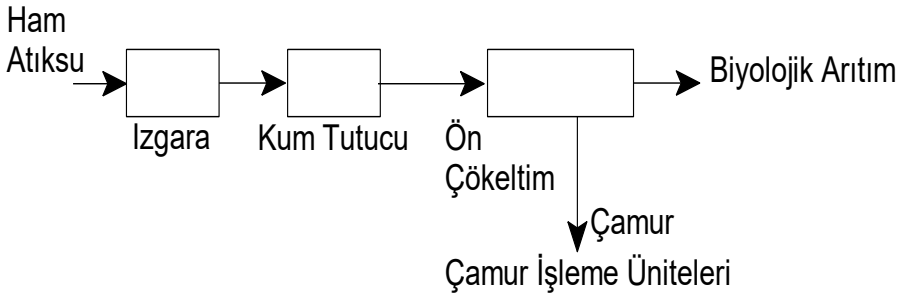
Çözünmüş organik maddeler ise biyolojik arıtımda bakteri bünyesinde tutularak canlı hücrelere yani biyokütleye dönüştürülür. Oluşan biyolojik çamur son çökeltim havuzlarında sudan ayrılır. Bu çamurun su muhtevası ve organik madde içeriği oldukça fazladır. Mekanik ve biyolojik yöntemler ile giderilemeyen çözünmüş haldeki organik madde (azot, fosfor) veya metal tuzları kimyasal madde ilavesi ile yapılan kimyasal yumaklaştırma işlemi ile sudan ayrılır.

1. Çamur Kaynakları

Atık su arıtma tesisleri evsel ve endüstriyel nitelikli atık suların alıcı ortama doğrudan deşarj edilmesi halinde doğal çevremizde oluşabilecek olumsuz etkileri azaltmak için tasarlanır. Farklı atık su karakteristiklerinden dolayı her

atık suyun arıtımı için uygulanan arıtma işlemleri de farklı olacaktır. Genel olarak evsel atık su arıtımında 3 tip arıtma sistemi uygulanır (Durak, 2005).

1.1. Ön Arıtma

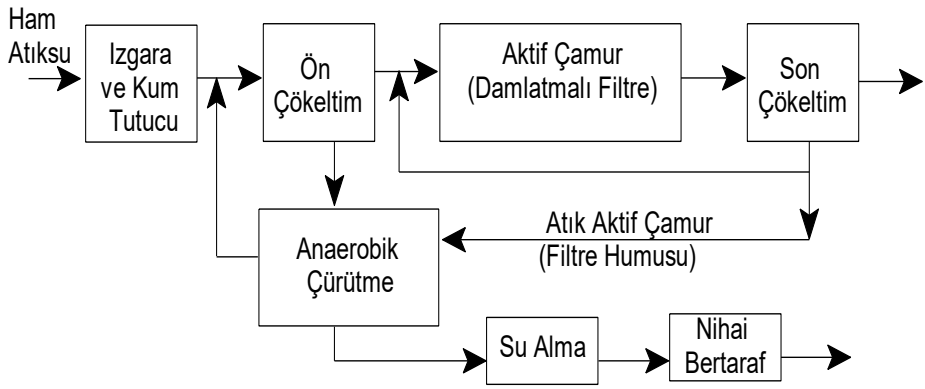


Şekil 1. Ön arıtma prosesi şeması

En yaygın kullanılan arıtma yöntemidir ve özellikle büyük şehirlerde kullanılır. Temel prensibi çökebilir haldeki katı maddelerin uzaklaştırılmasıdır. BOİ'nin bir kısmı da (%25 - %35) bu proseste giderilir. Ön çökeltim havuzları kendiliğinden çökebilecek katı maddeleri tabanda, yüzebilen maddeleri ise yüzeyde toplanmasını sağlar.
Tabanda toplanan maddeler ham ön çökeltim çamuru_olarak adlandırılır. Bu çamurun su içeriği oldukça yüksektir. Genellikle çürütülür ve çürük ön çökeltim çamuru olarak adlandırılır. Çürütücüde oluşan üst sıvı (süpernatant) arıtımın başına döndürülür. Bu sıvı yüksek katı konsantrasyonuna sahiptir (Filibeli, 2013).

1.2. İkincil Arıtma

İkincil arıtmada esas çözünebilir nitelikli organik madde biyokimyasal oksidasyonu (BOİ) giderimidir. En yaygın kullanılan ikincil arıtma tesisleri aktif çamur tesisleridir. Havalandırma tankındaki biyokütle son çökeltim havuzunda çöktürülür. Bir kısmı geri devredilir. Bu çökeltim atık aktif çamur olarak bilinir. Damlatmalı filtre yaygın olarak kullanılan başka bir ikincil arıtma sistemidir. Filtre yatağından kopan katı partiküller filtre humus olarak adlandırılır. Son çöktürme havuzunda sudan ayrılır.



Şekil 2. İkincil arıtma prosesi şeması

1.3. Fiziksel – Kimyasal Arıtma

Oksijen tüketen materyalin (bakteri, alg vb.) giderilmesi önemli olduğu kadar azot ve fosfor giderimi de önemlidir. Bu noktada fiziksel – kimyasal arıtma işlemi önem kazanır. Ön çökeltim havuzuna demir ve alüminyum tuzlarının ilavesi sonucu ikincil arıtımdaki biyolojik çamurlara benzer özellikte çamur oluşur. İkincil arıtımda çıkış suyuna kimyasal madde ilavesiyle içme suyu arıtma tesislerine benzer özellikte çamurlar meydana gelir. Tuzlar: $AlCl_3$, $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3.7H_2O$, $FeSO_4$, CaO, $Ca(OH)_2$, $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$. Arıtma çamurlarının işlenmesi ve bertaraf edilmesinde en önemli konu arıtma sonucu oluşan çamur ve katı madde karakteristiklerinin bilinmesidir.

Çamurun özellikleri;

- Çamur ve katı maddenin kaynağına,
- Uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak değişir.

Ham ön çökeltim çamurunun katı madde içeriği %4 – 8 arasındadır. Kokusu fazla, drenaj kabiliyeti zayıftır. Kurutma yataklarında çok zor drene olur fakat mekanik olarak suyunu almak mümkündür (Filibeli, 2013).

2. Çamurun Özellikleri

2.1. Fiziksel Özellik

2.1.1. Özgül Ağırlık

Birim hacimdeki çamur ağırlığının suyun ağırlığına oranı şeklinde tanımlanan özgül ağırlık birçok çamur numunesi için yaklaşık 1 alınır. Başka bir ifadeyle çamurun ağırlığı suyun ağırlığına yakındır.

$$S_ç = \frac{\rho_ç}{\rho_{su}} \qquad (1)$$

$S_ç$: $Çamurun\ özgül\ ağırlığı$

$\rho_ç$: $Çamurun\ yoğunluğu\ (kg/m^3)$

ρ_{su}: $Suyun\ yoğunluğu\ \ (1000kg/m^3)$

Çamur değişik özgül ağırlıktaki katı ve sıvılardan ibaret olduklarından çamurun özgül ağırlığı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{1}{S_ç} = \frac{W_i}{S_i} \qquad (2)$$

W_i: i kısmının ağırlığı (kg)
S_i: i kısmının özgül ağırlığı

2.1.2. Çamur İçin Kütle – Hacim İlişkisi

Çamurun hacmi esas olarak su muhtevasına ve içeriğindeki katı maddelerin karakterine bağlıdır. Örneğin; %10 katı maddesi olan çamur yaklaşık %90 su içerir. Çamurdaki katı maddeler sabit (mineral) katı maddeler ve uçucu katı maddeler (organik) oluşuyorsa çamur içerisinde katı maddelerin özgül ağırlıkları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{W_s}{S_s * \rho_{su}} = \frac{W_f}{S_f * \rho_{su}} + \frac{W_v}{S_v * \rho_{su}} \qquad (3)$$

W_s: Çamurun ağırlığı
S_s: Çamurun özgül ağırlığı
W_f: Sabit katı maddenin ağırlığı
S_f: Sabit katı maddenin özgül ağırlığı
W_v: Uçucu katı maddenin ağırlığı
S_v: Uçucu katı maddenin özgül ağırlığı
Oluşan çamurun hacmi/debisi şu şekilde verilir:

$$V_{çamur} = Q_{çamur} = \frac{W_s}{S_ç * \rho_{su} * P_s} \qquad (4)$$

P_s: Atılan çamurun katı madde oranı(%)

Verilen bir katı madde muhtevası için çamur hacmi ile katı madde içeriği yüzdesi arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \qquad (5)$$

2.1.3. Çamurun Katı Madde İçeriği

Çamurun sulu ve katı kısmı arasındaki ilişki katı madde konsantrasyonu olarak tanımlanır ve mg/L ya da %KM olarak belirtilir. Örneğin; özgül ağırlığı 1 olan çamur için 1000 mg/L konsantrasyon vardır veya %1 KM içerir demektir. Çamurdaki toplam katı maddeler askıdaki katı maddelerin toplamına eşittir. Bu üç tip katı maddenin (toplam, çözünmüş ve askıda) her biri uçucu (organik) ve sabit (mineral) kısımlara sahiptir.

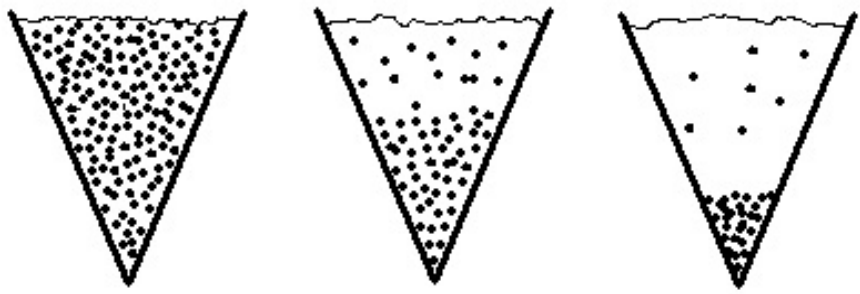
Yaklaşık 550℃'de oksitlenen kısım uçucu katı madde olarak bilinir. Katı madde ölçümünde yaygın olarak kullanılan yöntem buharlaştırmadır. Standart prosedüre uygun olarak krozelere alınan yaklaşık 1000 mL örnek 103 – 105℃'de buharlaştırılır. Kroze tekrar tartılarak toplam katı madde mg/L olarak bulunur.

$$\%KM = 100 - \%Su\ Muhtevası \qquad (6)$$

2.1.4. Çökelme Özellikleri

Çamur genellikle çökebilme özellikleri ile karakterize edilir. Çökelme testleri 1 L'lik mezürde yapılır. Önce çamur içindeki katı maddeleri homojen dağıtmak için numune iyice karıştırılır. Katı maddeler çökelirken katılar ve sıvı arasındaki ara kesit dikkatle izlenir ve zamana göre ara kesit yüksekliği kaydedilir. Belirli bir çamur numunesinin çökelme hızı çamur katı madde konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Seyreltik çamurlar daha hızlı konsantrasyonlu çamurlar daha yavaş çökerler. Çamurun çökelme özelliği aktif çamur tesisinin işletilmesinde önemli parametredir. Tesisin işletilmesi sırasında çamurun çökelme özelliklerinin belirlenmesinde çamur hacim indeksi kullanılır. Çamur hacim indeksi 1 g kuru maddenin mL cinsinden işgal ettiği hacim olarak ifade edilir. Hesap yapmak için alınan çamur numunesi 1 L'lik imhoff hunisinde 30 dk boyunca çökelmeye bırakılır mL olarak çamur miktarı ölçülür ve mg/L çamur askıda katı madde konsantrasyonuna bölünür.

$$SVI = \frac{\frac{mLçamur}{1Lnumune}}{\frac{mgAKM}{L}} \qquad (7)$$



2.1.5. Partikül Boyutu

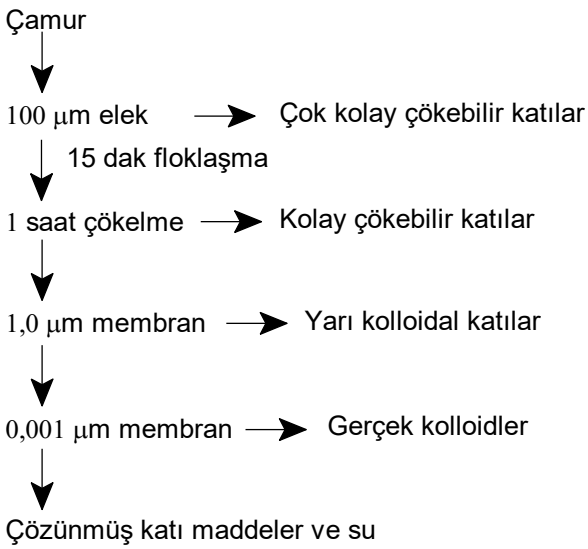
Çamur içindeki partiküller sadece boyut olarak değil şekil ve yoğunluk olarak da değişkendir. Bu nedenle partikül boyutu ile çamuru karakterize etmek zordur. Çamur sadece farklı partikül boyutundan oluşmaz. Partikül boyutları

zaman ve test koşullarına göre farklılık gösterebilir. Bu olumsuzluğu gidermek için agrega hacim indeksi oluşturulmuştur.

$$Agrega\ Hacim\ İndeksi = \frac{Hacimsel\ Agrega\ Konsantrasyonu}{Hacimsel\ Katı\ Madde\ Konsantrasyonu} \quad (8)$$

Agregalar büyük miktarda su içerir ve bu su çökelme sırasında partikülün bir kısmı gibi hareket eder. Çamur floklarının boyutu yoğunlaştırma ve suyunu alma işlemlerinde önemlidir. Eğer ölçülebiliyorsa floktaki su ve katı madde oranı çamur karakterizasyonunda kullanılabilir. Buna bağlı olarak flok için $\propto$ değeri tanımlanmıştır.

$$\propto = \frac{Su\ Hacmi}{Çamur\ Katı\ Madde\ Hacmi} \quad (9)$$



2.1.6. Çamurdaki Suyun Dağılımı

Çamurdaki su ya serbest ya da partiküllere yapışık haldedir. Her ikisi de farklı özelliklere sahiptir. 4 farklı şekilde incelenir (Eryiğit, 2018a).

1. Serbest Su: Çamur partiküllerine bağlı olmayıp gravitesi çökelme ile kolayca ayrılır.
2. Flok Suyu: Floklar içine hapsedilmiş su olup yumaklarla birlikte hareket eder. Mekanik su alma işlemleriyle giderilir.

3. Kapiler Su: Partiküller üzerinde bağlı olarak bulunur. Bu partiküllerin sıkıştırılıp deformasyonu sonucu uzaklaştırılır.
4. Kimyasal Bağlı Su: Partiküller içinde kimyasal olarak bağlanmış sudur.

Tablo 1. Tipik Bir Aktif Çamurda Suyun Dağılımı

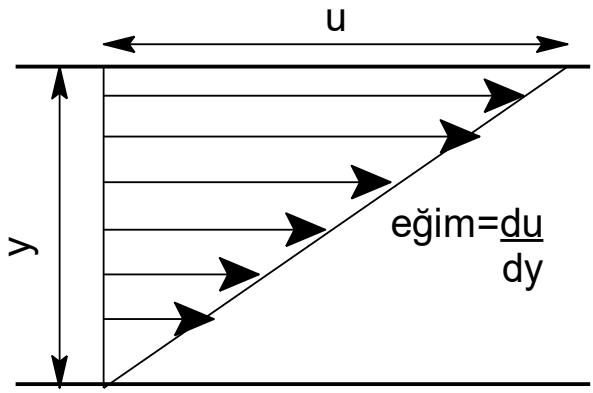
Bileşen	**Hacim(%)**
Serbest Su	75
Flok Suyu	20
Kapiler Su	2
Kimyasal Bağlı Su	2,5
Katı Maddeler	0,5

Tablo 2. Karışık Çürük Çamurdaki Suyun Dağılımı

Bileşen	**Hacim(%)**
Hücreler Arası Su	70
Adhezyon ve Kapiler Su	22
Adsorbsiyon ve Hücre İçi Su	8

2.1.7.Çamurun Akışkanlık Özelliği (Reoloji)

Bütün akışkanlar akım özelliklerine veya reolojilerine göre sınıflandırılır. Akışkanlık özelliğin belirlenmesinde en yaygın kullanılan parametre "viskozite"dir. Genel olarak akışkanın kayma gerilmesine bağlı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Kayma gerilmeleri etkisindeki bir akışkanın hız profili aşağıda Şekil 3'teki gibidir. Hız profili birçok akışkan için lineerdir. Bu ilişki;



Şekil 3. Hız gradyeni

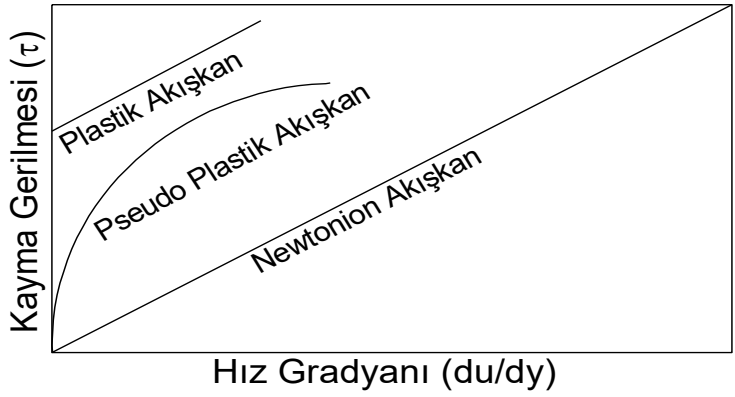
$$\tau \propto \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \eta * \frac{du}{dy} \qquad (10)$$

$$\tau = \tau_y + \eta * \frac{du}{dy} \qquad (11)$$

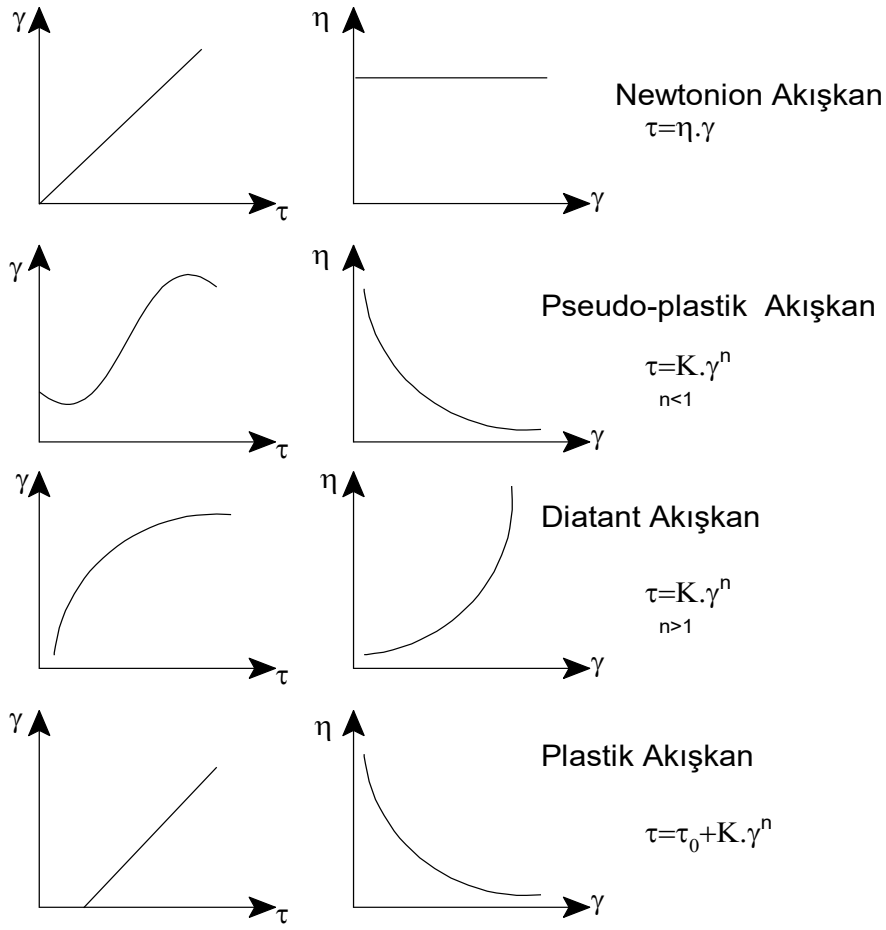
$$\tau = \eta * \left(\frac{du}{dy}\right)^n \qquad (12)$$

τ: *Kayma Gerilmesi*
τ_y: *Sınır Kayma Gerilmesi*
η: *Plastik viskozite*
n: *Akışkan Davranış İndeksi*



Şekil 4. Hız gradyeni

Newton'un hareket kurallarına uyan ve kayma gerilmesiyle hız gradyanının lineerleştiği bütün akışkanlar "Newtonion Akışkan" olarak adlandırılır. Bununla birlikte bazı akışkanlar bu özellikleri taşımazlar. Örneğin; plastik akışkan belirli bir sınır kayma gerilmesine sahiptir (Filibeli, 2013).



Şekil 5. Akışkan modelleri

Arıtma çamurları ise ne newtonion akışkan ne de plastik akışkandır. İkisinin arasında yer alır. Bu tip akışkanlar "Pseudo Plastik Akışkan" olarak tanımlanır. Newtonion akışkanlar için;

$n = 1 \implies \eta = \mu(dinamik\ viskozite)$ kabul edilebilir.

20℃'de; ham çamur için $\eta = 0{,}28$

çürük çamur için $\eta = 0{,}92$

aktif çamur için $\eta = 0{,}06$

2.1.7.Atterberg Limitleri

Zemin mekaniğinde çeşitli su muhtevalarında toprağın davranışlarını tanımlamak için kullanılır.

- Plastik Limit: Plastik davranışını tanımlar.
- Likit Limit: Materyalin (malzemenin) sıvı gibi davranışını inceler.
- Plastisite İndeksi: Plastik ile likit limit arası farkı tanımlar, % olarak ifade edilir (Tezcan, 2007).
-

3.Kimyasal Özellikler

Evsel ve endüstriyel nitelikli arıtma çamurlarının özellikleri çamurun kaynaklarına bağlı bulunduğundan kimyasal bileşimleri konusunda genelleme yapmak zordur. Ancak evsel atık su arıtma çamurlarının özellikleri için bazı temsili değerler verilebilir. Nütrientleri de kapsayan kimyasal bileşenlerin çoğu işlenen çamurun ve çamur işlemleri sırasında meydana gelen suyun bertarafı düşünüldüğünde önem kazanır. Anaerobik çürütme işleminin kontrolünde pH, alkanite ve organik asit muhtevası ölçümleri önemlidir. Yakma ve arazide bertaraf yöntemleri düşünüldüğünde ağır metaller, pestisitler ve hidrokarbonların miktarları belirlenmelidir. Yakma yöntemi gibi termal bir işlem varsa çamurun yakıt değeri düşürülmelidir.

3.1.Çamurun Isıl Değeri

Kalorimetre testleri ile tanımlanır. Farklı tiplerde ve filtrasyon öncesinde ilave edilen koagülant madde miktarı dikkate alındığında vakum filtreden geçirilmiş çamurun ısıl değerinin bulunması için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

$$Q = a * \left(\left[\frac{P_v * 100}{100 - P_c}\right] - b\right) * \left(\frac{100 - P_c}{100}\right) \qquad (13)$$

Q: $Isıl\ Değer\ \left(\frac{kj}{kg\ kuru\ madde}\right)$

a: $Katsayı$ (Ön çöktürme $havuzları, arıtılmamış\ veya$ çürütülmüş $çamurlar\ için$ 131;
$taze\ artık\ aktif\ çamurlar\ için$ 107 $alınabilir.$)

b: $Katsayı$ (Ön çöktürme $çamuru\ için\ yaklaşık$ 10; $aktif\ çamur\ için\ yaklaşık$ 5 $alınabilir.$)

P_x: $Çamurdaki\ uçucu\ katı\ madde\ \%'si$

P_c: $Çamura\ ilave\ edilen\ koag$ülant $madde\ \%'si$

Çamurun ısıl değeri çamurun tipine ve içeriğindeki uçucu katı madde miktarına bağlıdır. Arıtılmamış ön çöktürme çamurunun ısıl değeri özellikle yağ – gres içeriyorsa yüksektir (Eryiğit, 2018b).

3.2.Gübre Değeri

İlk zamanlarda hayvan gübreleri ve insan atıkları ürün verimini arttırmak amacıyla yaygın olarak sentetik gübrelerin tercih edildiği bilinmektedir. Çoğu

kimyasal gübre suda kolay çözünebilen mineral tuzları halinde azot, fosfor ve potasyum içerir. Bu maddeler bitki yaşamının devamı için olması gereken ana besin maddeleridir. Eğer stabil çamurda yeterli miktarda bu elementlerden varsa gübre olarak kullanılabilir.

3.3.Besin Değeri

Çamur bazen besin kaynağı olarak kullanılır. Örneğin; kurutulmuş aktif çamur hayvan yemine ilave edilebilir. Kentsel atık su arıtma çamurları yüksek oranda protein içerir. Atıklar üzerindeki kurtçuklar sonradan protein olarak geri kazanılabilir.

3.4.Çamur Partiküllerinin Elektriksel Yükleri

Partiküller üzerindeki net elektriksel yük "zeta potansiyeli" olarak adlandırılır. Partikül üzerindeki yük büyük ise bu durum floklaşmayı engeller. Ve bu tip çamurlar suyunu zor verir. Evsel atık suların arıtma çamurlarındaki zeta potansiyeli -10 mV ile +20 mV arasındadır. Endüstriyel çamurlarda ise -80 mV'dan fazla zeta potansiyeline sahiptirler.

4.Biyolojik Özellikler

Atık su arıtımında meydana gelen çamurda iki önemli konu vardır. Bunlar; organizmaların sınıflandırılması ve patojen mikroorganizmaların varlığıdır. Bir çamur kütlesinin sayılamayacak kadar farklı kaynağı olabileceğini ve her bir kaynaktan gelen besi ile değişik organizmaların bir kütle içinde yer alacağı düşünülürse çamur kütlesi içinde hastalık yapıcı mikroorganizmalar ürer (Tezcan, 2007).

REFERANSLAR

Babatunde, A. O., & Zhao, Y. (2007). Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. *Critical reviews in environmental science and technology, 37*(2), 129-164.

Bahar, S. (2016). Atık aktif çamurun aerobik stabilizasyonu ve ultrasonik dezentegrasyonu için optimum proses koşullarının belirlenmesi.

Delatorre Junior, I., & Morita, D. M. (2007). Avaliação da eficácia dos critérios de recebimento de efluentes não domésticos em sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários em São Paulo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental, 12*, 62-70.

Durak, Z. (2005). Adana Sofulu düzensiz çöp depolama alanında oluşan çöp sızıntı sularının bitki yetiştirilmesinde kullanılması. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.

Eryiğit, E. (2018a). *Kentsel Arıtma Çamurunda Farmasötiklerin Araştırılması.* (28676315 M.S.), Necmettin Erbakan University (Turkey), Turkey. Retrieved from https://www.proquest.com/dissertations-theses/kentsel-arıtma-çamurunda-farmasötiklerin/docview/2600706415/se-2?accountid=107421 ProQuest Dissertations & Theses Global database.

Eryiğit, E. (2018b). *Kentsel arıtma çamurunda farmasötiklerin araştırılması.* Necmettin Erbakan University (Turkey).

Filibeli, A. (2013). Arıtma Çamurlarının İşlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 255: İzmir.

Gazete, R. (2010). Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliği. 20 Mart 2010, sayı 27527.

Kiliç, G. (2018). Arıtma çamuru süzüntü sularından biyolojik stabilizasyon sonrası magnezyum amonyum fosfat çöktürmesi ile azot giderimi.

Owen, P. (2002). Water-Treatment Works' Sludge Management. *Water and Environment Journal, 16*(4), 282-285.

Tchobanoglus, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. *American Water Works Association. Journal, 95*(5), 201.

Tezcan, E. (2007). *Adapazari Karaman Atiksu Aritma Tesisi Çamurlarinin Giderimi.* Sakarya Universitesi (Turkey).

Urban, R. C., Nakada, L. Y. K., & Isaac, R. d. L. (2023). A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production, 419*, 138105. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138105

Von Sperling, M., & Andreoli, C. (2007). Introduction to sludge management. *Sludge treatment and disposal, 6*, 1-3.

Von Sperling, M., & Gonçalves, R. (2007). Sludge characteristics and production. *Sludge treatment and disposal, 6*.

Yoshida, H., Christensen, T. H., Guildal, T., & Scheutz, C. (2015). A comprehensive substance flow analysis of a municipal wastewater and sludge treatment plant. *Chemosphere, 138*, 874-882.

Elektrikli Araçlarda Batarya Yönetim Sistemi

Sezgin YAŞA[1]
Mustafa TEKE[2]

1- Arş. Gör. Dr.; Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. sezginyasa@karatekin.edu.tr. ORCID No:0000-0001-8468-3133
2- Dr. Ögr. Üyesi.; Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü. mustafateke@karatekin.edu.tr ORCID No:0000-0002-7262-4918

ÖZET

Elektrikli araçların kullanımı gün geçtikçe artmakta ve farklı model araçlar piyasaya girmektedir. Oluşan rekabet ortamı elektrikli araçlardaki gelişmeleri önemli oranda etkilemektedir. Elektrikli araçlardaki en önemli konulardan birisi aracın menzili olarak görülmektedir. Elektrikli araçlardaki menzil, büyük oranda kullanılan batarya teknolojisine bağlıdır. Bu nedenle, Batarya teknolojilerindeki yapılacak gelişmeler elektrikli araç sektöründe büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araçlarda LFP ve NMC türü piller gibi farklı Li-iyon pil türleri kullanılabilmektedir. Kullanılan farklı türdeki bataryaların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları olabilmektedir. Elektrikli araçlardaki çalışma sistemi içten yanmalı motorlu araçlarla benzerlik ve farklılıklar içermektedir. Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri içten yanmalı motorlu araçlardaki yakıt deposuna benzetilebilir ve araca hareket etmesi gerekli olan enerjiyi veren bölümdür. Kullanılan batarya sistemlerinin güvenliğini, stabilitesini ve verimliliğini sağlamada batarya yönetim sistemleri (BYS) önemli bir yer tutmaktadır. BYS sistemi şarj ve deşarj sırasında elektrikli araçları izleyerek araçların güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu bölüm, Elektrikli araçlar, batarya sistemleri ve BYS sistemleri hakkındaki incelemeleri içermektedir. Elektrikli araçların en önemli bileşenlerinden biri olan batarya sistemleri, BYS'nin temel bileşenleri ve fonksiyonları kapsamlı olarak sunulmaktadır. BYS'nin temel bileşenleri ise temel olarak batarya şarj durumu, batarya sağlık durumu ve batarya güç durumu tahminlerinden oluşmaktadır. Termal yönetim, yapısal bütünlük ve akıllı kontrol sistemleri gibi batarya modülü ve paketi teknolojisindeki yenilikler, elektrikli araç teknolojisinin ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Li-Iyon Batarya, Batarya Yönetim Sistemi, Elektrikli Araç, Batarya Şarj Durumu, Batarya Sağlık Durumu.

GİRİŞ

Elektrikli araçlara olan talep ve buna bağlı olarak elektrikli araçların kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu araçların kullanımlarının yaygınlaşması ve insan hayatına daha fazla girmesi, birlikte araçların izlenmesi, elektrikli araçlardaki donanımsal aksamların güvenilirliği büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisiyle çalışan araçlarda, güç kaynağı olarak batarya kullanılmaktadır. Elektrikli araçlardaki en önemli temel bileşenlerden birisi bataryalardır. Aracın menzili, güvenliği, maliyeti ve performansı büyük ölçüde kullanılan batarya sisteminden etkilenmektedir. Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri içten yanmalı motorlu araçlardaki yakıt deposu sistemi yerine kullanılan bir sistem olarak düşünülebilir. Bu nedenle, özellikle aracın menzilini belirleyen en önemli araç bileşenidir. Lityum-iyon (Li-iyon) bataryalar, elektrikli araçlar için kullanılan en uygun

enerji depolama seçeneklerden biridir, ancak batarya ömrü gibi bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Bu nedenle, batarya şarj durumu (State of Charge-SoC) ve bataryanın sağlık durumunu (State of Health-SoH) tahminleri BYS'nin önemli bileşenlerindendir ve Uzun ömürlü ve güvenli bir batarya sistemi sağlanması için gereklidir (Yılmaz vd., 2024)

Modern lityum iyon piller, düşük kendi kendine deşarj akımı, yüksek güç yoğunluğu ve dayanıklılık gibi özellikler sağlamaktadır. Elektrikli araç teknolojisinin merkezinde, batarya güvenliğini, verimliliği ve uzun ömürlülüğü sağlamada çok önemli bir rol oynayan BYS yer almaktadır. BYS, elektrikli araç güvenliğini ve optimum çalışmasını sağlamak için batarya şarj ve deşarjını izleyen ve kontrol eden sistemdir. (Suganya vd., 2024), (Kurkin vd., 2025) Batarya hücrelerinin parametrelerini ölçen cihazlar, elektriksel ve elektriksel olmayan parametreleri ölçen cihazlar olarak iki gruba toplanabilir. Yalnızca bir parametre türünüün ölçülmesi, batarya hücresinin durumunu doğru bir şekilde tahmin etmek için yeterli değildir. Bir BYS içindeki batarya hücrelerinin parametrelerini ölçmede kullanılan temel minimum üç sensör seti türünden kullanılmaktadır. Bu sensörler, Sıcaklık sensörü, voltaj sensörü ve akım sensörü olarak ifade edilebilir. Seri üretilen çoğu BYS'de bu sensör setleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, batarya takımı için genellikle bir akım sensörü ve her pil hücresi için ayrı voltaj sensörleri kullanılır. Sıcaklık sensörü sayısının voltaj sensörü sayısına oranı 1/4-1/6'sı kadardır. (4-6 pil hücresi başına 1 sıcaklık sensörü) (Kurkin vd., 2025)

Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri, pillerin tekli hücrelerini genellikle modüller halinde bir araya getiren bir sistemden oluşur ve ardından aracın güç ve enerji gereksinimlerini karşılamak üzere paketlere halinde üretilir. Bu batarya modüllerinin ve paketlerinin tasarımı ve yönetimi, güvenlik, güvenilirlik ve performansın sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Termal yönetim, yapısal bütünlük ve akıllı kontrol sistemleri gibi batarya modülü ve paketi teknolojisindeki yenilikler, elektrikli araç teknolojisinin ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadır (Sang vd., 2024).

Elektrikli araçlardaki güvenlik unsuru, en önemli parametrelerden biridir. Elektrikli araç üreten firmalar, tasarım yaparken yönetmeliklere uymalı ve kullanıcıların güvenliğini artırmalıdır. Li-iyon piller, herhangi bir arıza durumunda kısa devre oluşumuna neden olabilecek hücrelerden olumaktadır. Li-iyon piller için, uygun sıcaklık aralığı 15°C ila 45°C arasındadır ve bu sıcaklıklarda iyi bir performansa sahiptir. Pilin sıcaklığının artması veya azalması, pilin sağlığını etkiler ve bu da aracın menzilini azaltır. Pilin, elektrikli bileşenlerin ve aracın güvenliği için bir soğutma yönetim sistemi kurulmalıdır (Raja vd., 2021).

ELEKTRIKLI ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA TEKNOLOJILERI

Elektrikli araçlarda kullanılmakta olan ve gelecekte kullanılması planlanan birçok farklı batarya türü bulunmaktadır. Bu batarya türlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunabilmektedir. Bu sistemler elektrikli araçlar için kritik öneme sahiptir ve pazarın çeşitli enerji depolama gereksinimlerine uyarlanmış geniş bir pil yelpaze sunmaktadır. Bu piller, elektrikli araçların özel ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilir ve genel performans ve kullanışlılıklarında önemli bir rol oynar. Li-iyon pillerin elektrikli arabalara güç sağlamak için cazip hale getiren temel özellikleri Yüksek enerji yoğunlukları, hafif ve kompakt bir gövdede önemli miktarda enerji depolayabilme kapasiteleridir. Dahası, bu piller, diğer pil türlerine göre daha düşük bir kendi kendine deşarj yüzdesine sahip oldukları için, araçlar park halindeyken veya kapalıyken şarjlarını ve depoladıkları enerjiyi korurlar. Bu, kullanılmadıkları zamanlarda diğer pil türleri kadar enerji kaybetmeyecekleri anlamına gelir. Tersine, diğer pil türlerine göre daha hızlı şarj olurlar. Tablo 1., Li-iyon pillerin avantaj ve dezavantajlarını göstermektedir (El Kassar vd., 2024). Tablodan görüldüğü gibi Li-iyon pillerin birçok avantaj ve dezavanatajı bulunmaktadır. Tablo 1. İncelendiğinde dezavanatajların büyük oranda maliyet ve güvenlik açısından olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek enerji yoğunlukları elektrikli araçlarda kullanım için önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, Li-iyon pillerin çevrim ömürlerinin artması, şarj olma sürelerinin kısaltılması ve bunula birlikte güvenli bir BYS üzerine yapılacak olan gelişmeler, elektrikli araçlardaki batarya teknolojileri için üzerinde durulması gereken en önemli konular olarak görülmektedir.

Tablo 1. Lityum-iyon bataryaların avantajları ve dezavantajlarI

Avantajlar	**Dezavantajlar**
Yüksek enerji yoğunluğu	Yüksek maliyet
Düşük kendi kendine deşarj oranı	Sıcaklık değişimlerine duyarlılık
Hafif yapı	Sınırlı ömür
Hızlı şarj olabilme	Aşırı şarj zorlukları
Düşük bakım gereksinimi	Hammaddelerin sınırlı bulunabilirliği
Uzun çevrim ömrü	Hammadde çıkarımının çevresel etkileri
Farklı uygulamalara uyarlanabilirlik	Geri dönüşüm sürecinin karmaşıklığı
Kompakt boyut	Termal kaçak (ısınma) riski
Azaltılmış sera gazı emisyonu	Derin ve yüksek deşarjlarda voltaj kararsızlığı

(El Kassar vd., 2024)

Li-iyon pillerde kullanılan katot malzemesi türüne göre gruplandırma yapılmaktadır. Farklı türdeki Li-iyon bataryaların LCO “lityum kobalt oksit”, LMO “lityum manganez oksit”, NCM “nikel kobalt manganez oksit”, NCA “nikel kobalt alüminyum oksit”, LCP “lityum kobalt fosfat”, LFP “lityum demir fosfat” gibi türleri bulunmaktadır (Nitta vd., 2015). Otomobil üreticileri, Tablo 2’de görüldüğü önemli modelleri için farklı tipte batarya türleri kullanmaktadır. (Falcone vd., 2025).

Tablo 2. Farklı modeldeki araçlar için kullanılan batarya türleri

Üretici	Model	Hücre tipi	Notlar
Tesla	Model 3 / Y	Silindirik (2170, 4680)	Silindirik hücreler kullanır: Model 3 SR, CATL'den LFP 2170 hücreleri kullanır; uzun menzilli versiyonlar Panasonic'ten NCA 2170 hücreleri kullanır. Model Y ayrıca 4680 hücrelere geçiş sürecindedir.
Ford	Mustang Mach-E	Kese tipi	Standart menzil versiyonu CATL'den LFP poşet hücreler kullanır; uzun menzil versiyonu LG Energy Solution'dan NCM hücreler kullanır.
Volkswagen	ID.4	Kese tipi	MEB platformu içinde modüller halinde düzenlenmiş poşet hücreler kullanır.
Hyundai	Ioniq 5	Kese tipi	SK Innovation (SK On) tarafından sağlanan lityum-iyon polimer poşet hücreler kullanır.
BMW	i4	Prizmatik	Mevcut modeller prizmatik hücreler kullanmaktadır; gelecekteki "Neue Klasse" modelleri silindirik Gen6 hücreler kullanacaktır.
BYD	Han / Seal	Prizmatik	BYD, güvenliği ve termal kararlılığıyla bilinen, prizmatik LFP'nin bir türü olan kendi "Blade Battery" (Bıçak Pil) teknolojisini kullanır.
Mercedes-Benz	EQS / EQE	Prizmatik	Model ve bölgeye bağlı olarak CATL'den poşet hücreler ve Farasis ile ACC'den prizmatik hücreler kullanılır.

(Falcone vd., 2025).

BATARYA YÖNETIM SISTEMININ TEMEL BILEŞENLERI

BYS'nin donanım mimarisi, batarya paketinin güvenli, verimli ve güvenilir çalışmasını sağlamak üzere bir araya getirilmiş çeşitli sistem parçalarından meydana gelmektedir. BYS'in temelinde pillerin ölçüm devreleri, şarj kontrol birimleri ve haberleşme arayüzleri bulunmaktadır. Ölçüm devreleri temelde pil hücre gerilimleri ve sıcaklıklarını, analog çıkış veren sensörlerden sayısala dönüştüren (ADC) çeviricilerden faydalanır. Sıcaklık algılama girişleri ve aşırı gerilim ile düşük gerilim tespiti gibi koruma işlevlerini özel amaçlı oluşturulmuş bütünleşik aracılığıyla izlenmektedir. Genellikle modüler kartlar halinde düzenlenen bu ölçüm devreleri, birbirleri ve ana kontroller ile SPI veya CAN bus gibi haberleşme protokolleri üzerinden verileri ileterek merkezi denetim ve karar alma süreçlerine imkân tanımaktadır. Mikrodenetleyici birimi, Komut işleme kapasitesine göre genellikle 8-bit veya 32-bit mimariye sahip olan gömülü sistemlere dayalı olup, verileri işlemekte, dengeleme algoritmalarını yürütmekte ve koruyucu eylemleri koordine etmektedir (Lelie vd., 2018). Destekleyici donanımlar arasında düzenlenmiş güç sağlamak için DC/DC dönüştürücüler, hücre dengelemesi için anahtar matrisleri veya MOSFET tabanlı röleler ile ani akım girişlerini azaltmak ve kısa devreleri önlemek amacıyla kullanılan sigortalar veya ön şarj devreleri bulunmaktadır. Sistem topolojisine bağlı olarak merkezi, dağıtılmış veya modüler mimari, tek bir ana kontrolörden birden fazla koordine edilen alt modüle kadar ölçeklenebilmektedir. Genel olarak BYS donanımı, algılama, kontrol ve iletişim katmanlarını entegre eden, elektrikli araçlar ve enerji depolama uygulamalarında yüksek gerilimli lityum-iyon batarya sistemlerini yönetmeye uygun, kompakt ve hata toleranslı bir tasarım oluşturmaktadır.

Doğru algılama ve ölçüm, Batarya Yönetim Sistemlerinin (BYS) temelini oluşturur. Gerilim, akım ve sıcaklık verilerinin güvenilirliği sağlanamadığında, durum kestirimleri (SoC, SoH vb.) belirsizleşir ve koruma işlevleri yetersiz kalır. Endüstriyel ve otomotiv BYS tasarımlarında asgari sensör donanımı; gerilim, akım ve sıcaklık sensörlerinden oluşur ve bu bileşenler genellikle gerçek zamanlı izleme ve kontrol için yeterlidir. Gelişmiş sistemlerde ise ek olarak empedans, basınç/gerinim, nem ve gaz sensörleri kullanılabilmektedir (Lelie vd., 2018)

Gerilim ölçümü genellikle analog veya çok kanallı hücre izleme tümleşik devreleriyle gerçekleştirilir. Bu devreler; çoklayıcı, ADC, gerilim karşılaştırıcıları ve izolasyon arayüzleri içerir. Hücre uç gerilimleri ortak bir referansa veya izole kanallara göre ölçülür. Bileşen sayısını azaltmak için çoklama yöntemi yaygın olsa da bu yaklaşım ölçüm verimini ve izolasyon karmaşıklığını artırabilir. Ölçüm doğruluğunu sınırlayan başlıca hatalar; ADC ofseti ve kazanç hatası, termal sürüklenme, ortak-mod gerilim kısıtları, anahtarlama gürültüsü, kapasitif bağlaşım ve çoklayıcı kaçak akımıdır. Güncel tümleşik devreler 12–16-bit çözünürlükte, mili volt altı hassasiyet

sunabilmektedir. Yüksek gerilimli dizilerde kontrol kartlarıyla güvenli veri aktarımı için optokuplör, dijital izolatör, transformatör tabanlı bağlaşım veya izole SPI veri yolları gibi izolasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Dimitrov vd., 2019).

Batarya Yönetim Sistemlerinde örnekleme hızı, hücre gerilimi, akım ve sıcaklık gibi parametrelerin hangi sıklıkla ölçülüp dijital verilere dönüştürüldüğünü ifade eder. Doğru örnekleme hızı seçimi, sistemin güvenliği, doğruluğu ve performansı açısından kritik öneme sahiptir. Gerekli örnekleme hızı ise uygulamaya bağlıdır. Birçok batarya sisteminde iç elektrokimyasal dinamikler nispeten yavaş geliştiğinden, birkaç yüz Hz veya daha düşük örnekleme hızları yeterli olabilmektedir. Ancak yüksek akım geçişlerinde veya hızlı dinamik modelleme gibi gelişmiş kestirim algoritmalarında, daha yüksek örnekleme hızları ve fazla örnekleme yöntemleri avantaj sağlayabilmektedir (Berger vd., 2024).

Akım ölçümü, Batarya Yönetim Sistemlerinde (BYS) enerji akışının izlenmesi ve SoC, SoH gibi parametrelerin doğru tahmini için kritik öneme sahiptir. BYS'lerde genellikle şönt direnç ve Hall etkisi sensörleri kullanılır. Şönt direnç yöntemi, düşük değerli bir direncin üzerinden düşen gerilimin Ohm Kanunu'yla ölçülmesine dayanır ve yüksek doğruluk, doğrusallık ve düşük maliyet avantajı sunar. Ancak izolasyon eksikliği ve yüksek akımlarda ısınma dezavantaj oluşturur. Gelişmiş akım algılama yükselteçleri, diferansiyel ölçüm ve gürültü reddiyle bu yöntemin hassasiyetini artırmaktadır. Genel olarak, şönt tabanlı sistemler sadelikleri, geniş ölçüm aralıkları ve maliyet etkinlikleri nedeniyle BYS uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir (Verani vd., 2022). Bu yöntem, düşük kaçak akımlardan yüksek şarj/deşarj akımlarına kadar geniş bir aralıkta etkin ölçüm sağlar. Ancak, direncin yüksek gerilim hattına seri bağlanması izolasyon eksikliğine yol açar ve ek koruma önlemleri gerektirir. Ayrıca yüksek akımlarda $P = I^2R$ ilişkisine bağlı güç kayıpları ve ısınma, sistem verimliliğini düşürür. Direnç toleransları da geçici parazitlere neden olarak ölçüm hatalarına yol açabilir. Bu nedenle, direnç seçimi güç kaybını en aza indirecek ancak yeterli ölçüm doğruluğu sağlayacak biçimde yapılmalı; düşük sıcaklık katsayılı manganin gibi alaşımlar tercih edilmelidir. Milivolt düzeyindeki gerilim düşümlerinin doğru ölçümü için diferansiyel yükseltme ve gürültü reddi sunan akım algılama yükselteçleri kullanılmalıdır (Verani vd., 2022).

Hall etkisi sensörleri, Batarya Yönetim Sistemlerinde (BYS) akım ölçümü için temassız ve yalıtımlı bir yöntem sunar. Akımın oluşturduğu manyetik alanı algılayarak hem doğru akım hem de alternatif akım ölçümü yapabilirler. Elektriksel izolasyon sağlamaları, özellikle yüksek gerilimli batarya paketlerinde önemli bir avantajdır. Ayrıca doğrusal çıkış karakteristikleri sayesinde güvenilir ölçüm performansı sunarlar. Ancak, şönt direnç yöntemine göre daha maliyetlidirler ve sıcaklık değişimleri ile elektromanyetik girişimlere karşı duyarlıdırlar. Bu nedenle, kararlılığı

sağlamak için kalibrasyon ve kompanzasyon devreleri gerektirirler. Sonuç olarak, Hall etkisi sensörleri yüksek doğruluk ve izolasyon avantajlarıyla elektrikli araç ve yüksek güçlü enerji sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Khan vd., 2025).

Sıcaklık sensörleri, BYS 'in hücre güvenliği, performans optimizasyonu ve termal yönetim kararları için kritik konumda yer alırlar. En yaygın kullanılan türler arasında NTC (Negative Temperature Coefficient) ve PTC (Positive Temperature Coefficient) termistörler, RTD (Resistance Temperature Detector) 'ler ve entegre dijital sıcaklık sensörleri yer alır (Ali vd., 2025). Tablo 3., BYS'de kullanılan sıcaklık sensörlerini göstermektedir.

Tablo 3. BYS'de kullanılan sıcaklık sensörleri

Özellik	**Termokupl**	**Termistör (Ntc/Ptc)**	**Dijital sıcaklık sensörü**
Çalışma prensibi	İki farklı metalin birleşim noktasında termoelektrik gerilim üretimi	Direncin sıcaklık ile değişimi	Entegre devrede sıcaklığın dijital olarak ölçülmesi
Ölçüm araliği	Çok geniş (-200 °C ~ +1250 °C)	Orta (−40 °C ~ +125 °C tipik)	Sınırlı (−40 °C ~ +125 °C)
Doğruluk	Orta (±1–2 °C, kalibrasyon ile iyileşir)	Yüksek (±0.1–1 °C)	Yüksek (±0.25–0.5 °C)
Tepki süresi	Çok hızlı	Hızlı	Orta
Dayanıklılık	Yüksek, zorlu çevre koşullarına uygun	Orta, mekanik darbelere hassas	Orta
Maliyet	Düşük-Orta	Çok düşük	Orta-Yüksek
Sinyal işleme gereksinimi	Yüksek (soğuk uç kompanzasyonu ve yükseltme devresi gerekir)	Düşük (basit direnç ölçümü)	Düşük (doğrudan dijital çıkış)
BYS kullanimi	Yüksek güçlü batarya paketlerinde, aşırı sıcaklık takibi için	Hücre bazında yaygın, düşük maliyetli BYS'lerde	Akıllı BYS'lerde, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda

Termokupl tabanlı sıcaklık ölçümü, Batarya Yönetim Sistemlerinde (BYS) hücre ve modül sıcaklıklarının geniş aralıklarda izlenmesi için kullanılan güvenilir bir yöntemdir. İki farklı metalin birleşim noktasında oluşan termoelektrik gerilimi ölçerek −200 °C ila +1200 °C arasında çalışabilir. Geniş ölçüm aralığı, hızlı tepki süresi ve dayanıklılığı sayesinde özellikle yüksek güçlü lityum-iyon bataryalarda termal kaçak izleme ve soğutma kontrolü için uygundur. Ancak, yüksek doğruluk için soğuk uç

kompanzasyonu ve sinyal koşullandırma devreleri gerektirir (Koshkouei vd., 2024). NTC ve PTC termistörleri, düşük maliyetleri, kompakt yapıları ve hızlı tepki süreleri sayesinde batarya modüllerinde çok noktalı sıcaklık izleme için yaygın olarak kullanılır. Ancak doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle doğrusallaştırma algoritmaları gerektirirler. PTC sensörler ise kopma durumunda direnç artışıyla "fail-safe" davranış göstererek sistemi aşırı sıcaklık uyarısı moduna geçirir ve güvenli çalışma sağlar (Evyapan vd., 2025). RTD sensörleri, özellikle platin tabanlı türleri Pt100, Pt1000 gibi, yüksek doğruluk, uzun vadeli kararlılık ve geniş sıcaklık aralığı sunarak hassas uygulamalarda tercih edilir. Sıcaklık sensörlerinin yerleşimi ölçüm doğruluğu açısından kritiktir; yüzey ve iç sıcaklık arasında yüksek akım koşullarında 5–10 °C fark oluşabilir. Bu nedenle ince film veya gömülü sensörler kullanılarak daha hızlı ve doğru sıcaklık takibi sağlanır. Modül içindeki sıcaklık gradyanlarını izlemek için sensörler stratejik noktalara yerleştirilir. Isıl tepki süresi sensörün termal özelliklerine ve montaj koşullarına bağlıdır. Ayrıca dijital RTD sensörler, doğrudan mikrodenetleyiciyle haberleşerek modül düzeyinde tamamlayıcı sıcaklık izleme işlevi görür (Pan vd., 2025).

Batarya Yönetim Sistemi (BYS), enerji izleme ve hücre dengelemenin yanı sıra aşırı gerilim, deşarj, akım, kısa devre, yüksek sıcaklık ve izolasyon hatalarına karşı koruma sağlar. Bu koruma işlevi, hücre ömrünü uzatmak ve güvenliği artırmak için arızaları erken tespit etmeyi amaçlar. Hücre gerilimleri sürekli izlenir ve belirlenen 4.2V ve 2.5V gibi eşik değerler aşıldığında sistem devreyi keser. Komparatör tabanlı devreler, Vref değerinin aşılması durumunda MOSFET'leri kontrol ederek şarj ve deşarj koruması sağlar. Aşırı akım ve kısa devre durumlarında, şönt direnç veya Hall sensörlerinden alınan sinyaller izlenir ve sınır aşımında MOSFET anahtarı devreyi keser. Sigortalar pasif, röle ve MOSFET'ler ise aktif koruma elemanları olarak görev yapar; röleler özellikle yüksek gerilimli bataryalarda güvenli izolasyon için kullanılır (Lelie vd., 2018). Sıcaklık artışı, batarya yaşlanmasının temel nedenlerinden biri olup termal kaçak riskini artırır. Bu nedenle BYS, sıcaklık sensörlerinden aldığı verilerle aktif soğutma ve koruma işlevlerini yürütür. NTC termistörleri, sıcaklık değişimlerine hızlı tepki vererek mikrodenetleyiciye analog sinyal iletir; sistem bu sinyali eşik değerlerle karşılaştırarak soğutma veya koruma devrelerini devreye alır. Termal kaçak önleme, çok noktalı sensör ağı ve ısıl profil algoritmalarıyla gerçekleştirilir. BYS yazılımı sıcaklık gradyanlarını izleyerek aşırı ısınma durumlarında şarjı durdurur, soğutmayı etkinleştirir veya ilgili bölgeyi izole eder (Pan vd., 2025). Termal kaçak önleme sistemleri, çok noktalı sıcaklık sensörleri ve ısıl profil algoritmalarıyla çalışarak aşırı ısınma durumlarında şarj kesme, soğutma veya devre izolasyonu uygular. Bu stratejiler, yüksek enerji yoğunluklu batarya paketlerinde güvenli işletim için gereklidir. Komparatör-MOSFET tabanlı gerilim koruması, şönt/Hall sensörlü akım sınırlama, termistör geri beslemeli

ısıl kontrol ve izolasyon modülleri, modern BYS'lerde çok katmanlı bir güvenlik altyapısı oluşturur. Bu sistemler, ölçüm doğruluğu, tepki süresi, enerji verimliliği ve maliyet arasında denge kurarak güvenli enerji yönetimini sağlar (Hu vd., 2024).

ŞARJ/DEŞARJ KONTROLÜ VE HÜCRE DENGELEME TEKNIKLERI

Şarj ve Deşarj Kontrolü BYS'in temel görevlerinden biri olup, batarya paketine uygulanan şarj ve deşarj akımlarını güvenli sınırlar içinde tutmaktadır. Bu kontrol, hem hücre sağlığını korur hem de batarya güvenliğini sağlar. Tipik olarak şarj/deşarj kontrolü her hücrenin gerilimini ve toplam paket akımını izler, önceden belirlenmiş maksimum/minimum sınırlar aşıldığında şarj ya da deşarj işlemi durdurulur. Bu, hücrelerin aşırı şarj veya aşırı deşarj koşullarına maruz kalmasını engeller. Şarj ve Deşarj Kontrol stratejileri ve yöntemleri, geri bildirimli (feedback-based) ve geri bildirimsiz (non-feedback) stratejiler olarak sınıflandırılabilir. Özellikle elektrikli araçlarda, frenleme sırasında enerji devreye yeniden verilir ve bu dönemde hem şarj hem de deşarj akımları aynı anda yönetilmelidir. BYS, bu durumları tanıyarak geçiş stratejileri uygular. Şarjın sonunda voltaj referanslarından faydalanarak SOC düzeltmesi yapılabilir (Banguero vd., 2018).

Hücre dengeleme, batarya paketlerinde üretim toleransları, sıcaklık farkları ve kullanım geçmişinden kaynaklanan gerilim dengesizliklerini gidererek sistem ömrü ve performansını korur. Hücre dengeleme yöntemleri pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır. Pasif dengelemede, yüksek gerilimli hücrelerdeki fazla enerji şönt dirençler üzerinden ısıya dönüştürülerek harcanır. Bu yöntem basit, düşük maliyetli ve kararlı olsa da enerji verimsizliği ve düşük dengeleme hızı nedeniyle büyük dengesizliklerde sınırlı etkilidir (Ashraf vd., 2025). Aktif dengeleme, yüksek gerilimli hücrelerden düşük gerilimli hücrelere enerji aktararak ısı kaybı olmadan dengeleme sağlar ve verimliliği artırır. Bu amaçla buck/boost veya çift yönlü DC–DC dönüştürücüler ile indüktif, kapasitif ve hücreler arası enerji transfer topolojileri kullanılır. Yöntem, yüksek verimlilik ve hızlı dengeleme avantajı sunsa da devre karmaşıklığı, yüksek maliyet ve kontrol zorlukları gibi dezavantajlara sahiptir (Rao vd., 2025). Karışık / Hibrit Dengeleme Yöntemleri bazı modern BYS tasarımlarında pasif ve aktif yöntemler kombine edilir. Düşük dengesizlik durumlarında kaybedilecek enerji önemsiz olduğu miktarlarda

pasif mod kullanılırken büyük dengesizliklerde aktif mod devreye girer. Bu yaklaşım, enerji verimliliği ile maliyet arasında bir denge sağlamaktadır (Khan vd., 2024).
BYS içindeki şarj/deşarj kontrolü ve hücre dengeleme teknikleri, batarya performansı, ömrü ve güvenliği açısından kritik işlevlerdir. Şarj kontrolü modülü, akım, gerilim sınırları, uç düzeltmeleri ve dinamik senaryoları yönetirken, dengeleme teknikleri hücreler arası dengesizlikleri çözerek tam kapasite kullanımını mümkün kılar. Günümüzde hibrit dengeleme yaklaşımları ve akıllı algoritmalar üzerindeki araştırmalar bu alanda önemli gelişmeler sunmaktadır (Khan vd., 2024).

DURUM TAHMIN ALGORITMALARI: SOC, SOH VE SOP

Batarya Yönetim Sistemleri, yalnızca ölçüm ve kontrol işlevleriyle değil, aynı zamanda durum tahmin algoritmaları ile SOC, SOH ve SOP gibi bataryanın görünmeyen durumlarını çıkarır. Bu tahminler pil kullanım stratejileri, koruma mekanizmaları, verimlilik optimizasyonu ve öngörücü bakım kararları için kritiktir. SOC, SOH ve SOP durumları birbirleriyle ilişkilidir. Doğru tahmin edilmiş SOH bilgisi, SOC tahminini iyileştirir, doğru tahmin edilmiş SOC bilgisi ise SOP tahmininin güvenilir olmasını sağlar. Birçok modern BYS, çoklu model yaklaşımları kullanarak bu tahminlerin tümünü entegre bir şekilde yürütmektedir (Dini vd., 2024).
SOC, bir bataryanın %0–%100 arası mevcut yük durumu ile tam kapasite arasındaki oranı ifade eder. Ancak SOC doğrudan ölçülemez, bunun yerine gerilim, akım ve sıcaklık ile ölçülebilir değişkenler yardımıyla bir model veya tahmin algoritması aracılığıyla çıkarılır. Geleneksel yöntemlerden biri Coulomb sayacı yaklaşımıdır. Akımın zaman integrali alınarak bataryaya giren veya çıkan yük hesaplanır, başlangıç SOC değeri ile toplanarak güncel SOC elde edilir. Bu yöntem doğruluğu başlangıç değeriyle ve akım ölçüm hatalarıyla sınırlıdır. Gerilim-temelli yöntemler batarya dinlenme dönemlerinde gerilim ile SOC arasındaki ilişkiyi kullanır, fakat dinamik yük altında gerilim geçici sapmalar gösterdiğinden her zaman güvenilir değildir (Baccouche et al. 2018). Daha gelişmiş yöntemler arasında, denklem devre modelleri (Equivalent Circuit Models, ECM) ile çalışan EKF (Extended Kalman Filter), UKF (Unscented Kalman Filter), Gözlemciler (Observers) ve hibrit/füzyon temelli veri-odaklı yöntemler yer alır. Bir diğer yöntem ise

Hibrit yöntemdir ve fiziksel modeller ile veri tabanlı yöntemleri birleştirerek daha dengeli tahmin performansı sağlar (Ul Hassan vd., 2022).

SOH, bataryanın bozulma seviyesi ve kalan kullanılabilir kapasitesini gösteren bir ölçüttür ve genelde kapasite kaybı, iç direnç artışı gibi parametreler üzerinden tanımlanır. SOH tahmini, SOC tahminine kıyasla daha karmaşık bir optimizasyondur çünkü bataryanın kimyasal, termo-mekanik ve çevresel etkileri zamanla değişir. Parametre sürüklenmesi, farklı yıpranma yolları ve veriseti eksiklikleri gibi zorluklar vardır. Model-tabanlı metotlar ile elektrokimyasal modeller veya eşdeğer devre modelleri kullanılarak bataryanın iç direnci ve kapasite kaybı üzerinden SOH tahmini yapılır. Veri-tabanlı metotlar yardımıyla yapay zekâ algoritmaları bataryanın kullanım verilerini işleyerek bozulma eğilimlerini tahmin eder. Bu iki yaklaşımın birleşimi olan Hibrit yaklaşımlarda, model tabanlı ve veri tabanlı yöntemlerin birlikte kullanıldığı, daha yüksek doğruluk sağlayan metotlardır (Li vd., 2025).

SOP, bataryanın hızlı yükleme ve deşarj koşullarındaki güç verebilme kapasitesini tanımlar. SOP, SOC ve SOH bilgileri kullanılarak çıkarılır; özellikle araç performansı, limitleme sistemleri ve enerji dağıtımı açısından önemlidir. SOP tahmini genellikle dönemsel iç direnç, polarizasyon etkileri ve dinamik model parametreleri ile bağlantılıdır. Model tabanlı yaklaşımlar, batarya modelinden elde edilen gerilim kayıpları ve direnç tahminlerine dayanır. SOP tahmini için önemli problemler arasında, anlık güç taleplerine hızlı yanıt verebilme, model doğruluğu, sıcaklık etkileri ve parametre sapmaları yer alır (Wu vd., 2022).

SONUÇ

Bu bölümde, elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar ve BYS'leri ele alınmıştır. Batarya yönetim sistemleri ve temel bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir. Elektrikli araç bileşenlerinin en önemlilerinden biri olan bataryaların uygun bir şekilde yönetilmesi, hem güvenlik hemde batarya ömrü açısından kritik bir konumda durmaktadır.

REFERANSLAR

Ali, A. O., Abdelrehim, O., Saafan, M. M., Elmarghany, M. R., & Hamed, A. M. (2025). Comprehensive review of battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, *658*.

Ashraf, A., Ali, B., Al Sunjury, M. S. A., & Tricoli, P. (2025). A Comprehensive Review of the Art of Cell Balancing Techniques and Trade-Offs in Battery Management Systems. *Energies*, *18*(13), 3321.

Baccouche, I., Jemmali, S., Mlayah, A., Manai, B., & Amara, N. E. Ben. (2018). Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-IonBattery. *International Journal of Renewable Energy Research*, *8*(1), 178–187.

Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., Morant, F., & Aristizabal, A. (2018). A Review on Battery Charging and Discharging Control Strategies: Application to Renewable Energy Systems. *Energies, 11*(4), 1021.

Berger, F., Joest, D., Barbers, E., Quade, K., Wu, Z., Sauer, D. U., & Dechent, P. (2024). Benchmarking battery management system algorithms - Requirements, scenarios and validation for automotive applications. *ETransportation*, *22*, 100355.

Dimitrov, B., Collier, G., & Cruden, A. (2019). Design and Experimental Verification of Voltage Measurement Circuits Based on Linear Optocouplers with Galvanic Isolation for Battery Management Systems. *World Electric Vehicle Journal, 10*(4), 59.

Dini, P., Colicelli, A., & Saponara, S. (2024). Review on Modeling and SOC/SOH Estimation of Batteries for Automotive Applications. *Batteries*, *10*(1), 34.

El Kassar, R., Al Takash, A., Faraj, J., Hammoud, M., Khaled, M., & Ramadan, H. S. (2024). Recent advances in lithium-ion battery integration with thermal management systems for electric vehicles: A summary review. *Journal of Energy Storage*, *91*, 112061.

Evyapan, B., & Oral, B. (2025). Thermal management and performance optimization in battery packs via NTC sensor positioning. *Applied Thermal Engineering*, *280*, 128272.

Falcone, F., Giannotta, A., Ricco, R., & De Palma, P. (2025). Thermal management systems for electric-vehicle Li-ion batteries: Review of safety issues and analysis of porous-media immersive cooling. *Applied Thermal Engineering*, 127575.

Hu, D., Huang, S., Wen, Z., Gu, X., & Lu, J. (2024). A review on thermal runaway warning technology for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *206*, 114882.

Khan, F. I., Hossain, M. M., & Lu, G. (2025). Sensing-based monitoring systems for electric vehicle battery – A review. *Measurement: Energy*, *6*, 100050.

Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreasth, & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, *11*, 4999–5032.

Koshkouei, M. J., Fereshteh Saniee, N., & Barai, A. (2024). Thermocouple selection and its influence on temperature monitoring of lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*, *92*, 112072.

Kurkin, A., Chivenkov, A., Aleshin, D., Trofimov, I., Shalukho, A., & Vilkov, D. (2025). Battery Management System for Electric Vehicles: Comprehensive Review of Circuitry Configuration and Algorithms. *World Electric Vehicle Journal*, *16*(8), 451.

Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., & Sauer, D. U. (2018). Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. *Applied Sciences 2018*, *8*(4), 534.

Li, M., Xu, W., Zhang, S., Liu, L., Hussain, A., Hu, E., Zhang, J., Mao, Z., & Chen, Z. (2025). State of Health Estimation and Battery Management: A Review of Health Indicators, Models and Machine Learning. *Materials 2025,18*(1), 145.

Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, *18*(5), 252-264.

Pan, Y., Xu, K., Chen, Z., & Wang, K. (2025). Advanced Techniques for Internal Temperature Monitoring in Lithium-Ion Batteries: A Review of Recent Developments. *Coatings 2025, 15*(3), 268.

Raja, V. B., Raja, I., & Kavvampally, R. (2021). Advancements in battery technologies of electric vehicle. In *Journal of Physics: Conference Series* 2129(1), 012011, IOP Publishing.

Rao, V. S., Sajja, G. S., Manur, V. B., Arandhakar, S., & Krishna, V. B. M. (2025). An exploratory study on intelligent active cell balancing of electric vehicle battery management and performance using machine learning algorithms. *Results in Engineering*, *25*, 104524.

Sang, V. T. D., Duong, Q. H., Zhou, L., & Arranz, C. F. (2024). Electric vehicle battery technologies and capacity prediction: a comprehensive literature review of trends and influencing factors. *Batteries*, *10*(12), 451.

Suganya, R., Joseph, L. L., & Kollem, S. (2024). Understanding lithium-ion battery management systems in electric vehicles: Environmental and health impacts, comparative study, and future trends: A review. *Results in Engineering*, *24*, 103047.

Ul Hassan, M., Saha, S., Haque, M. E., Islam, S., Mahmud, A., & Mendis, N. (2022). A comprehensive review of battery state of charge estimation techniques. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *54*, 102801.

Verani, A., Di Rienzo, R., Baronti, F., Roncella, R., & Saletti, R. (2022). Analysis of Thermal-Induced Shunt Current Sensor Errors in a Low-Cost Battery Management System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, *866 LNEE*, 107–113.

Wu, M., Qin, L., & Wu, G. (2022). State of power estimation of power lithium-ion battery based on an equivalent circuit model. *Journal of Energy Storage*, *51*, 104538.

Yılmaz, M., Yazici, A., & Çinar, E. (2024). Elektrikli Araçlarda Otonom Batarya Yönetim Sistemi Literatür İncelemesi. EMO Bilimsel Dergi, 14(2), 7-22.

Graflar ve Temel Kavramlar

Yıldıray YİĞİT [1]
Murat KARABATAK[2]

1- Öğr. Gör.; Bitlis Eren Üniversitesi Ahlat Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı Programı. yyigit@beu.edu.tr ORCID No: 0000-0001-8953-9405
2- Prof. Dr.; Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü. mkarabatak@firat.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6719-7421

ÖZET

Bu bölüm, bilgisayar bilimleri ve mühendisliğin temel taşlarından olan graf teorisine kapsamlı bir giriş sunmaktadır. Bölüm, graf kavramının tarihsel kökenlerine, Euler'in Königsberg'in yedi köprüsü problemi üzerinden yaptığı öncü çalışmalara değinerek başlamaktadır. Ardından, düğüm, kenar, derece, komşuluk gibi temel graf terminolojisi detaylı bir şekilde tanımlanmaktadır. Basit, tam, ağırlıklı, yönlü, yönsüz ve bipartite gibi farklı graf türleri, yapısal özellikleriyle birlikte, çok sayıda görsel örnekle desteklenerek açıklanmaktadır. Bölümün devamında, grafların bilgisayar ortamında nasıl temsil edildiği ele alınmakta; komşuluk matrisi, komşuluk listesi gibi temel veri yapıları ve bu yöntemlerin bellek kullanımı ile performans açısından karşılaştırılması sunulmaktadır. Son olarak, bölüm, graflar üzerindeki temel algoritmaları incelemektedir. Genişlik Öncelikli Arama (BFS) ve Derinlik Öncelikli Arama (DFS) gibi arama algoritmalarının yanı sıra, en kısa yol problemlerini çözmek için kullanılan Dijkstra ve Bellman-Ford algoritmaları ile asgari tarama ağacı (minimum spanning tree) oluşturmaya yönelik Prim ve Kruskal algoritmalarının çalışma prensipleri açıklanmaktadır. Bu bölüm, okuyucuya graf teorisinin temel yapı taşlarını ve en yaygın kullanılan algoritmalarını bütüncül bir bakış açısıyla sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler – Graf Teorisi, Graf Algoritmaları, Veri Yapıları, En Kısa Yol Algoritmaları, Asgari Tarama Ağacı, Komşuluk Matrisi, Genişlik Öncelikli Arama (BFS), Derinlik Öncelikli Arama (DFS), Dijkstra Algoritması, Bellman-Ford Algoritması.

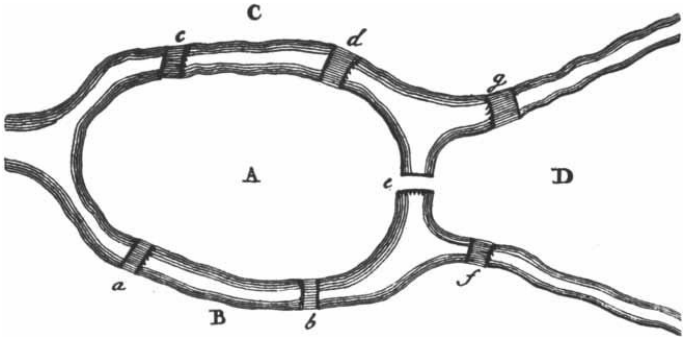
GRAFLAR

Graf, bir olay veya durumun düğüm ve çizgiler kullanılarak gösterilme şeklidir (Çölkesen, 2014). Graf teriminin geçmişi 18. yüzyıla kadar uzanmasına rağmen günümüzde de özellikle bilişim teknolojisi ve iş dünyası olmak üzere birçok uygulamada ve sistem modellemesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilimlerde, mühendislik uygulamalarında, sosyal ilişkilerin gösterilmesinde, tıpta ve işletme biliminde ele alınan birçok problem graf teorisine dayandırılarak modellenmekte ve çözümlenebilmektedir.

Graf teori ile ilgili sistematik olarak çalışılan ilk örnek 1736 yılında İsveçli matematikçi Leonard Eular tarafından yayınlanan "Konigsberk'in Yedi Köprüsü" adlı çalışmaya adını veren köprü problemidir. Eular yapmış olduğu çalışmasında o zamana kadar çözümsüz olarak bilinen bu problemi çözüme kavuşturarak tarihe geçmiştir. Eular köprü problemini şu şekilde tanımlamaktadır:

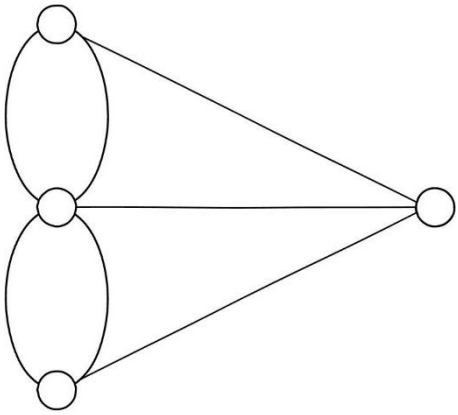
Prusya'daki Konigsberk kasabasından geçen Pregel nehri iki dala ayrılarak Kneiphof adasının iki yanından geçmektedir. Nehir üzerinde yedi adet köprü

inşa edilerek adayı diğer kentlere bağlamaktadır. Konigsberk'in yedi köprüsü Şekil 1.1'de gösterilmektedir (Euler, 1953). Problem, bir kişinin bir noktadan başlayarak ve köprülerden sadece bir kez geçerek başladığı noktaya ulaşıp ulaşamayacağıdır.



Şekil 1.1. Konigsberk köprüleri

Problemin çözülemez olduğunu kanıtlamak için Eular her bir araziye bir nokta koymuş ve bu arazileri bağlayan her bir köprüyü de bu noktaları birbirlerine bağlayan çizgi olarak tanımlayarak graf oluşturmuştur. Şekil 1.2'de Konigsberk köprüsüne ait oluşturulan graf yer almaktadır. Eular problemi çözmekle kalmayıp problemi genelleştirmiştir ve hangi durumlarda problemin çözülebileceğini belirlemiştir. Böyle bir problemin çözülebilmesi için grafın birbiri ile bağlantılı olması ve her bir noktanın çift sayıda kenarla ilişkisi olması zorunludur. Kısaca Konigsberk vatandaşının, hangi yöntemi denerse denesin bir noktadan başlayarak ve her köprüden bir defa geçerek başladığı noktaya dönmesi mümkün değildir.



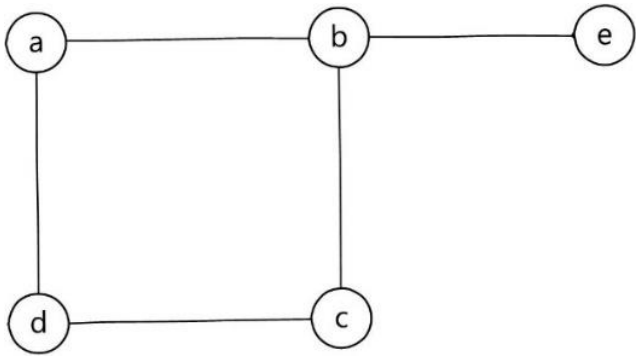
Şekil 1.2. Konigsberk köprü probleminin graf ile gösterimi

1.Graflarla İlgili Temel Kavramlar

Bu bölümde graflarla ilgili genel tanımlamalara yer verilmiştir. Graf teorisi alanında çalışan bilim adamları graf terminolojisini kişiselleştirmişlerdir. Dolayısıyla graf teorisinde kullanılan sembollerde evrensel bir kabul bulunmamaktadır (Dinçer, 2014).

Graf

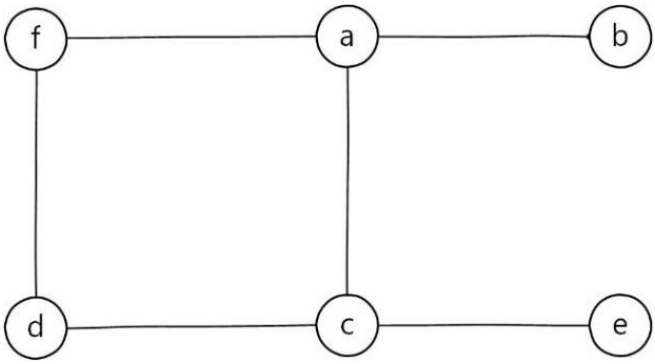
G grafı, V boş kümeden farklı düğümler kümesi ile E kenarlar kümesinden oluşmaktadır ve G= (V, E) ile gösterilmektedir. Grafta, $v_i \in V$ olmak üzere her bir kenar sırası önemli olunmadan $ek\{v_i, v_j\} = vivj$ i, j =(1,2,…,n; k =1,2,…,m) düğüm çifti ile belirlenir. Buradaki v_i ve v_j düğümleri e_k kenarının başlangıç ve bitiş düğümleridir. n düğümlü ve m kenarlı bir graf (n,m) graf olarak adlandırılır. (1,0) grafına aşikar (trivial) graf denir (Harary, 1969). Şekil 1.3'te 5 adet düğüme ve 5 adet kenara sahip bir grafın görseline yer verilmiştir.



Şekil 1.3. (5,5) Graf

Komşu

Bir G grafında u, v ∈ V(G) olmak üzere u, v ∈ E(G) ise u ve v noktaları için **komşu** denilmektedir ve u ∼ v şeklinde gösterilmektedir. e=uv için u ve v noktalarına e kenarının **uç noktaları** denilmektedir (Harary, 1969).
Örneğin bir G grafı için V(G)={a, b, c, d, e, f) ve E(G)={ ab, ac, ce, cf, df } olarak verilsin. Bu kümeler kullanılarak Şekil 1.4'te ki gibi bir graf çizilebilmektedir.



Şekil 1.4. Bir G grafı örneği

Grafın Mertebesi

G = (V,E) grafı için n= | V(G) | şeklinde gösterilmesine **grafın mertebesi**, m= | E(G) | şeklinde gösterilmesine ise **grafın boyutu** denilmektedir. Buradan n grafta bulunan nokta sayısını m ise grafta bulunan kenar sayısını ifade etmektedir (Cangül, 2017; Kaya, 2019).

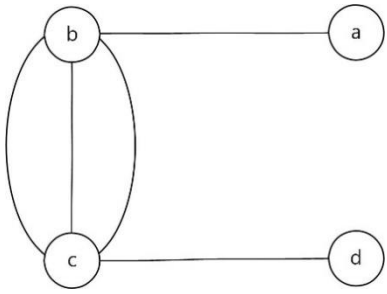
İzole Nokta

Herhangi bir v_i noktasının derecesi v_i noktasına komşu olan düğümlerin sayısı olarak ifade edilir ve d_i olarak isimlendirilir. Derecesi 0 (sıfır) olan noktaya **izole nokta**, derecesi 1 bir olan noktaya ise **pendat** denilmektedir (Bondy & Murty, 1976).

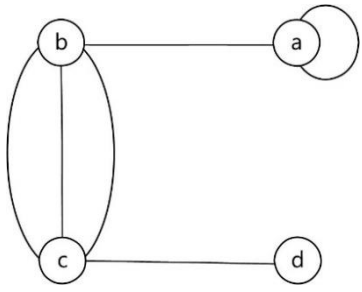
Bir G grafının en az komşuya sahip düğümüne minimum dereceli nokta denir ve $\delta(G)$ ile gösterilmektedir. En çok komşuya sahip olan noktaya ise maksimum dereceli nokta denilmektedir ve $\Delta(G)$ ile gösterilmektedir (Cangül, 2017).

Çoklu Graf - Pseudo Graf

Bir grafta aynı nokta çiftlerini birleştiren iki ya da daha fazla kenara **paralel kenar**, bir noktayı kendisiyle birleştiren kenara **döngü**, paralel kenara sahip ancak döngüsü olmayan grafa **çoklu graf**, paralel kenar ve döngü içeren graflara ise **Pseudo** graf denilmektedir (Harary, 1969). Şekil 1.5'te çoklu graf örneği ve şekil 1.6'da Pseudo (genel) graf örneği gösterilmektedir.



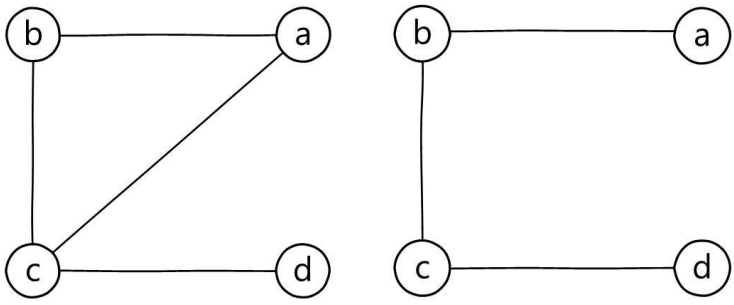
Şekil 1.5. Çoklu Graf



Şekil 1.6. Pseudo Graf

Basit Graf

Döngü ve çoklu kenar içermeyen, yönlü olmayan, sonlu olan grafa basit graf denilmektedir. Basit grafa örnek olarak Şekil 1.7'deki graflar gösterilmektedir.

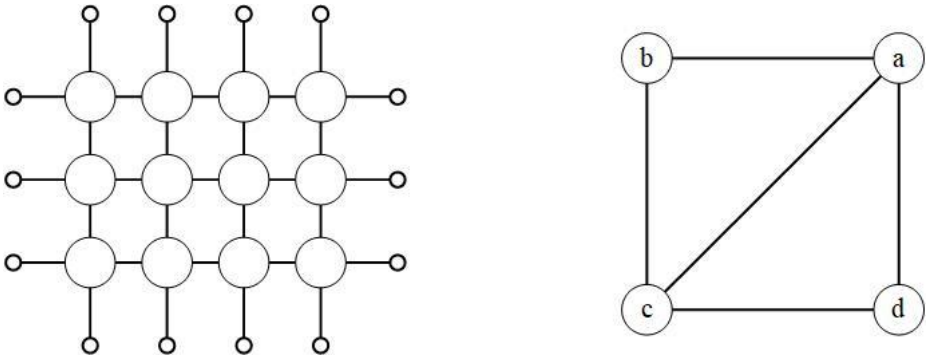


Şekil 1.7. Basit Graflar

Örneğin Şekil 1.7'deki graflar ele alındığında grafların sonlu olduğu, herhangi bir döngü içermediği, yönsüz graf olduğu ve herhangi bir çoklu kenar içermediği görülmektedir (Harary, 1969).

Sonlu – Sonsuz Graflar

Bir graf sonlu sayıda nokta ve kenara sahip ise, bu grafa sonlu graf, aksi durumunda sonsuz graf denir (Aslan, 2017; Bondy & Murty, 1976). Şekil 1.8'de sonsuz ve sonlu graflar gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Sonsuz ve Sonlu Graflar

Bir G grafının m tane kenarı ve v_1,v_2 ,..., v_n ile gösterilen n tane noktası olsun. Bu grafın noktalarının dereceleri toplamı kenar sayısının iki katına eşittir. Matematiksel olarak Denklem 1.1'de belirtilen formülle ifade edilir (Euler, 1736).

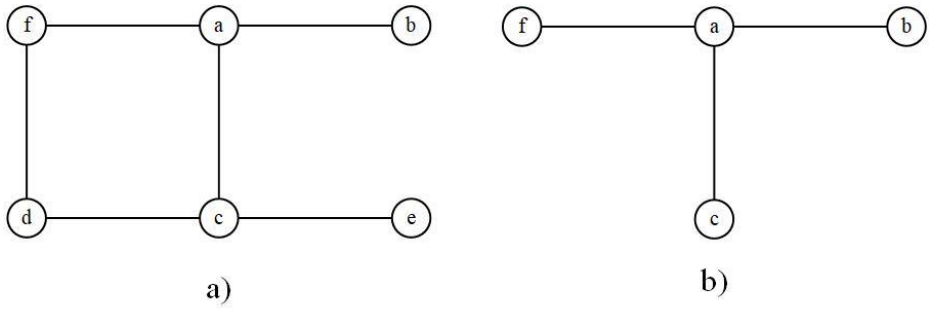
$$\sum_{i=1}^{n} deg(v_i) = \sum_{i=1}^{n} d(v_i) = \sum_{i=1}^{n} d_i = 2m \qquad (1.1)$$

Yürüme

V(G) = {a, b, c,…, k, l, m} kümesi G grafına ait bir nokta kümesi olsun. Art arda p adet kenarın gelmesiyle elde edilen $\underbrace{ab, bc, cd, de, ed, \dots, kl, lm}$ yapısına G grafı için p uzunluğunda bir yürüme denir. Herhangi bir G grafında; aynı noktada başlayan ve yine aynı noktada biten bir yürümeye kapalı yürüme, bütün noktaları ve kenarları birbirinden farklı olan yürümeye yol ve bütün kenarları (başlangıç ve bitiş noktaları hariç) bütün noktaları farklı olan kapalı yürümeye de devir denir (Harary, 1969).

Alt Graf

G(V,E) olarak verilen bir G grafı için V düğüm kümesi ve E kenar kümesi olmak üzere, $V_n \subseteq V$ ve $E_k \subseteq E$ şartını sağlayacak $G^1(V_n, E_k)$ grafı çıkartılabilirse, bu grafa G grafının alt grafı denilmektedir ve G^1 ile gösterilmektedir (Aslan, 2017; Harary, 1969).

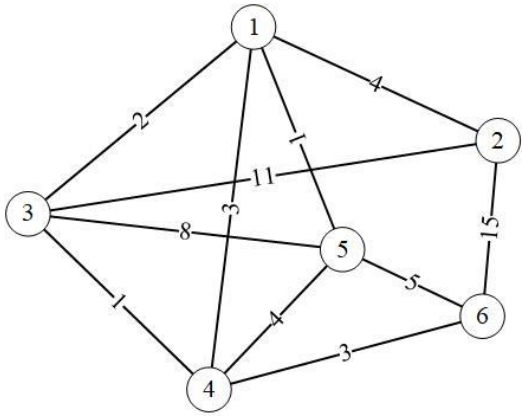


Şekil 1.1. a) G Grafı b) G^1 (G'nin alt Grafı)

Şekil 1.9'da G grafı ve G grafından elde edilebilecek örnek bir G^1 grafı gösterilmektedir. G^1 üssü grafı G grafının alt grafıdır.

Ağırlıklı G raf

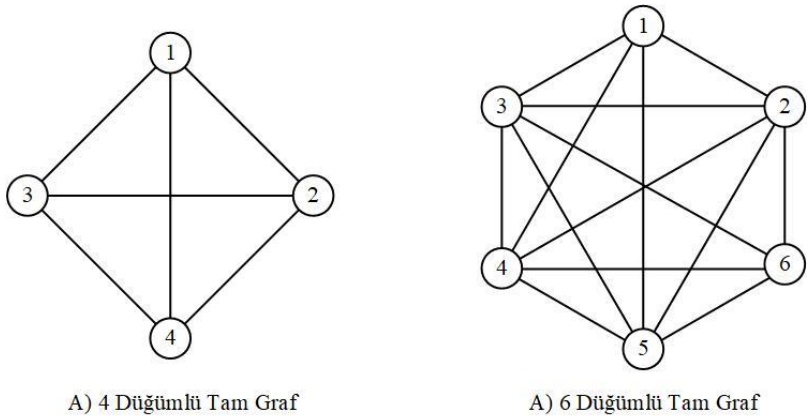
G(V,E) grafı için, kenarlar kümesi E= {a, b, c, d,… }olmak üzere her bir kenarı sayısal bir değere sahip olan G grafına ağırlıklı graf denilmektedir (Aslan, 2017). Her bir ağırlıklı kenar W(e_n) olarak ifade edilmektedir. Şekil 1.10'da ağırlıklı bir G grafı göstermektedir.



Şekil 1.2. Ağırlıklı Graf

Tam Graf

Bir G grafında bir düğüm çoklu kenar olmadan diğer tüm kenarlara bağlanmış ise ve hiç döngü bulunmuyorsa bu G grafına tam graf denilmektedir (Gross & Yellen, 1998). Şekil 1.11'de 4 düğümlü ve 6 düğümlü tam graflara ait örnekler gösterilmektedir.



A) 4 Düğümlü Tam Graf A) 6 Düğümlü Tam Graf

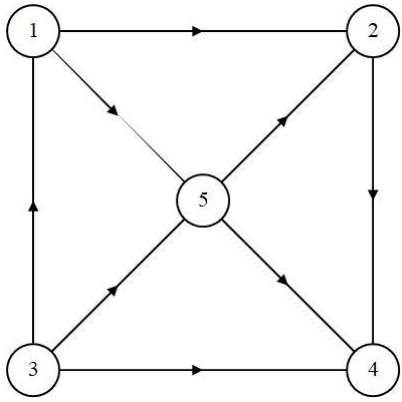
Şekil 1.3. Tam Graf örnekleri

Yönsüz Graf

G(V,E) olarak verilen bir G grafında bulunan bir kenar için başlangıç ve bitiş düğümleri belirtilmemiş ise bu kenara yönsüz denir. Eğer grafın sahip olduğu tüm kenarlar yönsüz ise bu grafa yönsüz graf denir (Skiena, 1990). Şekil 1.11'de verilen graf örneği yönsüz bir grafa örnek olarak gösterilmektedir.

Yönlü Graf

G(V,E) olarak verilen bir G grafında bulunan bir kenar için başlangıç ve bitiş düğümleri belirtilmiş ise bu kenara yönlü denir. Eğer grafın sahip olduğu tüm kenarlar yönlü ise bu grafa yönlü graf denir (Skiena, 1990). Şekil 1.12'de yönlü grafa örnek gösterilmektedir.

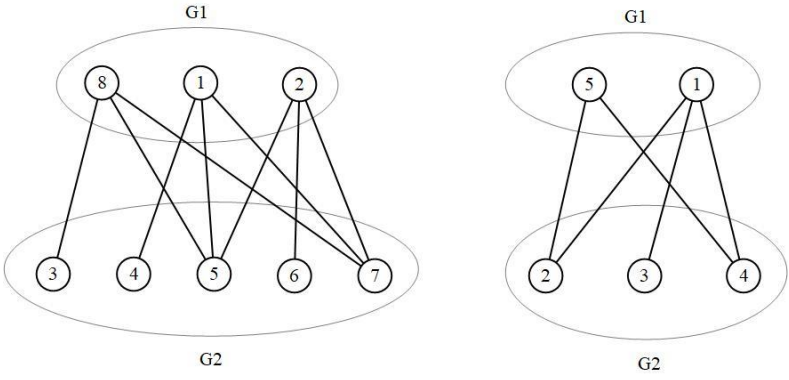


Şekil 1.4. Yönlü Graf

Bipartite Graf

G(V,E) olarak verilen bir G grafı için V, düğümler kümesini temsil etmektedir. Bir grafı oluşturan düğümler kümesi iki farklı kümeye ayrılabiliyorsa buna **bipartite graf** denilmektedir. Ayırma işleminde kullanılacak yöntem, bir kenar ile birbirine bağlanacak düğümleri aynı küme içerisine koymamaktır (Gross & Yellen, 1998). Yani komşu olmayan düğümleri aynı kümede toplamak gerekmektedir. Şekil 1.13'te 8 düğümlü ve 5 düğümlü bipartite graf örnekleri gösterilmektedir. Bir graf eğer bipartite graf ise aşağıdaki şartları sağlamak zorundadır:

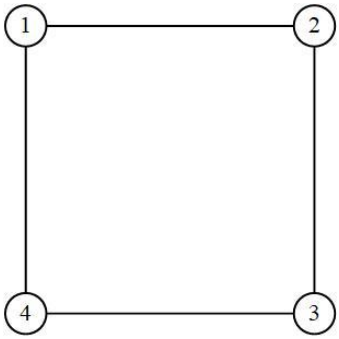
$$V(G_1) \cap V(G_2) \neq \emptyset$$



Şekil 1.5. Bipartite Graflar

Çember Graf

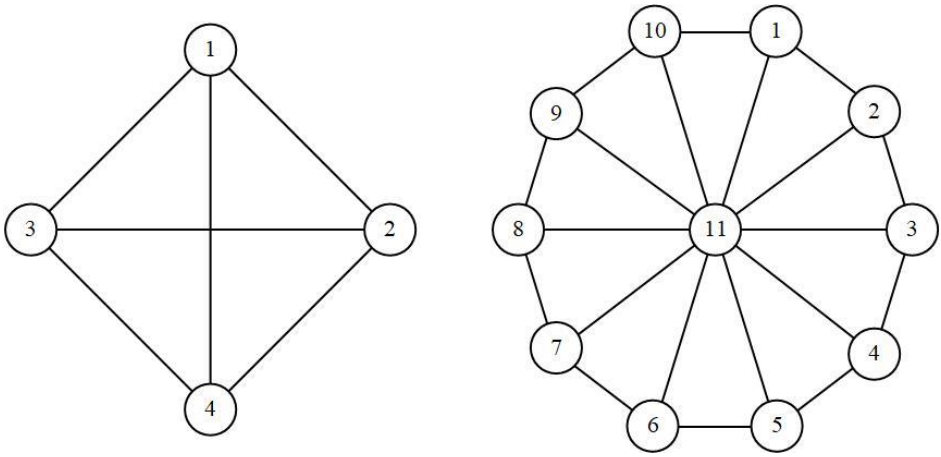
Bir $G(V,E)$ grafını oluşturan düğümlerin birbirleri ile çember yapısında bağlantılı olmasına "çember graf " denir. Çember graf C_n olarak tanımlanır. n grafı oluşturan düğüm sayısıdır. Çember graf düğüm sayısının tek ya da çift olması durumuna göre tek çember graf ya da çift çember graf olarak adlandırılır (Gross & Yellen, 1998). Şekil 1.14'te verilen 4 düğümlü graf bir çift çember graf örneğidir.



Şekil 1.6. Çember Graf

Tekerlek Graf

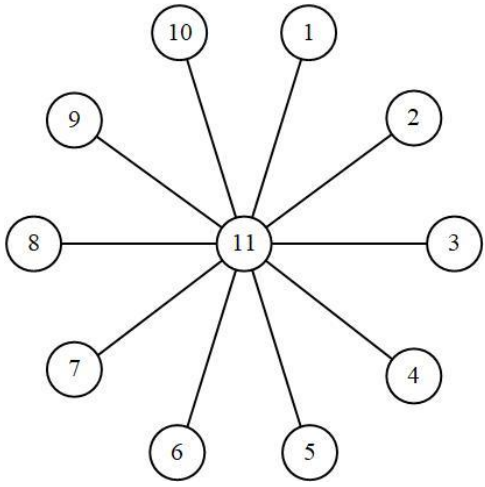
Çember grafa, ortaya yeni bir düğüm eklenerek oluşturulan yeni grafa tekerlek graf denilmektedir. Tekerlek graf W_n olarak gösterilir. n grafı oluşturan düğüm sayısıdır (Gross & Yellen, 1998; Harary, 1969). Tekerlek graf $K1+Cn-1$ olarak da tanımlanabilir. $K1$ tek düğümlü grafı, $Cn-1$ ise $n-1$ düğümlü çember graftır. Şekil 1.15'te verilen graflar tekerlek graf örnekleridir.



Şekil 1.75. Tekerlek Graflar

Yıldız Graf

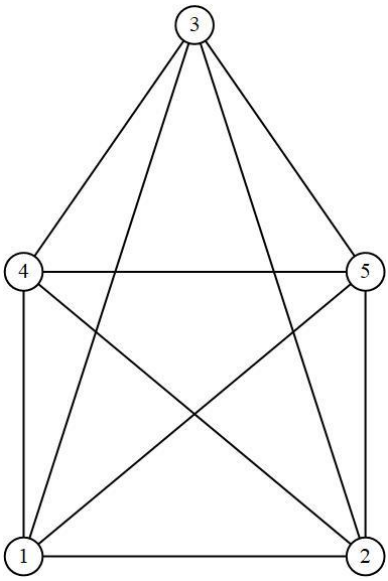
Kenarların bağlantısı yıldız görünümünde olan grafa yıldız graf denilmektedir. n düğümlü bir $G(V,E)$ grafı için yıldız graf S_n ile gösterilir. Yıldız grafta merkez düğümün derecesi $n-1$ iken, diğer tüm düğümlerin dereceleri daima 1'dir (Aslan, 2017; Harary, 1969). Şekil 1.16'da yıldız grafa ait örneğe yer verilmektedir.



Şekil 1.8. Yıldız Graf

Regüler Graf

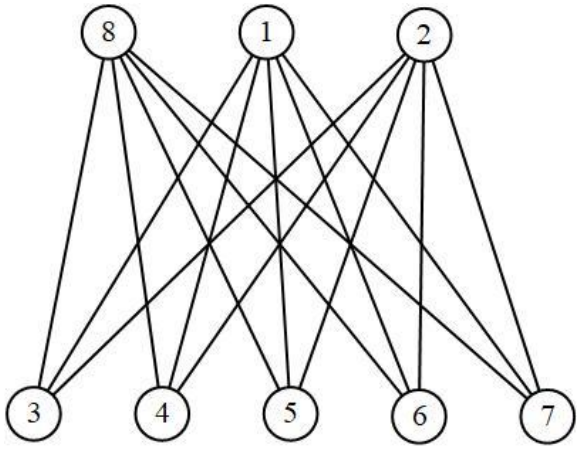
Verilen bir $G(V,E)$ grafında bulunan düğümlerin derecesi aynı ve r gibi bir sayıya eşitse, bu graf düzenli bir dağılım göstermiştir. Tüm düğümlerin derecesi r olduğundan, bu grafa "regüler graf" ya da "r-regüler" graf denilmektedir. Şekil 1.17'de 4-regular grafa örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.9. 4-Regular Graf

Tam Bipartite Graf

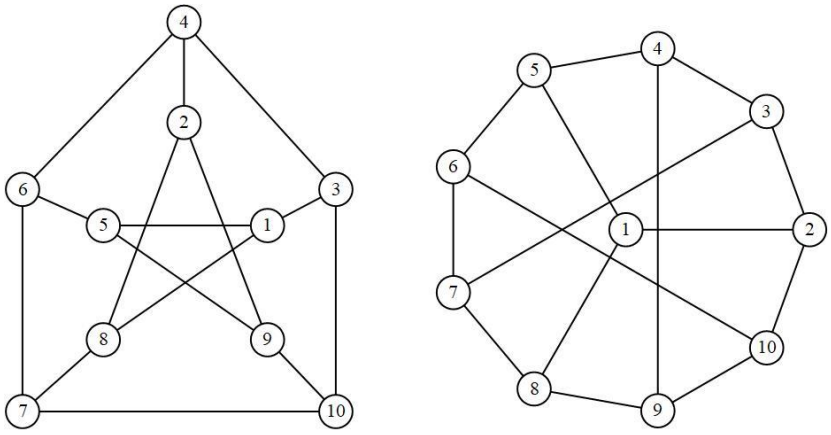
$G(V,E)$ olarak verilen bir bipartite grafta eğer iki ayrı kümede bulunmakta olan düğümlerin her biri diğer kümedeki tüm düğümler ile bağlantılı ise bu grafa "tam bipartite graf" denir (Aslan, 2017; Gross & Yellen, 1998; Kaya, 2019). V düğümler kümesi olmak üzere Şekil 1.13'te gösterilmekte olan 8 düğümlü graf için $\mathrm{VA} = \{\mathrm{v1}, \mathrm{v2}, \mathrm{v8}\}$ ve $\mathrm{VB} = \{\mathrm{v3}, \mathrm{v4}, \mathrm{v5}, \mathrm{v6}, \mathrm{v7}\}$ olacak şeklinde iki ayrı kümeye ayrılabilmektedir. Şekil 1.18'de verilen grafta VA kümesinde yer alan her bir düğüm, VB kümesinde yer alan tüm düğümler ile bağlantılıdır.



Şekil 1.10. Tam Bipartite Graf

Petersen Grafı

1989 yılında Julius Petersen tarafından bulunan grafa **Petersen grafı** denilmektedir. Petersen grafı 10 düğüm ve 15 kavisten oluşmaktadır (West, 2001). Petersen grafında tüm düğümler sadece üç renk kullanılarak boyanabilmektedir. Petersen grafı aynı zamanda $3-reg\ddot{u}ler$ graftır. Şekil 1.19'da Petersen grafının farklı çeşitleri verilmiştir.



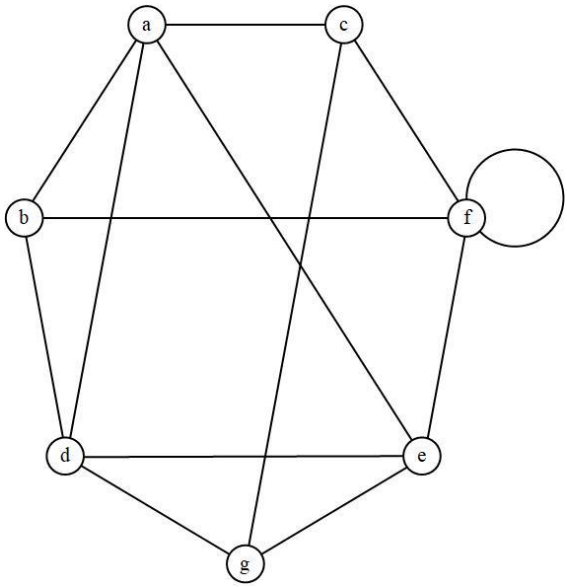
Şekil 1.19. Peterson Grafı

Komşuluk Matrisi

Bağlantı matrisi olarak da bilinen komşuluk matrisi, komşu düğümlerin kenar bağlantılarına göre belirlenmektedir (West, 2001). G=(V,E) olarak

verilen graf için düğüm kümesi V=$\{va,vb,\ldots..vn\}$ olarak tanımlanmaktadır. G grafı için komşuluk matrisi Denklem 3.2'de verilen eşitliğe göre oluşturulmaktadır. Şekil 1.20'de verilen yönsüz graf örneği için oluşturulan komşuluk matrisi Tablo 1.1'de verilmiştir. G grafı için komşuluk matrisi a_{ij}, v_i ve v_j'yi bağlayan kenar sayısı olmak üzere, bu ilişki A matrisi üzerinde gösterilmiştir. Yönsüz bir grafta komşuluk matrisi v_i ve v_j'yi birbirine bağlayan kavislerin sayısını gösterdiğinden dolayı a_{ij} ve a_{ji} hücrelerindeki sayısal değerler birbirine eşit olmalıdır. Yani komşuluk matrisi simetrik olmalıdır. Komşuluk matrisi ile herhangi bir düğümün derecesi kolayca belirlenebilir. Örneğin v_1 düğümü için düğüm derecesi hesaplanırken, bu düğüm için döngü yoksa bu düğümün derecesi A matrisinin birinci satırındaki değerlerin toplamıdır. Her bir döngü dereceyi iki kat arttırdığından birinci düğüm için düğüm derecesi hesaplanırken hesaplama işlemi doğru yapılmalıdır. Komşuluk matrisinin birinci satırındaki değerler toplanırken komşuluk matrisinde birinci düğümün döngü içeren bağlantı değerinin iki katı alınarak hesaplama yapılmaktadır (Aslan, 2017; West, 2001).

$$A = \begin{Bmatrix} 1, Eğer\ V_i\ ile\ V_j\ arasında\ kenar\ bağlantısı\ var\ ise \\ 0, Eğer\ V_i\ ile\ V_j\ arasında\ kenar\ bağlantısı\ yok\ ise \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$



Şekil 1.11. Graf örneği

Tablo 1.1. Komşuluk matrisi

A	V_a	V_b	V_c	V_d	V_e	V_f	V_g
V_a	0	1	1	1	1	0	0
V_b	1	0	0	1	1	1	0
V_c	1	0	0	0	0	1	1
V_d	1	1	0	0	1	1	1
V_e	1	1	0	1	0	1	1
V_f	0	1	1	1	1	1	0
V_g	0	0	1	1	1	0	0

Şekil 1.20'de verilen G grafı yönsüz döngü içeren ve ağırlıksız bir gaftır. Ağırlıksız graf olduğundan dolayı her kenarın ağırlığı birbirine eşit olmaktadır. Örneğin v_f düğümünün düğüm derecesi Tablo 1.1'de verilen komşuluk matrisine göre hesaplanacak olursa; bu düğümün derecesi Denklem 1.3'te verilen yöntem ile hesaplanmaktadır.

$$Deg(V_f) = 1 * a_{11} + 1 * a_{12} + 1 * a_{13} + 1 * a_{14} + 2 * a_{15} + 1 * a_{16} + 1 * a_{17} \quad (1.3)$$

F düğümünde döngü olduğu için a_{15} hücresi iki ile çarpılmıştır. Sonuç hesaplandığında $Deg(v_f)= 6$ olarak bulunmuştur.

2.Graflarda Arama Algoritmaları

Bilindiği üzere Gezgin Satıcı Problemi (Travelling Salesman Problem, TSP) Konigsberk köprü problemi gibi, başlangıç noktası olarak seçilen herhangi bir noktadan başlayarak noktaların her birine birer defa uğrayıp başlangıç noktasına tekrar dönme işlemini en az maliyetle yapma problemdir. Graf veri modelinde aranan rotayı bulmak için veya veri modelinde herhangi bir düğümü bulmak için çeşitli özelliklere sahip arama algoritmaları geliştirilmiştir.

Genişlik Öncelikli Arama

Genişlik Öncelikli Arama (Breadth First Search – BFS) algoritması Türkçe olarak genişlik öncelikli arama şeklinde ifade edilebilmektedir. BFS, bir başlangıç düğümünden başlayarak bu düğüme bağlı düğümleri dolaşan arama algoritmasıdır. Bu arama algoritmasında amaç önce başlangıç düğümüne yakın düğümlere bakmaktır (Çölkesen, 2014).

Derinlik öncelikli Arama

Derinlik öncelikli Arama (Depth First Search – DFS) graf üzerinde arama algoritmalarından bir tanesidir. Başlangıç düğümünün bir kenarından başlayarak o kenar üzerinden gidilebilecek en son düğüme kadar gidilir, aranan düğüm bulunmadıysa başlangıç düğümünün diğer kenarından aynı şekilde devam edilir. Bu durum aranan hedef düğüm bulunana kadar veya tüm düğümler dolaşılana kadar devam etmektedir. Yani derinlik öncelikli arama algoritmasının ilk önce alt seviyesinde bulunan komşu düğümleri araması durumudur.

Floyd-Warshall Algoritması

Bilgisayar bilimlerinin önemli konularından olan algoritma analizi sırasında sıkça bahsi geçen Floyd-Warshall algoritmasının ana amacı belirli bir graf üzerinde bir başlangıç düğümünden bitiş düğümüne giden en kısa yolu bulmaktır.

Sabit Maliyet Araması

Sabit maliyet algoritma (uniform cost search) ağırlıklı graflar üzerinde çalışmaktadır. Ağaçlar da grafın bir çeşidi olduğu için algoritmanın ağaçlar üzerinde çalışması da mümkündür. Algoritma basitçe aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

1. Kök düğümden başla (root node)
2. En düşük maliyetli komşuya git
3. Eğer aranan düğüm bulunduysa bit, bulunmadıysa 2. Adıma geri dön

Prim asgari tarama ağacı Algoritması

Bir asgari tarama ağacı algoritması olan Prim algoritması, işaretlemiş olduğu komşuluklara en yakın düğümü bünyesine katarak ilerler. Prim algoritmasında rasgele bir başlangıç noktası seçilir. Bu düğümden gidilebilecek komşular listelenir. Prim algoritması bu listedeki en küçük maliyetli komşuyu bünyesine dahil eder.

Dijkstra Algoritması

Dijkstra algoritması bir graftaki bir düğümden diğer bütün düğümlere giden en kısa yolu hesaplamak için kullanılmaktadır. Algoritma başlangıçta bütün düğümlere henüz erişim olmadığını kabul ederek sonsuz (∞) değeri atar. Ardından başlangıç düğümünün bütün komşu düğümlerini dolaşarak bu

düğümlere ulaşım maliyetini günceller. Bu güncelleme işleminden sonra güncellenen düğümlerin komşularını günceller ve bütün düğümler güncellenene ve graf üzerinde yeni bir güncelleme olmayana kadar bu işlem devam eder. Algoritma ne yazık ki eksi (-) değer taşıyan bir kenar bulunması halinde eksi (-) değerdeki kenarın sürekli olarak mevcut durumdan daha iyi bir sonuç üretmesi ve algoritmanın hiçbir zaman için kararlı hale gelememesinden dolayı başarılı çalışmaz.

Kruskal Asgari Tarama Ağacı Algoritması

Bir asgari tarama ağacı (minimum spanning tree) algoritması olan Dijkstra algoritması, işaretlemiş olduğu komşuluklara en yakın düğümü bünyesine katarak ilerler. Kruskal algoritmasında bütün yollar listelenip küçükten büyüğe doğru sıralanır. Yukarıdaki liste çıkarıldıktan sonra sırasıyla en küçükten en büyüğe doğru komşuluklar işaretlenir. Bu işaretleme sırasında ada grupları ve grupların birbiri ile ilişkisine dikkat edilir. Yani şayet listedeki iki düğüm harfi de aynı adadan ise bu bağlantı atlanır.

Bellman Ford Algoritması

Bu algoritmanın amacı, bir graf üzerindeki, bir düğümden belirli bir düğüme giden en kısa yolu bulmaktır. Bu bakımdan en kısa yol bulma algoritması olarak sınıflandırılabilir. Algoritma ağırlıklı graflar üzerinde çalışır. Kabaca, bütün düğümler için bütün kenarları dolaşır. Algoritma Dijkstra algoritmasında olduğu gibi en küçük değere sahip olan kenardan gitmek yerine graf üzerindeki bütün kenarları test eder. Bu sayede her düğüme sadece bir kere bakarak en kısa yolu bulmuş olur.

Yinelemeli Derinlik Araması

Bilgisayar bilimlerinin çeşitli alanlarında kullanılan arama algoritmalarından birisidir. Algoritma, DFS üzerine kurulu olduğu için, literatürde “iterative deepening depth first search (yinelemeli derinleşen, derin öncelikli arama)” olarak da geçmektedir. Algoritma basitçe derinlik değerini bir değişkende tutmakta ve bu değeri her adımda arttırmaktadır. Yineleme yapısı basit bir döngü olarak düşünülebilir ve her adımda derinliğin, bir döngü değişkeni gibi düşünülerek derinleştiği kabul edilebilir.

3.Grafların Hafızada Tutulma Yöntemleri

Grafların bellekte tutulması veya işlem yapılmasıyla ilgili birçok yöntem bulunmaktadır. Grafın yapısı veya uygulamanın gereksinimlerine göre bu yöntemlerden biri tercih edilmektedir.

Grafın Matris Üzerinde Tutulması

Bir grafın komşuluk matrisi ya da bitişiklik matrisi biliniyorsa kullanılan programlama diline uygun olarak matris formatında bildirilmesiyle hafızada tutulmaktadır. Bu şekilde bir grafın düğümleri arasındaki ilişkiyi bir matrisin satır ve sütunları arasındaki ilişkiye dönüştürülmektedir. Matrisin veri türü uygulamaya veya üzerinde yapılacak işleme göre ya temel veri türü ya da struct yapıda olabilmektedir. Matrislerin genelde ağırlıksız, yönsüz ve basit graflar için kullanılması daha uygun olmaktadır.

Grafın İki Dizi Üzerinde Tutulması

Bir graf iki farklı dizi kullanılarak da bellekte tutulabilmektedir. Dizilerden birincisi komşuluk matrisini kullanarak kenarlara ait bağlantı bilgisini tutmaktayken, diğer dizi ise kenarların hangi düğümlerle bağlantılı olduğu bilgisini tutmaktadır. Sadece var olan kenar bilgisini tutmalarından dolayı özellikle seyrek grafların kullanımında daha uygun olmaktadır(Çölkesen, 2014).

Grafın Bağlantılı Liste Üzerinde Tutulması

Bir grafın bağlı liste ile tutulabilmesi için her bir düğüm için bağlantılarını da gösterecek bir veri yapısının tanımlanmasıyla mümkün olabilmektedir. Düğüm veri yapısı, en kötü durumda tüm bağlantıları içerecek işaretçilere sahip olmaktadır. Yani derecesi en büyük düğümün tüm bağlantılarını içerecek bir yapıya sahip olmak zorundadır. Bir grafın ağırlıklı- ağırlıksız, yönlü- yönsüz olmasına göre listenin veri yapısı da farklılık göstermektedir. Bağlı listelerde derecesi yüksek ama seyrek grafların kullanılması bellek israfına neden olabilmektedir. Bellek israfını önlemek için ara veri yapıları kullanılabilir.

Dizili - Bağlantılı Liste Üzerinde Tutulması

Bir graf dizili-bağlı listede de tutulabilmektedir. Burada, düğümler dizi üzerinde tutulur ve düğümlere olan bağlantı, bağlantılı liste şeklinde dizinin üzerindeki ilgili düğümüne bağlanır.

3.1.Grafların Bellekte Tutuma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Graflar çeşitli yöntemlerle belleklerde saklanabilmektedir. Bu yöntemlerin karşılaştırılması ihtiyaç duydukları bellek alanı ve bazı işlemleri yürütme zamanı açısından yapılabilmektedir. Algoritma tasarımcısının uygulama yöntemini belirlerken hangi yöntemin daha iyi olacağını görmesi gerekmektedir. Tablo 1.2'de bu yöntemlerin karşılaştırılması görülmektedir (Çölkesen, 2014). Karşılaştırma parametrelerinin anlamları şu şekildedir:

N: Düğüm Sayısı M: Kenar Sayısı b: sizeof (Veri Türü)
d: Düğüm Derecesi c: Çevrimli Kenar Sayısı a: sizeof (bellek adresi)

Tablo 1.2. Grafların bellekte tutulma yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Bellek Gereksinimi	Bağlantı Sorgulama	Bağlantı Ekleme
Matris Üzerinde	$N^2 * b$	$O(1)$	$O(1)$
İki Dizi ile	$\big((2 * M - c) + (N + 1)\big) * b$	$O(d)$	$O(M)$
Bağlantılı Listeyle	$N * (b + (d * a))$	$O(N^2)$	$O(N^2)$
Dizili-Bağlantılı Listeyle	$(N + 2 * M) * (b + a)$	$O(d)$	$O(d)$

Tablo 3.2 incelendiğinde düğüm sayısı arttıkça bellek gereksinimi de artmaktadır. Yöntem seçerken göz önünde bulundurulması gereken en önemli bağıntı bellek olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Daha sonraki aşamalarda bağlantı sorgulama ve bağlantı ekleme bağıntıları gelmektedir. Tasarımcı yöntemi seçerken bu özelliklerini dikkate alarak herhangi bir yöntemi seçebileceği gibi bu yöntemlerin birlikte kullanıldığı hibrit bir yöntem de seçebilmektedir.

REFERANSLAR

Aslan, M. (2017). *Graflarda Düğüm Boyama Problemi İçin Kurbağa Sıçrama Algoritmasi Tabanli Bir Yaklaşim* Konya: Yüksek Lisans Tezi.

Bondy, J. A., ve Murty, U. S. R. (1976). *Graph Theory with Applications*. Newyork: The Macmillan Press.

Cangül, İ. N. (2017). *Graf Teori – I Temel Konular*: Dora Basım Yayınevi.

Çölkesen, R. (2014). Graf Veri Modeli. In *Veri Yapıları ve Algoritmalar* (pp. 349-384): Papatya Yayıncılık.

Dinçer, S. (2014). Sayılar Teorisinin Graf Teoride Uygulamaları. In. Konya: Yüksek Lisans Tezi.

Euler, L. (1736). Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis Comment. *Academiae Sci. I. Petropolitanae*(8), 128-140.

Euler, L. (1953). Leonhard Euler and the Königsberg bridges. *Scientific American, 189*(1), 66-72.

Gross, J. l., & Yellen, J. (1998). *Graph Theory and Its Applications*: CRC Press.
Harary, F. (1969). *Graph Teory*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company.
Kaya, B. (2019). Graflardaki Bazı Parametreler ve Aralarındaki Bağıntılar. In. Konya: Yüksek Lisans Tezi.
Skiena, S. (1990). *Implementing Discrete Mathematics: Combinatorics and Graph Theory with Mathematica*: Addison-Wesley.
West, D. B. (2001). *Introduction to Graph Theory*. New Jersey: Prentice-Hall.

Fırçasız Doğru Akım Motorunun Pozisyon Hata Analizi

Muhammet ATEŞ[1*]

Muzaffer ATEŞ[2]

[1] Elektronik ve Otomasyon Bölümü / Van Meslek Yüksekokulu, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye
[2]Elektrik Mühendisliği Bölümü, / Mühendislik Fakültesi , Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye
[*](mts@yyu.edu.tr)

ÖZET

Bu çalışma, Fırçasız Doğru Akım (Brushless Direct Current -BLDC) motorlarının pozisyon hata analizi ve kontrolü için Lyapunov kararlılık yöntemine dayalı bir yaklaşım sunmaktadır. BLDC motorlar; yüksek verimlilik, hızlı tepki süresi ve kompakt yapıları sayesinde hassasiyet gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde rotorun istenilen pozisyona kararlı ve doğru bir şekilde ulaşması büyük önem taşımaktadır. Motorun mekanik dinamiği, elektromanyetik tork ile rotorun açısal konumu ve hızı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ikinci dereceden doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemle modellenmiştir. Pozisyon takip hatasının sıfıra asimptotik olarak yakınsamasını sağlamak için Lyapunov temelli bir kontrol yasası tasarlanmıştır.

Pozisyon hatası $e_\theta = \theta_d - \theta$ ve türevi kullanılarak, sistemin toplam hata enerjisini temsil eden bir Lyapunov fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu fonksiyonun türevi analiz edilerek ve uygun kontrol kazançları seçilerek, kapalı çevrim sistemin küresel asimptotik kararlılığını garanti eden bir tork girişi elde edilmiştir. Önerilen yöntem, yük torku gibi sabit bozuculara karşı dayanıklıdır ve tüm sistem parametrelerinin hassas bilinmesini gerektirmez. Simülasyon sonuçları, Lyapunov tabanlı denetleyicinin kararlı ve hassas pozisyon takibi sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Dinamik Sistemler, Doğrusal Olmayan Kontrol, Fırçasız DC Motor (BLDC), Kararlılık Analizi, Lyapunov Kararlılığı, Pozisyon Hata Dinamiği, Pozisyon Takibi.

I. GİRİŞ

Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motorları, geleneksel doğru akım motorlarına kıyasla daha yüksek verimlilik, daha uzun ömür, daha az bakım gereksinimi ve sessiz çalışma avantajları sunması nedeniyle son yıllarda özellikle endüstriyel otomasyon, robotik sistemler, elektrikli araçlar ve havacılık gibi hassas hareket kontrolü gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. BLDC motorların yapısal özellikleri, rotor üzerinde sargı bulunmaması ve elektronik komütasyon sayesinde sürtünme kaynaklı enerji kayıplarının azaltılması gibi avantajları da beraberinde getirir. Ancak bu motorlar, doğrusal olmayan ve zamanla değişebilen dinamik davranışlar sergilediğinden, yüksek performanslı kontrol sistemlerine ihtiyaç duyarlar.

Konum kontrolü, BLDC motorların en kritik kontrol problemlerinden biridir. Özellikle motorun belirli bir referans pozisyona hızlı, doğru ve kararlı bir şekilde ulaşması gereken uygulamalarda, basit klasik kontrol yöntemleri (örneğin orantısal-integral-türevsel - PID kontrol) yetersiz kalabilmektedir.

Bu nedenle, sistemin kararlılığını doğrudan garanti altına alabilecek daha güçlü kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Lyapunov kararlılık teorisi**,** sistem dinamiklerine dayalı olarak kararlı kontrol yasalarının türetilmesini sağlayan matematiksel bir yöntem olarak öne çıkmaktadır [3].

Lyapunov yöntemi, kontrol sisteminin hatasını tanımlayan bir enerji fonksiyonunun (Lyapunov fonksiyonu) zamanla azalmasını sağlayacak kontrol yasalarının tasarlanmasına olanak tanır. Bu yöntemle oluşturulan kontrolcü, sistemin referans pozisyona olan uzaklığını azaltarak hem pozisyon hem de hız hatasının asimptotik olarak sıfıra yakınsamasını garanti eder. Ayrıca bu yaklaşım, yük torku gibi sabit veya yavaş değişen bozuculara karşı da dayanıklıdır. Nitekim literatürde, Lyapunov temelli kontrol stratejilerinin BLDC motorların hem hız hem de pozisyon kontrolünde başarılı bir şekilde uygulandığı gösterilmiştir [4][5].

Bu çalışmada, BLDC motorun mekanik modeli temel alınarak Lyapunov teorisine dayalı bir konum kontrolü yaklaşımı sunulmuştur. Belirlenen Lyapunov fonksiyonunun türevi kullanılarak, sistemin global asimptotik kararlılığını sağlayan bir tork kontrol yasası türetilmiştir. Sunulan yöntem, özellikle referans takibi ve hata bastırma performansını artırmak isteyen uygulamalar için etkili, kararlı ve uygulamaya uygun bir çözüm sunmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Brushless DC (BLDC) motorların dinamik davranışı, elektriksel ve mekanik bileşenlerin etkileşimine bağlı olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada, pozisyon kontrolü için öncelikle motorun mekanik dinamikleri temel alınmıştır. Rotorun açısal hareketi, Newton'un ikinci hareket yasasına dayanarak aşağıdaki diferansiyel denklemle modellenir:[1]

$$J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) = T_e(t) - T_L(t) \tag{1}$$

$\theta(t)$ rotorun açısal pozisyonunu (radyan cinsinden),

$\dot{\theta}(t)$ açısal hızını,

$\ddot{\theta}(t)$ açısal ivmesini ifade eder.

Parametreler;

J motorun rotor atalet momenti ($\mathrm{kg \cdot m^2}$),

B viskoz sürtünme katsayısı ($\mathrm{N \cdot m \cdot s/rad}$),

$T_e(t)$ elektromanyetik tork ($\mathrm{N \cdot m}$), motorun kontrol girdisidir,

$T_L(t)$ yük torku ($\mathrm{N \cdot m}$), sistem üzerinde etkili olan dış yük veya bozucu torku temsil eder.

Elektriksel dinamikler, genellikle yüksek bant genişliği nedeniyle pozisyon kontrolünde yavaş değişen mekanik değişkenlere göre ikinci planda bırakılmakta ve elektromanyetik tork T_e, kontrol edilebilir giriş olarak kabul edilmektedir. Bu kabul ile motorun pozisyon dinamiği, doğrusal olmayan ancak kontrol edilebilir ikinci dereceden sistem olarak ele alınır.

Bu model, motorun gerçek zamanlı pozisyon kontrolü için yeterli doğrulukta olup, kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde temel teşkil eder.

Durum Uzayı Modeli

Modelin kontrol tasarımı için, aşağıdaki durum değişkenleri seçilir:

$x_1 = \theta$ (pozisyon), $x_2 = \dot{\theta}$ (hız)

Kontrol girdisi olarak elektromanyetik tork $u = T_e$ alınır.

Böylece sistem şu şekilde yazılır:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{1}{J}(u - Bx_2 - T_L) \end{cases} \tag{2}$$

Bu model, doğrusal olmayan kontrol tekniklerinin uygulanmasına olanak sağlar.

BLDC motorun konum kontrolü amacı doğrultusunda, sistemin performansını değerlendirmek için referans pozisyon ile gerçek pozisyon arasındaki farkın belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$e_\theta(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \tag{3}$$

Burada,

$\theta_d(t)$: İstenen referans pozisyon (rad), $\theta(t)$: Motorun gerçek pozisyonu (rad), $e_\theta(t)$: Pozisyon hatası (rad).

Pozisyon hatasının zamana göre türevi ise, referans açısal hız ile gerçek açısal hız arasındaki farkı ifade eder:

$$\dot{e}_\theta(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)$$

$\dot{\theta}_d(t)$: Referans açısal hız (rad/s), $\dot{\theta}(t)$: Gerçek açısal hız (rad/s).

Kontrol sisteminin temel amacı, pozisyon hatasının zamanla asimptotik olarak sıfıra yaklaşmasını sağlamaktır. Bu durum, sistemin referans trajektörünü doğru ve kararlı bir şekilde takip ettiğini gösterir. Bu bağlamda, hata değişkenlerinin kontrol performansının analizinde merkezi bir rol oynadığı söylenebilir.

Sistemin kararlılığını analiz edebilmek ve pozisyon kontrolü için uygun bir kontrol yasası türetebilmek amacıyla, klasik Lyapunov kararlılık teorisine dayalı olarak bir Lyapunov aday fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu fonksiyon, sistemin hata enerjisini temsil eden ve pozitif tanımlı özellik taşıyan bir enerji benzeri skaler büyüklüktür.

Pozisyon hatası $e_\theta(t)$ ve hata türevi $\dot{e}_\theta(t)$ kullanılarak aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu seçilmiştir:

$$V(e_\theta, \dot{e}_\theta) = \frac{1}{2} e_\theta^2 + \frac{1}{2} \dot{e}_\theta^2 \tag{4}$$

Bir sistemin kararlılığını analiz edebilmek için seçilen Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi, sistemin dinamik denklemleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Bir önceki bölümde tanımlanan Lyapunov aday fonksiyonu şu şekildedir:

$$\dot{V} = e_\theta \dot{e}_\theta + \dot{e}_\theta \ddot{e}_\theta = \dot{e}_\theta (e_\theta + \ddot{e}_\theta) \tag{5}$$

Burada $\ddot{e}_\theta$, sistemin ikinci türevidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$\ddot{e}_\theta = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \tag{6}$$

Denklem 1'de Motorun mekanik dinamiğinden $\ddot{\theta}$ yalnız bırakılırsa,

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J}(T_e - B\dot{\theta} - T_L) \tag{7}$$

Dolayısıyla, hata ikinci türevi şu şekilde yazılabilir

$$\ddot{e}_\theta = \ddot{\theta}_d - \frac{1}{J}(T_e - B\dot{\theta} - T_L) \tag{8}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevinin negatif tanımlı olması için kontrol girdisi olan elektromanyetik tork T_e'nin uygun şekilde belirlenmesi gerekir.

Tork girişini şu şekilde seçelim:

$$T_e = J\left(\ddot{\theta}_d + k_1 \dot{e}_\theta + k_2 e_\theta\right) + T_L + B\dot{\theta} \tag{9}$$

Burada $k_1 > 0$ ve $k_2 > 0$ olup kontrol kazançlarıdır.

Bu kontrol yasası, sistemin hatalarını bastırarak Lyapunov fonksiyonunun türevinin negatif tanımlı olmasını garanti eder.

Kontrol girişini denklem 9'da yerine yazarsak:

$$\ddot{e}_\theta = \ddot{\theta}_d - \frac{1}{J}\left(J\left(\ddot{\theta}_d + k_1 \dot{e}_\theta + k_2 e_\theta\right) + T_L + B\dot{\theta} - T_L - B\dot{\theta}\right) \tag{10}$$

Basitleştirirsek:

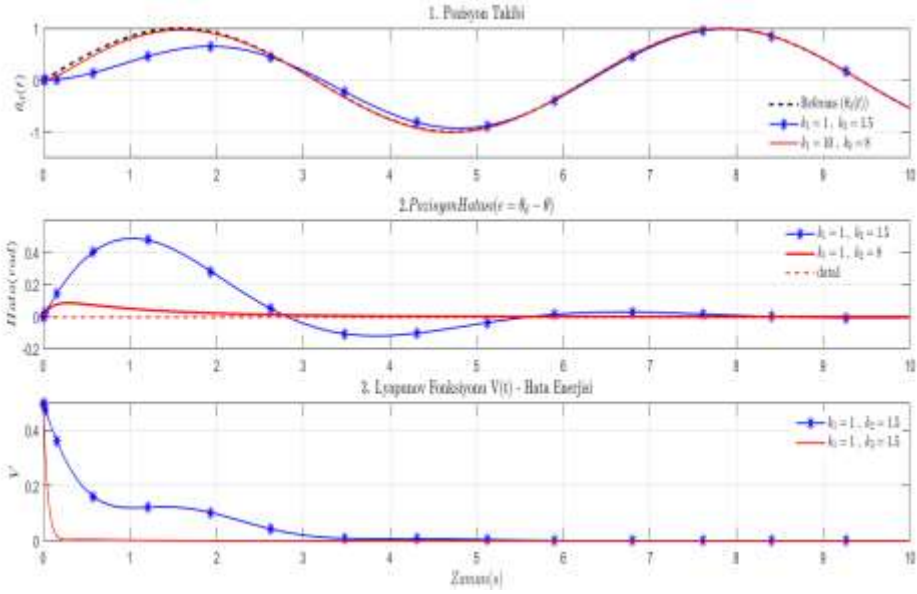
$$\ddot{e}_\theta = \ddot{\theta}_d - (\ddot{\theta}_d + k_1\dot{e}_\theta + k_2 e_\theta) = -k_1\dot{e}_\theta - k_2 e_\theta \qquad (11)$$

Burdan da Lyapunov fonksiyonun türevi ise aşağıdaki gibi olur

$$\dot{V} = \dot{e}_\theta(e_\theta + \ddot{e}_\theta) = \dot{e}_\theta(e_\theta - k_1\dot{e}_\theta - k_2 e_\theta) = -k_1\dot{e}_\theta^2 + (1-k_2)e_\theta\dot{e}_\theta \qquad (12)$$

$k_1 > 0$ seçilirse, $-k_1\dot{e}_\theta^2$ terimi daima negatiftir ve hata enerjisinin tüketilmesini (sönümleme) sağlar.

$k_2 = 1$ seçilirse, $(1-k_2)e_\theta\dot{e}_\theta$ terimi sıfırlanır ve $\dot{V} = -k_1\dot{e}_\theta^2 \le 0$ elde edilir. Bu, sistemin asimptotik olarak kararlı olduğunu ispatlar.

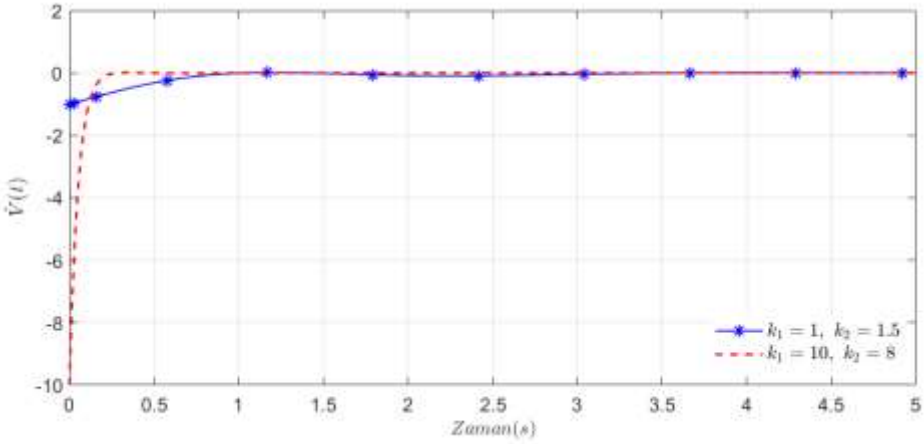


Şekil1. Lyapunov Tabanlı Kontrol ile Takip Hatası Karşılaştırması

Kontrol kazançları (k_1, k_2) artırıldığında, Lyapunov yaklaşımına göre sistemin kararlılığı korunur, çünkü $\dot{V} \le 0$ koşulu sağlanmaya devam eder. Bu durumda hata enerjisi (V), daha yüksek bir negatif türev değeri sayesinde daha hızlı bir şekilde azalma eğilimindedir. Başka bir ifadeyle, sistemdeki hata sinyalinin büyüklüğü zamanla daha hızlı sönümlenir.

Bunun bir sonucu olarak:

- Takip performansı artar: Referans sinyali ile sistem çıkışı arasındaki fark daha kısa sürede minimize edilir.
- Hata daha çabuk bastırılır: Hata büyüklüğü ve sürekliliği azalır, sistem hedef değere daha kararlı bir biçimde ulaşır.
- Tepki süresi kısalır: Sistem daha hızlı bir şekilde denge konumuna gelir ve geçici rejim süresi azalır.
- Kararlılık korunur: Kazançların artırılması sistemin Lyapunov anlamında kararlılığını bozmaz, çünkü $\dot{V} \leq 0$ şartı geçerliliğini sürdürür.



Şekil 2. Kontrol Kazançlarının Lyapunov Türevine Etkisi

Grafikte, sistemin hata enerjisinin zamanla nasıl azaldığı gösterilmektedir.

$\dot{V}(t)$ fonksiyonunun tamamı sıfırın altında seyrediyor, bu da sistemin kararlı olduğunu ve hata enerjisinin sürekli azaldığını doğruluyor. Büyük kazançlar, sistem hatayı daha çabuk azaltıyor ve daha hızlı tepki veriyor. Küçük kazançlarda ise sistemin hata düzeltme süresinin daha uzun olduğunu gösteriyor. Sonuç olarak, kazançların artırılması sistemin performansını iyileştirirken, Lyapunov kararlılık koşulu bozulmadan güvenli bir şekilde hızlanmayı sağlıyor.

III. BULGULAR

Simülasyon sonuçları, önerilen Lyapunov tabanlı kontrol algoritmasının BLDC motor pozisyon kontrolü probleminde yüksek doğruluk, hızlı yanıt ve güçlü kararlılık özellikleri sağladığını göstermektedir. Ayrıca sistemin bozucu torklar altındaki kararlı davranışı, bu yöntemin uygulamalarda güvenilirliğini artırmaktadır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, BLDC motorların pozisyon kontrolü için geliştirilen Lyapunov tabanlı kontrol stratejisi, simülasyon sonuçlarına göre yüksek doğrulukla referans takibi ve güçlü kararlılık sağlamıştır. Sistem, hem sabit hem de zamanla değişen bozucu torklara karşı dayanıklılık göstermiş; pozisyon ve hız hatalarının zamanla sıfıra yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Literatürde sıkça kullanılan klasik PID denetleyicilere kıyasla, önerilen yöntem daha az parametre hassasiyeti gerektirmekte ve doğrusal olmayan dinamiklerde daha etkili bir performans sunmaktadır. Ayrıca, Lyapunov tabanlı yapının sağlam teorik temeli, kararlılığı garanti altına alması açısından önemli bir avantajdır.

Bununla birlikte, kontrol kazançlarının doğru seçilmesi ve elektriksel dinamiklerin modele dahil edilmemiş olması, yöntemin bazı sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Gelecekte, bu kontrol yapısının adaptif yöntemlerle geliştirilmesi ve gerçek zamanlı donanım üzerinde test edilmesi, yöntemin uygulanabilirliğini daha da artıracaktır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorunun pozisyon kontrolü için Lyapunov kararlılık teorisine dayanan bir kontrol stratejisi uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, kontrol kazançlarının artmasıyla sistemin hata enerjisinin (Lyapunov fonksiyonunun değeri) daha hızlı azaldığını ve sistemin referans pozisyonu daha hızlı ve hassas şekilde takip ettiğini göstermiştir. Özellikle Lyapunov fonksiyonunun türevinin $\dot{V}(t)$ negatif ve büyük mutlak değerde olması, sistemin kararlı ve hata dinamiklerinin hızla sönümlendiğine işaret etmektedir.

Büyük kazançlarla kontrol edilen sistem, hata enerjisini daha hızlı tüketerek daha hızlı tepki ve daha iyi takip performansı sergilemiştir. Buna karşın, küçük kazançlarda hata azalımı daha yavaş gerçekleşmiş ve sistem tepki süresi uzamıştır. Lyapunov fonksiyonunun türevi grafikleri, her iki durumda da sistemin kararlı olduğunu ve önerilen kontrol stratejisinin teorik kararlılık şartlarını sağladığını doğrulamıştır.

Sonuç olarak, Lyapunov tabanlı kontrol yöntemi, BLDC motorun doğrusal olmayan dinamiklerinde etkin ve güvenilir bir kararlılık sağlayarak, referans sinyaline uyumlu hızlı ve hassas pozisyon kontrolü gerçekleştirmiştir. Kazançların uygun seçimi ile sistem performansı optimize edilebilir ve bozucu etkiler karşısında kararlılık korunabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkı sağlayan tüm akademik paydaşlara teşekkür ederiz. Ayrıca, bildirimizin sunulmasına olanak tanıyan 5th International Conference on Trends in Advanced Research düzenleme kuruluna ve emeği geçen tüm organizasyon ekibine şükranlarımızı sunarız.

KAYNAKLAR

[1] S. M. Metev and V. P. Veiko, *Laser Assisted Microtechnology*, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.

[2] J. Breckling, Ed., *The Analysis of Directional Time Series: Applications to Wind Speed and Direction*, ser. Lecture Notes in Statistics. Berlin, Germany: Springer, 1989, vol. 61.

[3] S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, "A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 569–571, Nov. 1999.

[4] M. Wegmuller, J. P. von der Weid, P. Oberson, and N. Gisin, "High resolution fiber distributed measurements with coherent OFDR," in *Proc. ECOC'00*, 2000, paper 11.3.4, p. 109.

[5] R. E. Sorace, V. S. Reinhardt, and S. A. Vaughn, "High-speed digital-to-RF converter," U.S. Patent 5 668 842, Sept. 16, 1997.

[6] (2002) The IEEE website. [Online]. Available: http://www.ieee.org/

[7] M. Shell. (2002) IEEEtran homepage on CTAN. [Online]. Available: http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/

[8] *FLEXChip Signal Processor (MC68175/D)*, Motorola, 1996.

[9] "PDCA12-70 data sheet," Opto Speed SA, Mezzovico, Switzerland.

[10] 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.

[11] J. Padhye, V. Firoiu, and D. Towsley, "A stochastic model of TCP Reno congestion avoidance and control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech. Rep. 99-02, 1999.

[12] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1997.