

MÜHENDİSLİKTE SÜRDÜRÜLEBİLİR VE TREND ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE SÜRDÜRÜLEBİLİR VE TREND ÇALIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Sürdürülebilir ve Trend Çalışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Mayıs 2026

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-8993-44-8

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	6
NbZr1 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi	
<i>Adem KAYNAR, Ömer ASAL, Hakan DİLİPAK</i>	
2. Bölüm	22
5G ve 6G Kablosuz Haberleşme Sistemleri İçin Anten Teknolojileri: Tasarım Yaklaşımları, Zorluklar ve Gelecek Eğilimler	
<i>Ali AKDAĞLI, İbrahim DEVELİ</i>	
3. Bölüm	42
İkiz Dönüşümde Yapay Zeka Ajanları: Dijital İkiz Tabanlı Karbon Yönetimi İçin Bir LangChain Mimarisi Önerisi	
<i>Alper AYTEKİN, İlknur AYTEKİN</i>	
4. Bölüm	63
SPI ve SPEI İndekslerine Göre Hidrolojik Kuraklık ve Trend: Doğu Karadeniz Kıyı ve İç Kesimleri	
<i>Shams Emad Ali ALBUKAA, Aslı Ülke KESKİN</i>	
5. Bölüm	89
Sinyalize Kavşaklarda İkilem Bölgesi Analizi: Antalya Manavgat Çakal Deresi Kavşağı Örneği	
<i>Bedriye Özge ERGEN, Ebru ARIKAN ÖZTÜRK</i>	
6. Bölüm	107
Filament İndüksiyonla Isıtılan Boru Sistemlerinde İncert Geometrisinin Isı Transfer Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi	
<i>Çağla YILDIRIM, Kemal ERMİŞ</i>	

7. Bölüm	129
Sentinel-2 Verileri ile NDVI ve EVI İndekslerinin Karşılaştırmalı Analizi: Belgrad Metropolitlen Alanı Örneği <i>Fatih ÇELİK</i>	
8. Bölüm	148
Şekil bellekli alaşımlar ve uygulamaları <i>Fehim FINDIK</i>	
9. Bölüm	164
Tabakalı Zeminlerde Plastik Kazık Tasarımı: Rijit ve Esnek Bağlantı Durumları <i>Mustafa Gökhan SABUR, Mustafa VEKLİ</i>	
10. Bölüm	174
Endüstriyel Çelik Yapılarda Korozyonun Yapısal Güvenlik ve İş Sağlığına Etkisi <i>Özlem AYDIN</i>	
11. Bölüm	198
Betonarme Kolonların Çarpma Yükleri Altındaki Davranışı ve Güçlendirme Yöntemleri <i>Ayça AKBAŞ, Özlem ÇALIŞKAN</i>	
12. Bölüm	224
IoT ve Giyilebilir Biyosensörler: Sağlıkta Yeni Ufuklar <i>Zülfü TÜYLEK</i>	
13. Bölüm	240
Kronik Hastalık Yönetiminde Giyilebilir Teknolojilerin Yükselişi <i>Zülfü TÜYLEK</i>	
14. Bölüm	263
Ormanlık Alanlarda Hava LiDAR Verilerinin Zemin Filtrelemesi: Yöntemler, Zorluklar ve Yaklaşımlar <i>Zümrüt KURTULGU</i>	

Endüstri 5.0 Çağında Veri Odaklı İnovasyon ve Teknoloji Yönetimi

Nur Nilgün SERT, M. Hanefi CALP

NbZr1 Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin Deneyisel Olarak İncelenmesi

Adem KAYNAR¹

Ömer ASAL²

Hakan DİLİPAK³

- 1- Kıdemli Uzman Araştırmacı; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü (SAGE). ademkaynar18@gmail.com ORCID No: 0009-0003-0799-0836
- 2- Doç. Dr.; Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliğı Bölümü. omerasal@gazi.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6339-9202
- 3- Prof. Dr. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliğı Bölümü. hdilipak@gazi.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3796-8181

ÖZET

Bu çalışma, havacılık, uzay ve nükleer enerji sektörlerinde kritik öneme sahip olan ASTM B394 standardına uygun NbZr1 (Niyobyum-Zirkonyum) alaşımının tornalama yöntemiyle işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü değerlerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. NbZr1 alaşımı, yüksek erime noktası, üstün korozyon direnci ve radyasyon altındaki kararlılığı ile bilinse de düşük ısı iletkenliği, yüksek sünekliği, işleme sırasında kesici takıma kaynama ve yapışma eğilimi göstermesi nedeniyle "zor işlenen malzemeler" sınıfında yer almaktadır. Bu çalışmada, tornalama operasyonunda temel kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel tasarım aşamasında, maliyet ve zaman verimliliği sağlayan Taguchi L9 ortogonal dizisi tercih edilmiş; kesme hızı (V_c) (50, 80, 110 m/dk), ilerleme miktarı (f) (0,08, 0,12, 0,16 mm/dev) ve takım uç yarıçapı (r) (0,2, 0,4, 0,8 mm) kontrol faktörleri olarak belirlenmiştir. İşleme sonrası elde edilen numunelerin yüzey kalitesi, ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla her numune üzerinden 5 farklı noktadan yapılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri tespit edilmiştir. Yapılan S/N oranı, ana etki grafikleri ve 3 boyutlu tepki yüzeyi analizleri sonucunda, minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin 50 m/dk kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme ve 0,4 mm takım uç yarıçapı olduğu tespit edilmiştir. Varyans Analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en baskın faktörün %53,59 katkı oranı ile ilerleme miktarının karesel etkisi (f^2) olduğu saptanmıştır. Çalışmanın sonuçları, NbZr1 gibi stratejik malzemelerin işlenebilirliği konusunda literatüre önemli veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – NbZr1 Alaşımı, Tornalama, Yüzey Pürüzlülüğü, Taguchi Metodu, ASTM B394

GİRİŞ

Modern endüstride, özellikle havacılık, uzay teknolojileri ve nükleer enerji gibi sektörlerde zorlayıcı şartlarda çalışan malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Söz konusu sektörlerdeki teknolojik ilerlemeler, yüksek sıcaklık ve korozyon gibi zorlu çalışma koşullarına dayanabilecek malzemelere duyulan gereksinimi tetiklemektedir. Bu noktada, yüksek erime noktasına ve yüksek korozyon direncine sahip Niyobyum (Nb) tabanlı refrakter¹ metaller ön plana çıkmaktadır (Kim vd., 2025:1). Bu alaşımlar arasında yer alan ve ASTM B392, B393 ve B394 standartları ile tanımlanan NbZr1 alaşımı (Niyobyum-%1 Zirkonyum), saf niyobyumun içerisine

¹ Refrakter metaller; malzeme mühendisliğinde genellikle olağanüstü derecede yüksek erime noktasına ve yüksek sıcaklıkta deformasyona karşı güçlü dirence sahip bir metal olarak kabul edilmektedir.

yaklaşık %0.8-1.2 oranında zirkonyum eklenmesiyle elde edilen stratejik bir mühendislik malzemesidir. Saf niyobyumun özelliklerini ve yüksek sünekliğini korurken, zirkonyum katkısı sayesinde daha yüksek mekanik dayanım ve sertlik sunar (ATI, 2011:1), (WHS Sondermetalle, 2020:1), (ASTM B394, 2018:1). NbZr1 alaşımı, 1400 °C gibi çok yüksek sıcaklıklara kadar mekanik dayanımını koruyabilmektedir (Islam vd., 2024:1). Sulu ortamlardaki mükemmel korozyon direnci ve termal nötronlara karşı düşük hassasiyeti sayesinde nükleer reaktör bileşenlerinde, süper iletkenlerde, kimyasal proses teknolojilerinde, hipersonik füzelerde ve jet motoru türbin kanatlarında kritik kullanım alanlarına sahiptir (Tan vd., 2013:661), (Tanvir vd., 2025:98).

NbZr1 alaşımının sahip olduğu bu üstün özellikler, talaşlı imalatı sırasında önemli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Refrakter alaşımların genel olarak zayıf işlenebilirlikleri (poor manufacturability) ve yüksek talaşlı imalat maliyetleri, bu stratejik malzemelerin endüstriyel uygulamalarını kısıtlayan en büyük engellerden biridir (Islam vd., 2024:1). Refrakter metallerin işlenmesi, takım-iş parçası arayüzünde oluşan yoğun ısı birikimi ve hızlı aşınma mekanizmaları nedeniyle oldukça zordur (Elite Materials and Manufacturing, 2026:1). Niyobyum ve alaşımlarının işlenebilirlik karakteristikleri genel olarak 316 paslanmaz çelik veya yumuşak bakırın işlenmesine benzemektedir. Ancak malzemenin yüksek sünekliği, işleme sırasında kesici takım yüzeyine kaynama (galling), yırtılma ve yapışma eğilimi göstermesine neden olmaktadır. Bu yapışma ve aşınma sorunlarını en aza indirmek için kesme işleminde yüksek pozitif talaş açılarına sahip takımların kullanılması ve uygun kesme sıvılarının seçilmesi zorunludur (ATI, 2011:2).

Talaşlı imalatla elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra), üretilen parçanın yorulma ömrünü, aşınma davranışını ve korozyon direncini doğrudan etkileyen temel kalite göstergelerinden biridir (Trinh, 2024:15297). Yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu konusunda geleneksel çelikler ve kompozit malzemeler üzerinde geniş çaplı çalışmalar bulunmasına rağmen (Palanikumar, 2008:19), NbZr1 alaşımının işlenebilirliği üzerine araştırma eksikliği bulunmaktadır. Literatürde niyobyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine yapılan güncel çalışmalar, çoğunlukla havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan C-103 (Nb-10Hf-1Ti) alaşımına odaklanmıştır. Örneğin, C-103 alaşımının tornalanmasında kesme kuvvetleri üzerinde en belirgin etkinin kesme derinliği olduğu görülmüştür (IJSET, 2014:348).

Benzer şekilde, Taguchi ve Yapay Sinir Ağları/Artificial Neural Networks (YSA/ANN) yöntemleri kullanılarak yapılan bir optimizasyon çalışmasında, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en kritik parametrenin ilerleme miktarı (feed rate) olduğu tespit edilmiştir (Sankeerth vd., 2024:15). Bununla birlikte, spesifik olarak NbZr1 alaşımının tornalanması ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri konusunda literatürde büyük bir veri boşluğu bulunmaktadır.

Bu çalışma, NbZr1 alaşımının tornalama operasyonunda temel kesme parametrelerinin yzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak belirlemeyi amaçlamaktadır. Deney tasarımında, minimum deney ile maksimum bilgi elde etmeyi sağlayan ve talaşlı imalat literatüründe yzey pürüzlülüğü optimizasyonu amacıyla yaygın olarak tercih edilen Taguchi metodu kullanılmıştır (Trinh, 2024:15299). Elde edilecek bulguların, bu zor işlenen stratejik alaşımın endüstriyel uygulamaları için optimum parametre setlerini sunması ve talaşlı imalat literatüründeki mevcut eksikliği gidermesi hedeflenmektedir.

MATERYAL VE METOT

Deney Malzemesi

Bu çalışmada, üstün korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik kararlılığı nedeniyle nükleer ve havacılık uygulamalarında tercih edilen NbZr1 (Niyobyum-%1 Zirkonyum) (şekil 1) alaşımı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ham malzeme, ASTM B394 standartlarına uygun olarak tedarik edilmiştir (ASTM B394, 2018:1). Malzemenin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri, talaşlı imalat süreçlerindeki işlenebilirlik karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir.



şekil 1: ASTM B394 NbZr1 Ham Malzeme ve Bağlama

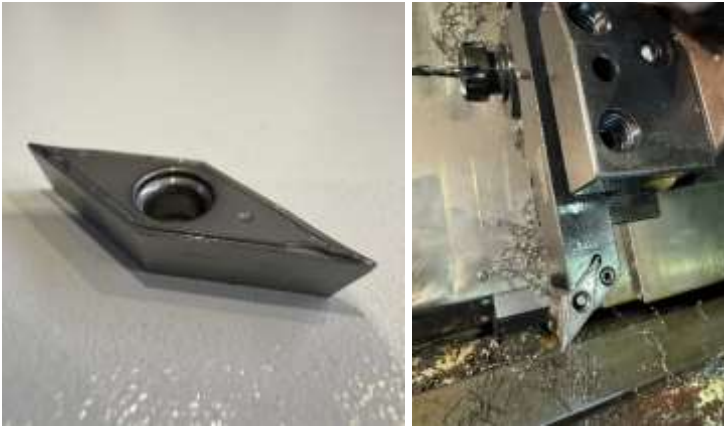
Deney Sistemi ve Ekipmanlar

Tornalama deneyleri, *SPINNER TC 65* marka/model CNC torna tezgahında (Şekil 2) gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri sırasında herhangi bir soğutma sıvısı kullanılmamış, tüm deneyler kuru kesme şartlarında yürütülmüştür.



Şekil 2: SPINNER TC 65 CNC Torna Tezgahı

Kesici takım olarak refrakter metallerin işlenmesinde ortaya çıkan yüksek ısıl gerilmelere ve aşınmalara karşı dirençli olan *Walter* marka *VCMT* serisi (WSM20S kalitesinde, FM4 formunda) kesici uçlar tercih edilmiştir. Deney tasarımında belirlenen farklı takım uç radyuslarını (0,2 mm, 0,4 mm ve 0,8 mm) sağlayabilmek adına sırasıyla Walter VCMT 160402-FM4 WSM20S (Walter Tools, 2026a), VCMT 160404-FM4 WSM20S (Walter Tools, 2026b) ve VCMT 160408-FM4 WSM20S (Walter Tools, 2026c) kodlu uçlar kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3: WALTER VCMT160402-FM4 WSM20S Kesici Uç ve Takım Tutucu
(Kater)

Deneyler sonucunda numunelerin yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri, Mitutoyo SJ-310 (Şekil 4) marka/model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile tespit edilmiştir. Malzemenin talaş kaldırma esnasında gösterebileceği bölgesel farklılıkları, takım üzerinde oluşabilecek mikro yığıntı (BUE) etkilerini veya ölçüm sapmalarını minimize etmek ve ölçümlerin güvenilirliğini artırmak amacıyla her bir numunenin yüzeyi üzerinden eksenel yönde 5 farklı konumda ölçüm gerçekleştirilmiştir ($Ra_1, Ra_2, Ra_3, Ra_4, Ra_5$) ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra_{ort}) değeri elde edilmiştir.



Şekil 4: Mitutoyo SJ-310 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

Deney Tasarımı ve Parametreleri

Deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş ve herhangi bir soğutma sıvısı veya kesme yağı kullanılmamıştır. Kesme derinliği (a_p) 0,4 mm olarak sabit tutulmuş; kesme hızı 50, 80 ve 110 m/dk, ilerleme miktarı 0,08, 0,12 ve 0,16 mm/dev ve takım uç yarıçapı 0,2, 0,4 ve 0,8 mm olmak üzere üçer seviyeli kontrol faktörleri olarak belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Deney Parametreleri ve Seviyeleri

Seviye	Kesme Hızı (V_c) [m/dk]	İlerleme (f) [mm/dev]	Uç Radyusu (r) [mm]
1	50	0,08	0,2
2	80	0,12	0,4
3	110	0,16	0,8

Zor işlenen NbZr1 alaşımının CNC tornada işlenmesi sırasında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin optimizasyonu için istatistiksel bir deney tasarımı yöntemi olan Taguchi metodu kullanılmıştır. Geleneksel tam faktöriyel deney tasarımlarının gerektirdiği yüksek maliyet ve zaman kaybını en aza indirmek amacıyla, 3 faktör ve 3 seviyeden oluşan Taguchi L9 ortogonal dizisi (orthogonal array) tercih edilmiştir (Yang ve Tarng, 1998:124).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney Sonuçları

NbZr1 alaşımının tornalanmasında; kesme hızı, ilerleme miktarı ve takım uç radyusunun yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen 9 deneyden elde edilen veriler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Deney Tasarımı ve Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Deney Numarası	Kesme Hızı (V_c) [m/dk]	İlerleme (f) [mm/dev]	Uç Radyusu (r) [mm]	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra_{ort}) [μm]
1. Deney	50	0,08	0,2	2,763
2. Deney	80	0,08	0,4	0,771
3. Deney	110	0,08	0,8	1,518
4. Deney	50	0,12	0,4	1,182
5. Deney	80	0,12	0,8	2,523
6. Deney	110	0,12	0,2	3,922
7. Deney	50	0,16	0,8	3,213
8. Deney	80	0,16	0,2	6,574
9. Deney	110	0,16	0,4	4,222

Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde, en düşük (en iyi) yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,771 μm ile 2 numaralı deney şartlarında (Kesme hızı: 80 m/dk, İlerleme: 0,08 mm/dev, Takım uç radyusu: 0,4 mm) elde edildiği görülmektedir.

En yüksek (en kötü) yüzey pürüzlülüğü ise 6,574 μm ile 8 numaralı deneyde (Kesme hızı: 80 m/dk, İlerleme: 0,16 mm/dev, Takım uç radyusu: 0,2 mm) ölçülmüştür.

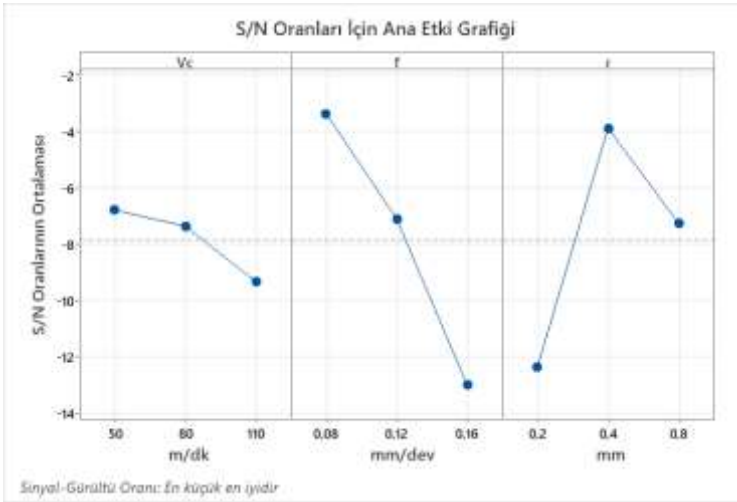
Talaşlı imalat literatüründe, genel olarak takım uç radyusunun artmasının yüzey kalitesini iyileştirdiği bilinmektedir (Groover, 2010:589). Ancak bu çalışmada, 0,8 mm uç radyusu kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde (Deney 3, 5 ve 7) elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, 0,4 mm uç radyusuna sahip takımla yapılan deneylere kıyasla beklenilenden daha yüksek (kötü) çıkmıştır. Bu durumun temel nedeni, deneylerde sabit olarak kullanılan kesme derinliğinin ($a_p = 0,4$ mm), 0,8 mm'lik takım uç radyusundan küçük ($a_p < r$) olmasıdır. Kesme derinliğinin uç radyusundan daha küçük

olduğu işleme şartlarında, ideal bir kesme (shearing) mekanizmasından ziyade takımın malzemeyi ezmesi ve kazıması (plowing effect) olgusu ön plana çıkmaktadır (Shaw, 2005:168).

NbZr1 alaşımının doğasından gelen yüksek süneklik ve takıma kaynama (galling) karakteristiği ile birleşen bu ezme etkisi, pasif (radyal) kesme kuvvetlerinin aniden artmasına ve mikro titreşimlerin tetiklenmesine neden olmuştur (ATI Materials, 2021:2), (Tan vd., 2013:663). Neticede, takım-iş parçası arayüzündeki artan sürtünme katsayısı, 0,8 mm uç radiusu kullanılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmıştır.

Yüzey Pürüzlülüğü İçin Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı Analizi

Taguchi metodunda, hedeflenen kalite karakteristiklerinin optimizasyonu ve kontrol edilemeyen gürültü faktörlerinin etkisinin minimize edilmesi amacıyla Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi kullanılmaktadır. Talaşlı imalat operasyonlarında yüzey pürüzlülüğü (Ra) bir imalat kusuru olarak değerlendirildiğinden, analizlerde "en küçük en iyidir" (smaller-is-better) kalite kriteri temel alınmıştır. Her bir kesme parametresi seviyesinin S/N oranları üzerindeki ana etkilerini gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. S/N oranının en yüksek (maksimum) olduğu seviyeler, yüzey kalitesi açısından en optimum kesme şartlarını temsil etmektedir.



Şekil 5: Kesme Parametrelerinin S/N Oranları Üzerindeki Etkisi

Şekil 5 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en keskin değişimi oluşturan faktörün ilerleme miktarı (f) olduğu açıkça görülmektedir. İlerleme miktarının 0,08 mm/dev seviyesinden 0,16 mm/dev seviyesine çıkarılması, takımın iş parçası üzerinde bıraktığı ilerleme izlerinin belirginleşmesine neden olmuş ve S/N oranında dramatik bir düşüşe yol açmıştır. Dolayısıyla,

minimum yüzey pürüzlülüğü için en iyi ilerleme değeri 0,08 mm/dev olarak tespit edilmiştir.

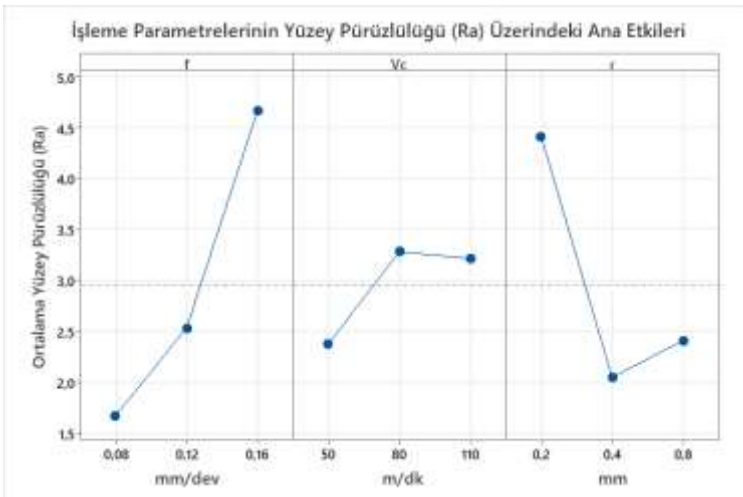
Takım uç radiusunun (r) etkisi değerlendirildiğinde, grafikte bir kırılma noktası göze çarpmaktadır. Radius değerinin 0,2 mm'den 0,4 mm'ye artırılması yüzey pürüzlülüğünü iyileştirirken (S/N oranını artırırken), 0,8 mm değerinde S/N oranının tekrar düştüğü görülmüştür. Bu durum, kesme derinliğinden daha büyük bir uç radiusu kullanılmasının ($a_p < r$) malzeme yüzeyinde kesme yerine ezme (ploughing) etkisi yaratmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle optimum uç radiusu 0,4 mm olarak belirlenmiştir.

Kesme hızının (V_c) ana etki grafiği incelendiğinde ise diğer parametrelere kıyasla daha yatay bir eğilim sergilediği görülmektedir. Kesme hızının artması yüzey kalitesinde kademeli bir bozulmaya neden olmuştur.

S/N analizi sonucunda, NbZr1 alaşımının tornalanmasında minimum yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşmak için kullanılması gereken optimum kesme parametrelerinin; 50 m/dk kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme ve 0,4 mm takım uç radiusu olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmıştır.

Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Ana Etkileri

Kesme parametrelerinin (ilerleme miktarı, kesme hızı ve takım uç radiusu) ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki doğrudan etkilerini değerlendirmek amacıyla oluşturulan ana etki grafiği Şekil 6'de sunulmuştur. Bu analiz, kontrol faktörlerinin her bir seviyesinde elde edilen pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamasını yansıtmakta olup, S/N analizindeki eğilimleri fiziksel ölçüm değerleri üzerinden doğrulamaktadır. Pürüzlülük değerinin düşük olması istendiğinden, grafiklerdeki en düşük noktalar ilgili parametrenin optimum seviyesini işaret etmektedir.



Şekil 6: İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Üzerindeki Ana Etkileri

Şekil 6 incelendiğinde, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en belirgin ve dik değişimi yaratan parametrenin ilerleme miktarı (f) olduğu görülmektedir. İlerleme miktarının 0,08 mm/dev seviyesinden 0,16 mm/dev seviyesine çıkarılması, Ra değerini 1,7 μm bandından 4,7 μm seviyelerine kadar dramatik bir şekilde yükseltmiştir.

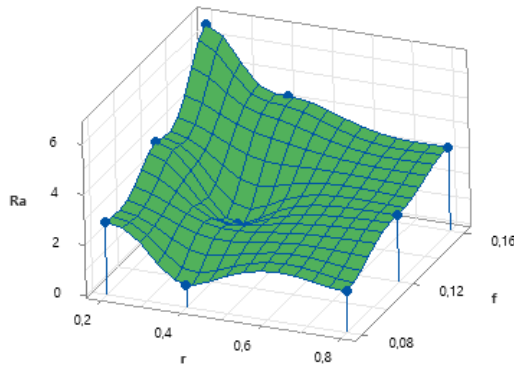
Bu durum, talaşlı imalatın temel kinematiklerinde yer alan ve pürüzlülüğün ilerleme miktarının karesiyle doğru orantılı olduğunu ifade eden teorik yüzey pürüzlülüğü bağıntısı ile ($Ra \approx f^2/32r$) (Groover, 2010:605) tam bir uyum içindedir.

Takım uç radiusunun (r) ana etki grafiği değerlendirildiğinde ise doğrusal olmayan (non-linear) bir eğilim tespit edilmiştir. Uç radiusunun 0,2 mm'den 0,4 mm'ye çıkarılması, takımın iş parçası üzerindeki temas alanını genişleterek yüzey pürüzlülüğünü belirgin şekilde iyileştirmiş (2,0 μm seviyelerine düşürmüştür) ve teorik beklentileri karşılamıştır. Ancak radius değerinin 0,8 mm'ye yükseltilmesi, yüzey pürüzlülüğünü tekrar artırarak 2,5 μm bandına çekmiştir. Bu sapmanın temel nedeni, daha önce de vurgulandığı gibi büyük uç radiusunun ($a_p < r$ koşulunda) NbZr1 alaşımında kesme yerine ezme (ploughing) mekanizmasını tetiklemesi ve titreşimleri artırmasıdır.

Kesme hızının (V_c) etkisi incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 50 m/dk seviyesinde elde edildiği, hızın 80 m/dk'ya çıkmasıyla pürüzlülüğün arttığı ve 110 m/dk'da nispeten yatay bir seyir izlediği görülmüştür.

Parametrelerin tekil ana etkilerinin yanı sıra, birbirleriyle olan ikili etkileşimlerini (interaction) topografik olarak değerlendirmek amacıyla 3 boyutlu tepki yüzeyi grafikleri (3D surface plots) oluşturulmuştur. Şekil 7'de ilerleme miktarı ile takım uç radiusunun ortak etkisi sunulmuştur.

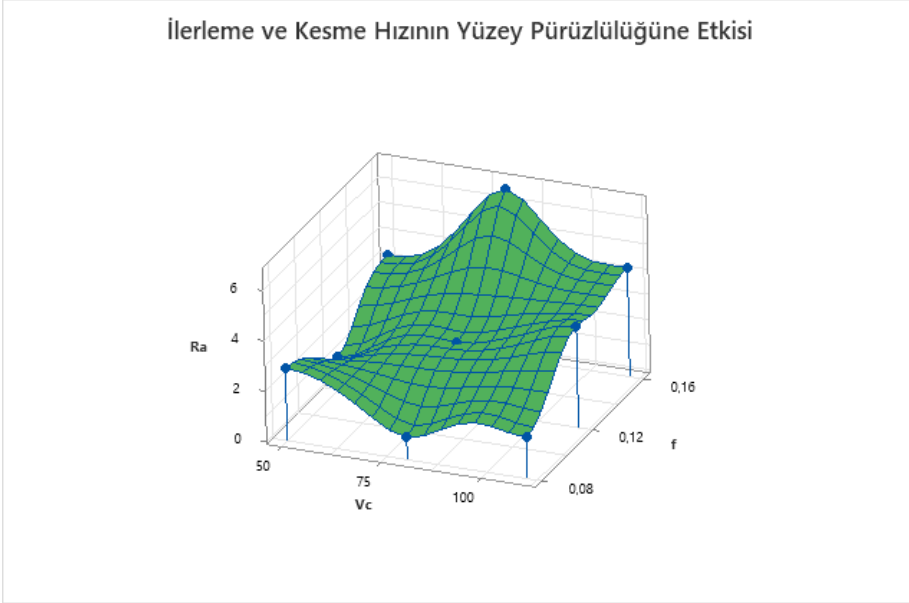
İlerleme ve Takım Uç Radiusunun Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi



Şekil 7: İlerleme Miktarı ve Takım Uç Radyusunun Yüzey Pürüzlülüğüne Ortak Etkisi

Şekil 7'deki 3 boyutlu yüzey incelendiğinde, grafiğin genel eğimini dikte eden en dominant faktörün ilerleme miktarı olduğu görsel olarak da teyit edilmektedir. En derin vadi (optimum yüzey kalitesi), ilerlemenin en düşük ($f = 0,08$ mm/dev) ve uç radiusunun orta seviyede ($r = 0,4$ mm) olduğu koordinatlarda konumlanmıştır. İlerlemenin sabit tutulduğu izohips eğrileri boyunca uç radiusunun değişimi incelendiğinde, 0,4 mm'den sonra yukarı doğru kıvrılan yüzey formu, daha önce belirtilen ezme etkisinin (ploughing) pürüzlülük üzerindeki bozucu yansımaları üç boyutlu uzayda kanıtlamaktadır.

Benzer şekilde, ilerleme miktarı ve kesme hızının (V_c) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki ortak etkileşimini gösteren 3 boyutlu yüzey grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: İlerleme Miktarı ve Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Ortak Etkisi

Şekil 8 değerlendirildiğinde, kesme hızı eksen (V_c) boyunca yüzey topografyasının nispeten yatay ve dalgalı bir form sergilediği, asıl dramatik yükselişin ilerleme eksen (f) boyunca gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Kesme hızının 50 m/dk'dan 110 m/dk'ya çıkarılması yüzey pürüzlülüğünde minör değişimler yaratırken, ilerlemenin artışı yüzeyi hızla bozmaktadır. Bu görsel bulgu, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki oransal etkisinin zayıf olduğunu göstermekte olup, ilerleyen bölümlerde sunulacak olan Varyans Analizi (ANOVA) sonuçlarındaki düşük katkı payını matematiksel olarak destekleyecek niteliktedir.

Sonuç olarak, ortalamalar için ana etki grafiği, minimum yüzey pürüzlülüğü için kullanılması gereken optimum şartların $f = 0,08$ mm/dev, $r =$

0,4 mm ve $V_c = 50$ m/dk olduğunu fiziksel Ra değerleri üzerinden kesin olarak doğrulamıştır.

Varyans Analizi (ANOVA)

Deneylerden elde edilen verilerin istatistiksel anlamlılığını belirlemek ve her bir kesme parametresinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki yüzde katkı oranlarını saptamak amacıyla %95 güven aralığında Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (Seq SS)	Kareler Ortalaması (Adj MS)	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Regresyon	6	25,8788	4,31313	328,89	0,003	99,9
r	1	4,1769	2,61565	199,45	0,005	16,12
f^2	1	13,8817	8,98554	685,17	0,001	53,59
r^2	1	5,535	1,56779	119,55	0,008	21,37
$V_c \cdot r$	1	1,5857	0,76663	58,46	0,017	6,12
V_c^3	1	0,4367	0,68372	52,14	0,019	1,69
$V_c \cdot r^3$	1	0,2628	0,26278	20,04	0,046	1,01
Hata	2	0,0262	0,01311			0,1
Toplam	8	25,905				100

Tablo 3 incelendiğinde, geliştirilen regresyon modelinin P-değerinin 0,003 olması ($P < 0,05$), modelin istatistiksel olarak son derece anlamlı olduğunu kanıtlamaktadır. Parametrelerin pürüzlülük üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, ilerleme miktarının karesel etkisinin (f^2) %53,59'luk katkı oranı ile en baskın faktör olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarından sonra yüzey kalitesi üzerinde en etkili ikinci faktör %21,37 ile takım uç radyusunun karesel etkisi (r^2) ve ardından %16,12 ile uç radyusunun doğrusal (r) etkisidir. Kesme hızı ve uç radyusu etkileşimi ($V_c \cdot r$) %6,12 katkı sağlarken; kesme hızının kübik etkileri (V_c^3 ve $V_c \cdot r^3$) sırasıyla %1,69 ve %1,01 oranında yüzey oluşumunda rol oynamıştır. Hata oranının sadece %0,10 seviyesinde kalması, deneylerin olağanüstü yüksek bir hassasiyetle gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Regresyon Analizi ve Modelleme

Çalışma kapsamında, NbZr1 alaşımının işlenmesinde ilerleme, kesme hızı ve takım uç radyusu değerlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü yüksek hassasiyetle tahmin edebilen, doğrusal olmayan (non-linear) bir ampirik regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model aşağıda sunulmuştur:

$$Ra = 7,545 - 42,66r + 179,45f^2 + 34,55r^2 + 0,1600V_c \cdot r - 0,000001882V_c^3 - 0,1194V_c \cdot r^3$$

Geliştirilen bu ampirik modelin belirlilik katsayısı (R^2) %99,90, düzeltilmiş belirlilik katsayısı (R^2_{adj}) %99,60 ve tahmin edici belirlilik katsayısı (R^2_{pred}) %97,77 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek oranlar, bağımlı değişken olan yüzey pürüzlülüğündeki değişimin neredeyse tamamının seçilen kesme parametreleri ile açıklanabildiğini kanıtlamaktadır. Özellikle R^2_{pred} değerinin %97,77 gibi oldukça yüksek bir seviyede çıkması, formülün sadece mevcut deneyleri değil, gelecekte yapılacak yeni üretimleri de çok yüksek bir güvenilirlikle tahmin edebileceğini göstermektedir (Tablo 4).

Tablo 4: Regresyon Modeli Özet İstatistikleri

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,114518	99,90%	99,60%	97,77%

SONUÇ

Bu çalışmada, havacılık, uzay teknolojileri ve nükleer enerji gibi stratejik sektörlerde kritik öneme sahip ASTM B394 standartlarındaki NbZr1 alaşımının kuru şartlarda tornalanmasında, kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme miktarı ve takım uç radyüsü) yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileri Taguchi L9 ortogonal dizisi ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve istatistiksel analizler ışığında aşağıdaki temel sonuçlar elde edilmiştir:

- Taguchi S/N oranı (en küçük en iyidir) ve ortalamalar için ana etki grafikleri analizine göre, NbZr1 alaşımının tornalanmasında minimum yüzey pürüzlülüğü değerini veren optimum kesme parametresi kombinasyonu; 50 m/dk kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme miktarı ve 0,4 mm takım uç radyüsü olarak belirlenmiştir.
- Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları değerlendirildiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en dominant faktörün %53,59 katkı oranı ile ilerleme miktarının karesel etkisi (f^2) olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarını, %21,37 katkı oranı ile takım uç radyüsünün karesel etkisi (r^2) ve %16,12 ile doğrusal etkisi (r) takip etmiştir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise oldukça sınırlı kalmıştır.
- Parametre etkileşimlerini gösteren 3 boyutlu yüzey grafikleri incelendiğinde; takım uç radyusunun 0,2 mm'den 0,4 mm'ye çıkarılmasının yüzey kalitesini iyileştirdiği, ancak 0,8 mm radyus değerine ulaşıldığında yüzey pürüzlülüğünün beklentilerin aksine artış gösterdiği saptanmıştır. Bu durum, sabit tutulan kesme derinliğinin ($a_p = 0,4$ mm) takım uç radyusundan ($r = 0,8$ mm) küçük olması ($a_p < r$) sebebiyle, kesici ucun malzemeyi kesmek (shearing)

- yerine ezme/sürtme (ploughing) davranışı sergilemesi ile açıklanmıştır. NbZr1 alaşımının yüksek sünekliği bu ezme etkisini daha da belirginleştirerek yüzey kalitesinin bozulmasına yol açmıştır.
- Çalışma kapsamında, kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü yüksek hassasiyetle tahmin edebilen doğrusal olmayan (non-linear) bir ampirik regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin belirlilik katsayısı (R^2) %99,90 ve tahmin edici belirlilik katsayısı (R^2_{pred}) %97,77 gibi oldukça yüksek değerlerde bulunmuştur.
 - Elde edilen %97,77 oranındaki yüksek tahmin yeteneği (R^2_{pred}), oluşturulan matematiksel formülün "zor işlenen malzemeler" sınıfındaki NbZr1 alaşımının endüstriyel üretim süreçlerinde, zaman ve maliyet kayıplarını önlemek adına son derece güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

REFERANSLAR

- Kim, D. B., Bajestani, M. S., Karim, M. A., Islam, S., Senkov, O. N., Liaw, P. K., Lim, H., Witherell, P., Lee, Y., Nandwana, P., Fan, X., Jeong, W., Mun, J., Jeon, Y., ve Ryu, H. J. (2026). *A critical review on additive manufacturing of refractory alloys from a data analytics perspective- beyond nickel-based superalloys*. Virtual and Physical Prototyping, 20(1).
- ATI Materials. (2011). *Niobium - Machining & Forming Operations*. (Technical Data Sheet). Allegheny Technologies Incorporated.
- Islam, S., Jadhav, S., Park, T., Pourboghrat, F., Fan, X., Liaw, P. K., ve Kim, D. B. (2024). *Crystal plasticity approach for predicting mechanical responses in wire-arc directed energy deposition of NbZr1 refractory alloy*. Additive Manufacturing, 84, 104107.
- WHS Sondermetalle. (2020). *Data sheet Niobium (Nb, NbZr1)*. <https://www.whs-sondermetalle.de/de/werkstoffe/refraktaermetalle/nb-niob.html> adresinden 25 Nisan 2026 tarihinde alınmıştır.
- Tan, L., Allen, T. R., ve Busby, J. T. (2013). *Grain boundary engineering for structure materials of nuclear reactors*. Journal of Nuclear Materials, 441, 661-666.
- Elite Materials and Manufacturing. (2026). *Refractory Metal Machining: Overcoming the Unmillable Challenge*. <https://elitemanufacturing.co.uk> adresinden 25 Nisan 2026 tarihinde alınmıştır.
- Trinh, V. L. (2024). *A Review of the Surface Roughness Prediction Methods in Finishing Machining*. Engineering, Technology & Applied Science Research, 14(4), 15297-15304
- Rao, K. S., Bose, P. S. C., ve Rao, C. S. P. (2014). *Optimization of Cutting parameters for cutting force on Turning of Niobium alloy C-103 by using Response Surface Methodology*. IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(4), 342-350.
- Sankeerth, K. A., Sharma, T. K., ve Rao, C. S. P. (2024). *Optimization of Machining Parameters of Niobium C-103 Using Taguchi and ANN Techniques*. Recent Advances in Mechanical Engineering, Volume 2. Singapore: Springer Nature Singapore.

- Yang, W. H., ve Tarng, Y. S. (1998). *Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method*. Journal of Materials Processing Technology, 84(1-3), 122-129.
- Walter Tools. (2026a). *VCMT160402-FM4 WSM20S*. <https://www.walter-tools.com/tr-tr/search/product/vcmt160402-fm4%20wsm20s?r=%7B%7D> adresinden 9 Mayıs 2026 tarihinde alınmıştır.
- Walter Tools. (2026b). *VCMT160404-FM4 WSM20S*. <https://www.walter-tools.com/tr-tr/search/product/vcmt160404-fm4%20wsm20s?r=%7B%7D> adresinden 9 Mayıs 2026 tarihinde alınmıştır.
- Walter Tools. (2026c). *VCMT160408-FM4 WSM20S*. <https://www.walter-tools.com/tr-tr/search/product/vcmt160408-fm4%20wsm20s?r=%7B%7D> adresinden 9 Mayıs 2026 tarihinde alınmıştır.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4. Baskı). John Wiley & Sons.
- Shaw, M. C. (2005). *Metal Cutting Principles* (2. Baskı). New York: Oxford University Press.

5G ve 6G Kablosuz Haberleşme Sistemleri İçin Anten Teknolojileri: Tasarım Yaklaşımları, Zorluklar ve Gelecek Eğilimler

**Ali AKDAĞLI¹
İbrahim DEVELİ²**

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, akdagli@mersin.edu.tr
ORCID ID: 0000-0003-3312-992X

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, develi@erciyes.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-5878-677X

ÖZET

Beşinci nesil (5G) ve altıncı nesil (6G) kablosuz haberleşme sistemleri, yüksek veri hızı, düşük gecikme, yoğun bağlantı, enerji verimliliği, yapay zekâ destekli ağ yönetimi ve bütünleşik algılama-haberleşme gibi gereksinimler nedeniyle anten teknolojilerinde kapsamlı bir dönüşümü gerekli kılmaktadır. Bu bölümde 5G ve 6G sistemleri için anten teknolojileri; mikroşerit ve entegre anten yapıları, çok girişli çok çıkışlı (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) ve massive (büyük) MIMO sistemleri, milimetre dalga (mmWave) ve terahertz (THz) antenler, reflectarray ve transmitarray çözümleri, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS), şeffaf, esnek ve giyilebilir antenler ile yapay zekâ destekli anten tasarımı çerçevesinde ele alınmaktadır. Ayrıca bütünleşik algılama ve haberleşme (Integrated Sensing and Communication, ISAC) ile karasal olmayan ağlar (Non-Terrestrial Network, NTN) bağlamında ortaya çıkan yeni anten gereksinimleri de değerlendirilmektedir. Bölüm, güncel literatürü kapsamlı bir bakış açısıyla inceleyerek anten tasarım yaklaşımlarını, uygulama zorluklarını ve gelecekte öne çıkması beklenen araştırma yönlerini bütüncül bir çerçevede sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 5G antenleri; 6G antenleri; massive MIMO; mmWave; THz; demet şekillendirme; reflectarray; RIS, yapay zekâ destekli anten tasarımı; ISAC; giyilebilir antenler

1. GİRİŞ: 5G'DEN 6G'YE ANTEN SİSTEMLERİNİN EVRİMİ

Mobil haberleşme sistemleri, birinci nesil analog ses haberleşmesinden başlayarak beşinci nesil ağlarla birlikte yüksek veri hızı, düşük gecikme ve yoğun bağlantı kapasitesi sunan karmaşık dijital altyapılara evrilmiştir. 5G sistemleri; geliştirilmiş mobil geniş bant, ultra güvenilir düşük gecikmeli haberleşme ve yoğun makine tipi haberleşme senaryoları sayesinde yalnızca bireysel mobil hizmetleri değil, aynı zamanda endüstriyel otomasyon, nesnelerin interneti, otonom sistemler ve kritik görev uygulamalarını da destekleyen bütünleşik bir platform hâline gelmiştir (Algburi et al., 2025; Lin, 2025). Bununla birlikte, 2030 sonrası dönem için öngörülen holografik iletişim, dijital ikizler, genişletilmiş gerçeklik, yüksek hassasiyetli konumlama, yaygın yapay zekâ destekli bağlantı ve haberleşme-algılama bütünleşmesi gibi yeni nesil kullanım senaryoları, 5G'nin performans sınırlarının ötesinde bir kablosuz haberleşme mimarisini gerekli kılmaktadır (Li et al., 2025; Nauman et al., 2025; Siddiky et al., 2025).

Bu çerçevede 6G vizyonu; daha yüksek frekans bantlarının etkin kullanımı, yapay zekâ yerleşik ağ yönetimi, karasal olmayan ağlar, akıllı

radio ortamları ve bütünleşik algılama ve haberleşme gibi yaklaşımları bir araya getiren çok katmanlı bir dönüşümü ifade etmektedir (Guo et al., 2025; Lin, 2025; Sandrasegaran & Ali, 2025). Söz konusu dönüşüm, yalnızca ağ mimarisinin veya spektrum kullanım stratejilerinin değişmesiyle sınırlı değildir; fiziksel katmanın temel bileşenlerinden biri olan anten sistemlerinin de yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Nitekim antenler, yeni nesil kablosuz sistemlerde yalnızca elektromanyetik enerji yayan veya alan pasif yapılar değil; kapsama, kapasite, enerji verimliliği, yönlendirilebilir hüzme oluşturma, mekânsal çoğullama, çevresel farkındalık ve sistem düzeyi uyarlanabilirlik üzerinde belirleyici etkiye sahip stratejik alt sistemlerdir (Guo et al., 2025; Nauman et al., 2025).

5G döneminde yaygınlaşan massive MIMO mimarileri, mmWave anten dizileri ve demet şekillendirme teknikleri, 6G ile birlikte sub-THz ve THz antenler, ultra-massive diziler, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler, holografik yüzeyler ve yapay zekâ destekli tasarım yaklaşımlarıyla daha ileri bir seviyeye taşınmaktadır (Guo et al., 2025; Kikan & Kumar, 2024; Thomas et al., 2024). Bu nedenle anten tasarımı artık yalnızca kazanç, bant genişliği, verimlilik ve radyasyon örüntüsü gibi klasik elektromanyetik ölçütlerle değerlendirilmemekte; aynı zamanda üretilebilirlik, paketleme, termal yönetim, donanım karmaşıklığı, güç tüketimi, maliyet, güvenilirlik ve sistem entegrasyonu gibi çok boyutlu gereksinimlerle birlikte ele alınmaktadır (Darling et al., 2025; Guo et al., 2025).

Bu bölümde 5G ve 6G kablosuz haberleşme sistemleri için öne çıkan anten teknolojileri kapsamlı bir bakış açısıyla incelenmektedir. Mikroşerit ve entegre anten yapıları, MIMO ve massive MIMO sistemleri, mmWave ve THz antenler, reflectarray ve transmitarray çözümleri, RIS ve metasurface yaklaşımları, şeffaf, esnek ve giyilebilir antenler, yapay zekâ destekli anten tasarımı ile ISAC ve NTN bağlamındaki anten sistemleri; tasarım yaklaşımları, uygulama zorlukları ve gelecekteki araştırma yönleri çerçevesinde değerlendirilmektedir. Şekil 1'de mikroşerit ve entegre antenlerden massive MIMO, mmWave, THz, RIS ve ISAC uyumlu çok işlevli yapılara uzanan gelişim çizgisini kavramsal olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. 5G ve 6G anten sistemlerinde öne çıkan temel teknoloji sınıfları ve tasarım hedefleri.

2. 5G VE 6G İÇİN TEMEL ANTEN GEREKSİNİMLERİ

5G ve 6G sistemleri için anten gereksinimleri, kullanılan frekans bandı, hedeflenen uygulama senaryosu ve sistem mimarisiyle doğrudan ilişkilidir. Sub-6 GHz bantları geniş kapsama ve daha iyi nüfuz etme kabiliyeti sunarken, mmWave ve daha yüksek frekans bantları çok daha geniş spektrum olanağı sağlayarak yüksek veri hızlarına zemin hazırlamaktadır. Bununla birlikte frekans arttıkça serbest uzay yol kaybı, atmosferik soğurma, hizalama hassasiyeti ve donanım kayıpları belirgin biçimde artmaktadır. Bu nedenle yüksek frekanslı sistemlerde yüksek kazançlı anten dizileri, dar hüzmeler ve dinamik hüzmeye yönetimi kritik hâle gelmektedir (Kikan & Kumar, 2024; Mehmood & Mehmood, 2025; Thomas et al., 2024; Yang et al., 2025).

Anten tasarımında bant genişliği, kazanç, verimlilik, polarizasyon kararlılığı, düşük profil, çoklu bant desteği ve entegrasyon kabiliyeti temel performans göstergeleri arasında yer almaktadır. 6G bağlamında bu göstergelere ek olarak yeniden yapılandırılabilirlik, yapay zekâ ile optimizasyon, çevresel uyarlabilirlik, algılama işlevi ve enerji verimliliği gibi ölçütler de ön plana çıkmaktadır (Guo et al., 2025; Nauman et al., 2025). Bununla birlikte, 5G için birçok anten çözümü uygulama olgunluğuna ulaşmışken, 6G bağlamındaki birçok yaklaşım hâlen araştırma ve doğrulama aşamasındadır.

Bu çerçevede 5G ve 6G antenlerinin değerlendirilmesi yalnızca tekil elektromanyetik performans metrikleri üzerinden değil, sistem düzeyi bütünleşme ve kullanım bağlamı dikkate alınarak yapılmalıdır. Özellikle

6G’de haberleşme, algılama, konumlama, çevresel farkındalık ve hesaplama arasında daha sıkı bir yakınsama öngörüldüğünden, anten sistemleri de çok işlevli ve bağlama duyarlı yapılar olarak yeniden tanımlanmaktadır (Guo et al., 2025; Koivunen et al., 2024).

Tablo 1’de 5G ve 6G anten gereksinimleri frekans, mimari ve sistem entegrasyonu açısından karşılaştırılmakta ve Şekil 2’de ise, Sub-6 GHz, mmWave, sub-THz ve THz bantları için kapsama, bant genişliği, kazanç, yönlülük ve üretim hassasiyeti arasındaki değişim özetlenmektedir.



Şekil 2. Frekans bandına göre anten tasarım eğilimleri ve yüksek frekanslı sistemlerde öne çıkan teknik gereksinimler.

Tablo 1. 5G ve 6G anten gereksinimlerinin karşılaştırılması

Ölçüt	5G Anten Gereksinimi	6G Anten Gereksinimi	Tasarım Etkisi
Frekans bandı	Sub-6 GHz ve mmWave	mmWave, sub-THz ve THz	Daha küçük dalga boyu, daha yoğun anten dizileri
Veri hızı	Gbps düzeyi	Tbps mertebesini hedefleyen senaryolar	Geniş bant ve yüksek kazanç gereksinimi
Gecikme	Düşük gecikme	Algılama ve gerçek zamanlı kontrol için daha düşük gecikme	Hızlı hüzmeye yönetimi gereksinimi
Anten mimarisi	MIMO, massive MIMO, patch diziler	Ultra-massive MIMO, RIS, holografik yüzeyler, çok işlevli diziler	Daha karmaşık ve yazılım kontrollü yapılar
Entegrasyon	Cihaz ve baz istasyonu düzeyi	Çip, paket, yüzey ve ortam entegrasyonu	Anten-paketleme eş tasarımı gereksinimi
Enerji verimliliği	Sistem düzeyinde önemli	Anten ve ağ birlikte optimize edilmeli	Düşük kayıplı malzeme ve akıllı kontrol gereksinimi

Uyarlanabilirlik	Sınırlı yeniden yapılandırılabilirlik	Dinamik ve bağlama duyarlı yeniden yapılandırma	Akıllı ve programlanabilir anten/yüzey ihtiyacı
Ek işlevler	Temel haberleşme odaklı	Algılama, konumlama ve çevresel farkındalık destekli	ISAC uyumlu çok işlevli anten tasarımı

3. MİKROŞERİT YAMA (PATCH) VE ENTEGRE ANTEN YAPILARI

Mikroşerit yama antenler; düşük profil, hafiflik, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve baskı devre teknolojileriyle uyumluluk gibi avantajları nedeniyle modern kablosuz haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu antenler akıllı telefonlar, IoT düğümleri, taşınabilir terminaller, araç içi haberleşme birimleri ve kompakt baz istasyonu modülleri için uygun çözümler sunmaktadır. Bununla birlikte klasik mikroşerit antenlerde dar bant genişliği, sınırlı kazanç, yüzey dalgası kayıpları ve yüksek frekanslarda artan üretim hassasiyeti önemli tasarım kısıtları oluşturmaktadır (Al-Hiti et al., 2025; Didi et al., 2025).

Bu sınırlamaları azaltmak için slot yükleme, parazitik eleman kullanımı, çoklu rezonans oluşturma, çok katmanlı dielektrik yapılar ve elektromanyetik bant aralığı yaklaşımları yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle 5G ve 6G uygulamalarında tek bir anten yapısından geniş bant, çoklu bant, yüksek kazanç ve kompakt boyut gibi birden fazla performans ölçütünü aynı anda sağlaması beklenmektedir. Bu durum mikroşerit anten tasarımını yalnızca geometrik optimizasyon problemi olmaktan çıkararak malzeme, besleme ağı, üretim toleransı ve sistem entegrasyonu ile birlikte ele alınması gereken çok değişkenli bir tasarım problemine dönüştürmektedir (Al-Hiti et al., 2025; Basherlou et al., 2025).

Substrate integrated waveguide (SIW) teknolojisi, düzlemsel üretim avantajlarını klasik dalga kılavuzlarının düşük kayıp ve yüksek kalite faktörü özellikleriyle birleştiren önemli bir yaklaşımdır. SIW tabanlı antenler, özellikle mmWave uygulamalarda düşük kayıplı besleme, yüksek izolasyon ve kompakt yapı avantajları nedeniyle güçlü adaylar olarak değerlendirilmektedir (Darling et al., 2025). 6G'ye doğru ilerleyen eğilimler ise patch ve SIW tabanlı yapıların yalnızca bağımsız antenler olarak değil; filtrenna, antenna-in-package, antenna-on-chip ve yeniden yapılandırılabilir

RF ön uç mimarilerinin bileşenleri olarak ele alınmasını gerektirmektedir (Darling et al., 2025; Guo et al., 2025).

4. MIMO, MASSIVE (BÜYÜK) MIMO VE ULTRA-MASSIVE MIMO ANTEN SİSTEMLERİ

MIMO teknolojisi, çoklu verici ve alıcı antenler kullanarak mekânsal çeşitlilik, mekânsal çoğullama ve hüzmeme kazancı sağlaması nedeniyle kablosuz sistem kapasitesini artıran temel yöntemlerden biridir. 5G ile birlikte massive MIMO yaklaşımı baz istasyonlarında çok daha fazla anten elemanının kullanılmasını mümkün kılmış ve özellikle spektral verimlilik, çok kullanıcı erişim ve kapsama performansında önemli iyileşmeler sağlamıştır (Baqir, 2025; Kikan & Kumar, 2024; Manea et al., 2025). Çok elemanlı anten dizisinin farklı kullanıcılara yönlendirilmiş hüzmeler oluşturarak spektral verimliliği ve kapsama performansını artırma prensibi, Şekil 3'de gösterilmektedir.

Massive MIMO sistemlerinde anten eleman sayısının artması dar hüzmeme oluşturma, kullanıcılar arası girişimin azaltılması ve kanal sertleşmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Buna karşılık pilot kirliliği, kanal kestirimi karmaşıklığı, RF zinciri maliyeti, güç tüketimi, antenler arası korelasyon ve karşılıklı kuplaj gibi sorunlar tasarımın temel kısıtları arasında yer almaktadır (Khwandah et al., 2021; Wen et al., 2019). Özellikle pratik sistemlerde, teorik kapasite kazanımlarının donanım maliyeti ve hesaplama yükü ile dengelenmesi gerekmektedir.

6G bağlamında ultra-massive MIMO, özellikle sub-THz ve THz bantlarında kısa dalga boyunun sağladığı fiziksel kompaktlık sayesinde çok daha yoğun anten dizilerinin kullanılmasına olanak sağlayabilir. Bu durum yalnızca haberleşme kapasitesi için değil, aynı zamanda yüksek çözünürlüklü algılama, hassas konumlama ve çevresel farkındalık açısından da yeni fırsatlar sunmaktadır (Guo et al., 2025; Thomas et al., 2024). Bu nedenle 6G anten mimarileri, haberleşme ve algılama işlevlerinin aynı anten platformu üzerinde birlikte düşünülmesini gerektirmektedir.

Ayrıca MIMO sistemleri yalnızca kapasite artışı açısından değil, konumlandırma ve lokalizasyon açısından da kritik bir potansiyele sahiptir. Geniş anten açıklığı, yüksek açısal çözünürlük ve çok kullanıcı kanalı bilgisi, 5G ve 6G sistemlerinde haberleşme ile konumlandırma işlevlerinin yakınsamasını desteklemektedir (Wen et al., 2019). Bu eğilim, anten dizisi tasarımının ağ seviyesindeki görevlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini

göstermektedir. Tablo 2’de, MIMO, massive MIMO ve ultra-massive MIMO sistemlerinin temel farkları özetlenmektedir.



Şekil 3. Massive MIMO baz istasyonu mimarisi ve çok kullanıcı hüzmeleme yaklaşımı.

Tablo 2. MIMO, massive MIMO ve ultra-massive MIMO sistemlerinin temel özellikleri

Özellik	MIMO	Massive MIMO	Ultra-Massive MIMO
Anten eleman sayısı	Az / orta	Çok yüksek	Çok daha yüksek
Temel amaç	Çeşitlilik ve kapasite artışı	Çok kullanıcı kapasite ve dar hüzme oluşturma	Yüksek çözünürlüklü haberleşme ve algılama
Frekans alanı	Sub-6 GHz, mmWave	Sub-6 GHz, mmWave	sub-THz, THz
Başlıca avantaj	Mekânsal çoğullama ve güvenilirlik	Spektral verimlilik ve girişim azaltma	Çok yüksek yönlülük ve hassas uzaysal çözünürlük
Ana zorluk	Korelasyon, kanal kestirimi	Pilot kirliliği, RF zinciri maliyeti, güç tüketimi	Donanım karmaşıklığı, paketleme, ısı yönetimi, hüzme hizalama
Uygulama bağlamı	Geleneksel çok antenli sistemler	5G baz istasyonları	6G yüksek frekanslı ve çok işlevli sistemler
Algılama / konumlama potansiyeli	Sınırlı	Orta-yüksek	Yüksek

5. mmWAVE ANTENLER, FAZ DİZİLERİ VE DEMET ŞEKİLLENDİRME (BEAMFORMING)

mmWave frekansları, 5G ve 6G sistemlerinde yüksek veri hızları için geniş bant genişliği sunan temel frekans bölgeleri arasında yer almaktadır. Ancak

bu bantlarda yayılım kaybı, gölgeleme, engellerden kaynaklanan zayıflama ve kullanıcı yönelimliliği daha belirgin hâle gelmektedir. Bu nedenle mmWave sistemlerinde yüksek kazançlı anten dizileri, faz kaydırıcılar ve demet şekillendirme teknikleri temel tasarım unsurlarıdır (Kikan & Kumar, 2024; Mehmood & Mehmood, 2025; Saeed & Nwajana, 2024; Yang et al., 2025).

Faz dizili antenler, elemanlar arasındaki faz farklarını kontrol ederek hüzme yönünü elektronik olarak değiştirebilmektedir. Analog demet şekillendirme daha düşük donanım karmaşıklığı sunarken, dijital demet şekillendirme daha yüksek esneklik ve çoklu akış desteği sağlamaktadır; hibrit çözümler ise performans ve maliyet arasında denge kurmayı amaçlamaktadır (Kikan & Kumar, 2024; Saeed & Nwajana, 2024). Burada demet şekillendirme, elektromanyetik enerjinin uzaysal olarak yönlendirilmesini ifade ederken; hüzme yönetimi uygun hüzmenin seçilmesi, izlenmesi ve güncellenmesi süreçlerini kapsamaktadır.

mmWave anten araştırmalarında kompakt diziler, düşük kayıplı besleme ağları, geniş tarama açısı, düşük yan lob seviyesi, çoklu hüzme oluşturma ve paketleme entegrasyonu kritik konular arasında yer almaktadır. Ayrıca giyilebilir, taşınabilir ve araç üstü mmWave antenler; mekanik esneklik, kullanıcı etkisi ve yönlendirme değişimleri nedeniyle ek tasarım zorlukları taşımaktadır (Mehmood & Mehmood, 2025). Bu bağlamda mmWave anten tasarımı, yalnızca yüksek kazanç elde etmeyi değil, aynı zamanda gerçek kullanım senaryolarında güvenilir bağlantı sürdürülebilirliğini sağlamayı hedeflemektedir.

6. THz VE SUB-THz ANTEN TEKNOLOJİLERİ

Sub-THz ve THz bantları, 6G için çok yüksek veri hızı, düşük gecikme ve yüksek çözünürlüklü algılama potansiyeli sunan frekans bölgeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu bantların en önemli avantajı, geleneksel mikrodalga ve mmWave bantlarına göre çok daha geniş kullanılabilir spektrum sağlamasıdır. Bununla birlikte, yüksek frekanslı çalışmanın doğal sonucu olarak moleküler soğurma, serbest uzay yol kaybı, donanım verimsizliği, paketleme güçlükleri ve ölçüm altyapısı sınırlamaları ciddi zorluklar yaratmaktadır (Moltchanov et al., 2022; Thomas et al., 2024).

Yakın dönem 6G çalışmaları çoğunlukla sub-THz bantlarına odaklanırken, daha yüksek THz bantları daha uzun vadeli araştırma alanları olarak değerlendirilmektedir. Anten tasarımında yüksek kazançlı açıklıklar, lens destekli sistemler, ultra-massive diziler, antenna-on-chip çözümleri ve yeni

malzeme temelli yapılar öne çıkmaktadır (Guo et al., 2025; Thomas et al., 2024). Ancak kısa dalga boyunun sağladığı fiziksel sıkıştırma avantajı, aynı zamanda üretim toleransları ve yüzey pürüzlülüğüne duyarlılığı da artırmaktadır.

Bu nedenle THz antenlerin başarısı yalnızca geometri optimizasyonuna bağlı değildir. Yarı iletken cihaz teknolojisi, besleme yapıları, paketleme, ısı yönetimi, kanal modelleme ve hüzme hizalama algoritmaları birlikte değerlendirilmelidir (Moltchanov et al., 2022; Thomas et al., 2024). THz haberleşmenin 6G bağlamındaki gerçek potansiyeli, ancak cihaz, anten ve sistem düzeyindeki bu çok katmanlı tasarım gereksinimlerinin birlikte ele alınmasıyla ortaya çıkacaktır. Tablo 3'te, mmWave ve THz anten tasarımında karşılaşılan başlıca teknik zorluklar ve çözüm yönelimleri sunulmaktadır.

Tablo 3. mmWave ve THz anten tasarımındaki başlıca zorluklar ve olası çözüm yaklaşımları

Zorluk	mmWave	THz / sub-THz	Olası çözüm yaklaşımı
Yol kaybı	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek kazançlı diziler, dar hüzmeler, beamforming
Atmosferik soğurma	Bantlara bağlı	Daha belirgin	Uygun pencere frekanslarının seçimi, kısa menzilli bağlantılar
Donanım kaybı	Orta-yüksek	Çok yüksek	Düşük kayıplı malzemeler, gelişmiş besleme ve paketleme
Üretim hassasiyeti	Önemli	Kritik	Mikro/nano üretim teknikleri, hassas tolerans kontrolü
Paketleme etkisi	Belirgin	Çok kritik	Anten-paketleme eş tasarımı
Isı yönetimi	Orta	Yüksek	Isıl tasarımın, verimli yarı iletken ve modül yapıları
Hüzme hizalama	Gerekli	Çok kritik	Hızlı beam tracking ve akıllı kontrol algoritmaları
Ölçüm altyapısı	Gelişmiş ancak maliyetli	Sınırlı ve karmaşık	Yeni test, kalibrasyon ve karakterizasyon yöntemleri

7. REFLECTARRAY, TRANSMITARRAY, LENS VE YÖNLENDİRİLEBİLİR ANTENLER

Reflectarray ve transmitarray antenler, yüksek kazançlı açıklık antenlerinin düzlemsel, düşük profilli ve görece düşük maliyetli biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Reflectarray yapıları gelen dalgayı yansıtarak faz kontrollü yönlendirme sağlarken, transmitarray yapıları benzer işlevi iletim üzerinden gerçekleştirmektedir. Her iki yaklaşım da parabolik reflektörlerin yüksek kazanç avantajını daha düzlemsel ve entegre edilebilir yapılarla birleştirmeyi amaçlamaktadır (Guo et al., 2025; Khan et al., 2025).

Reflectarray ve transmitarray tasarımında hücre faz aralığı, bant genişliği, açıklık verimliliği, besleme konumu, çapraz polarizasyon, demet yönlendirme kabiliyeti ve yeniden yapılandırılabilirlik kritik parametrelerdir. Geleneksel reflectarray yapılarının nispeten dar bantlı olma eğilimi, çok katmanlı hücreler, aktif elemanlar, ayarlanabilir birim hücreler ve gelişmiş faz ayarlama yöntemleriyle aşılmaya çalışılmaktadır (Khan et al., 2025; Sohu et al., 2025). 5G/6G bağlamında bu antenler sabit kablosuz erişim, arkabağlantı, uydu haberleşmesi ve yüksek kazançlı mmWave bağlantılar için güçlü adaylardır.

Lens tabanlı antenler de özellikle yüksek frekans bantlarında faz cephesinin kontrollü biçimde şekillendirilmesi ve yüksek yönlülük elde edilmesi açısından önem kazanmaktadır. Bu yapılar, beam squint, açıklık verimliliği ve üretim karmaşıklığı gibi konular bakımından değerlendirilmekte; özellikle sub-THz ve THz sistemlerde alternatif yüksek kazançlı çözümler olarak öne çıkmaktadır (Guo et al., 2025; Thomas et al., 2024).

8. RIS, METASURFACE VE AKILLI RADYO ORTAMI YAKLAŞIMI

Yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler ve metasurface temelli yaklaşımlar, kablosuz ortamı kontrol edilebilir bir tasarım değişkenine dönüştürme fikrine dayanmaktadır. Klasik sistemlerde yayılım ortamı çoğunlukla kontrol edilemeyen bir kanal olarak kabul edilirken, RIS yaklaşımı yüzey üzerindeki birim hücrelerin elektromanyetik davranışını ayarlayarak sinyal yayılımını yönlendirmeyi hedeflemektedir (Guo et al., 2025; Lin, 2025). Bu çerçevede RIS yapıları, tek başına klasik anlamda bir anten çözümünden çok, anten sistemleriyle birlikte çalışan ve ortam mühendisliğini mümkün kılan yüzey tabanlı bir mimari olarak değerlendirilmelidir.

RIS destekli mimariler kapsama boşluklarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, girişim yönetimi, fiziksel katman güvenliği ve

bağlantı güvenilirliği açısından önemli potansiyel taşımaktadır. Özellikle 6G döneminde RIS'in massive MIMO, yüksek frekanslı haberleşme, yapay zekâ destekli ağ kontrolü ve ISAC senaryolarıyla birlikte değerlendirilmesi beklenmektedir (Guo et al., 2025; Sandrasegaran & Ali, 2025). Bununla birlikte kanal durum bilgisinin elde edilmesi, gerçek zamanlı kontrol, donanım doğruluğu ve ölçeklenebilir uygulama gibi sorunlar alanın başlıca açık problemleri arasında yer almaktadır.

RIS ve akıllı metasurface yaklaşımları, gelecekte yalnızca kapsama iyileştirme aracı olarak değil; aynı zamanda programlanabilir elektromanyetik ortamların temel bileşeni olarak görülmektedir. Bu nedenle bu alandaki araştırmaların anten tasarımı, yüzey fiziği, kontrol algoritmaları ve haberleşme protokollerini birlikte ele alan çok disiplinli bir yapıda ilerlemesi beklenmektedir. RIS destekli bir haberleşme senaryosunda doğrudan yolun zayıfladığı veya engellendiği durumlarda yansıtıcı yüzeyler alternatif yayılım yolları oluşturabilir; bu yaklaşım Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. RIS/metasurface destekli haberleşme senaryosunda akıllı radyo ortamının kavramsal gösterimi.

9. ŞEFFAF, ESNEK VE GİYİLEBİLİR ANTEN TEKNOLOJİLERİ

Şeffaf, esnek ve giyilebilir antenler, 5G ve 6G sistemlerinin insan-merkezli, çevreyle bütünleşik ve yoğun cihaz bağlantılı yapısında önemli bir rol oynamaktadır. Optik şeffaf antenler cam yüzeylere, araç camlarına, bina cephelerine ve ekranlara entegre edilebilirken; esnek ve tekstil tabanlı antenler sağlık izleme, spor, askeri uygulamalar ve kişisel alan ağları için uygun çözümler sunmaktadır (Dominguez et al., 2025; Singh et al., 2025).

Bu antenlerde elektromanyetik performansın yanında mekanik dayanıklılık, bükülme altında kararlılık, malzeme iletkenliği, üretim yöntemi,

kullanıcı güvenliği ve insan vücudu etkisi birlikte ele alınmalıdır. Özellikle optik şeffaf antenlerde iletkenlik ile optik geçirgenlik arasında doğal bir denge problemi bulunmaktadır; yüksek geçirgenlik çoğu zaman iletkenliği ve dolayısıyla radyasyon verimliliğini azaltabilmektedir (Dominguez et al., 2025). Benzer biçimde esnek ve giyilebilir yapılarda deformasyon, nem, sıcaklık ve yüzey koşulları anten davranışını belirgin biçimde etkileyebilmektedir. Şekil,5’de giyilebilir antenlerde kazanç, bant genişliği, bükülme dayanımı, kullanıcı konforu ve SAR gibi ölçütlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini özetlemektedir.

Giyilebilir antenlerde insan vücuduna yakın çalışma koşulları empedans uyumsuzluğu, radyasyon örüntüsünde bozulma ve SAR sınırlamaları gibi ek tasarım gereksinimleri ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle tasarım sürecinde yalnızca laboratuvar ortamı değil, gerçekçi kullanım koşulları da dikkate alınmalıdır (Mehmood & Mehmood, 2025; Singh et al., 2025). Gelecekte insan-merkezli 6G sistemlerinde bu antenlerin önemi daha da artacak; ancak elektromanyetik performans, mekanik esneklik ve biyogüvenliğin birlikte optimize edilmesi temel şart olacaktır. Tablo 4’te, şeffaf, esnek ve giyilebilir antenlerin temel özellikleri, uygulama alanları ve sınırlamaları verilmektedir.



Şekil 5. Giyilebilir anten tasarımında elektromanyetik performans, mekanik dayanım ve biyogüvenlik ölçütleri.

Tablo 4. Şeffaf, esnek ve giyilebilir antenlerin temel özellikleri, uygulama alanları ve başlıca zorlukları

Anten türü	Temel avantaj	Uygulama alanı	Başlıca zorluk
Optik şeffaf anten	Görsel entegrasyon ve estetik uyum	Cam yüzeyler, ekranlar, araç ve bina cepheleri	Geçirgenlik-verimlilik dengesi
Esnek anten	Mekanik uyum ve hafiflik	IoT cihazları, taşınabilir elektronikler	Bükülme altında performans kararlılığı
Giyilebilir anten	Vücut üstü haberleşme	Sağlık izleme, spor, askeri ve kişisel alan ağları	SAR, empedans uyumu, insan vücudu etkisi
Tekstil anten	Kullanıcı konforu ve giyilebilir entegrasyon	Akıllı kıyafetler ve e-sağlık sistemleri	Nem, yıkama, deformasyon, dayanıklılık
Şeffaf-esnek hibrit anten	Hem görsel hem mekanik entegrasyon	Akıllı camlar, giyilebilir ekranlar	Malzeme seçimi ve üretim karmaşıklığı

10. YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ DESTEKLİ ANTEN TASARIMI

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, anten tasarımında artan parametre karmaşıklığını yönetmek için giderek daha önemli araçlar hâline gelmektedir. Geleneksel elektromanyetik benzetimler yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, çok değişkenli optimizasyon problemlerinde zaman ve hesaplama maliyeti oldukça yüksek olabilmektedir. Buna karşılık makine öğrenmesi tabanlı modeller, anten geometrisi ile performans çıktıları arasında hızlı kestirim ilişkileri kurarak tasarım döngüsünü kısaltabilmektedir (Basherlou et al., 2025; Muttair et al., 2025).

Anten modellemede yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, Gaussian process regression, evrimsel optimizasyon yöntemleri ve derin öğrenme temelli yaklaşımlar; rezonans frekansı, bant genişliği, kazanç, yansıma katsayısı ve radyasyon örüntüsü gibi çıktıların tahmini veya optimize edilmesi için kullanılmaktadır (Jain et al., 2025; Muttair et al., 2025). 6G bağlamında bu kullanım alanı yalnızca tekil anten geometrilerinin optimizasyonu ile sınırlı değildir. Anten dizisi kontrolü, hüzmeye yönetimi, RIS ayarı, kanal farkındalığı ve sistem düzeyi adaptasyon gibi alanlarda da yapay zekâ destekli yöntemlerin etkisinin artması beklenmektedir (Guo et al., 2025; Omheni et al., 2025).

Bununla birlikte, yapay zekâ destekli yaklaşımların başarısı eğitim verisinin kalitesine, modelin genellenebilirliğine ve fiziksel yorumlanabilirliğine bağlıdır. Bu nedenle gelecekte AI/ML tabanlı anten tasarım çalışmalarının yalnızca hız ve doğruluk açısından değil, güvenilirlik, açıklanabilirlik ve gerçek sistemlere aktarılabilirlik bakımından da

değerlendirilmesi gerekmektedir (Muttair et al., 2025; Omheni et al., 2025). Anten tasarımında veriye dayalı ve fizik temelli yöntemlerin birlikte kullanılması, en umut verici araştırma yönlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

11. ISAC, NTN VE 6G GELECEK EĞİLİMLERİ AÇISINDAN ANTEN SİSTEMLERİ

6G sistemlerinin ayırt edici yönlerinden biri, haberleşme altyapısının aynı zamanda algılama, konumlandırma ve çevresel farkındalık işlevlerini de desteklemesidir. Bütünleşik algılama ve haberleşme yaklaşımı, radar benzeri algılama ile veri iletimini ortak spektrum, ortak donanım veya ortak dalga biçimi altında birleştirmeyi hedeflemektedir. Bu durum anten sistemlerinden hem yüksek yönlülük hem de hassas hüzme kontrolü beklenmesine yol açmaktadır (Koivunen et al., 2024; Lin, 2025).

Bu bağlamda anten dizileri, yalnızca bağlantı performansını artıran yapılar olmaktan çıkarak çevresel bilgi toplama, nesne algılama, konum doğrulama ve bağlamsal farkındalık sağlayan çok işlevli sistem bileşenlerine dönüşmektedir. Özellikle yüksek frekans bantlarında dar hüzmeler ve geniş açıklıklar, haberleşme ile algılama işlevlerinin bir arada yürütülmesi için avantaj sağlamaktadır; ancak bu durum tasarım karmaşıklığını da artırmaktadır (Guo et al., 2025; Koivunen et al., 2024).

Karasal olmayan ağlar, insansız hava araçları, yüksek irtifa platformları ve uydu destekli mimariler ise anten tasarımında farklı gereksinimler ortaya koymaktadır. NTN senaryolarında anten tasarımı; yön takibi, hareketlilik, bağlantı sürekliliği, düşük profil ve enerji kısıtları nedeniyle kara tabanlı sistemlerden daha farklı optimizasyon öncelikleri gerektirmektedir (Lin, 2025; Sandrasegaran & Ali, 2025). Bu nedenle 6G anten sistemleri, haberleşme, algılama, yönlendirme ve akıllı kontrol arasında köprü kuran çok işlevli platformlar olarak yeniden tanımlanmaktadır.

12. TASARIM ZORLUKLARI, AÇIK PROBLEMLER VE GELECEK ARAŞTIRMA YÖNLERİ

5G ve 6G anten teknolojilerindeki hızlı ilerlemeye rağmen çözülmesi gereken çok sayıda açık problem bulunmaktadır. Yüksek frekans bantlarında artan yol kaybı, atmosferik soğurma, üretim toleransları, yüzey pürüzlülüğü, besleme kayıpları ve paketleme sorunları özellikle mmWave, sub-THz ve THz antenler için temel kısıtlar arasındadır (Moltchanov et al., 2022; Thomas

et al., 2024; Yang et al., 2025). Bu sorunlar, teorik olarak mümkün görünen birçok anten çözümünün pratikte istenen performansa ulaşmasını zorlaştırmaktadır.

Anten dizileri ve hüzme kontrolü alanında kanal kestirimi, hüzme hizalama, RF zinciri maliyeti, güç tüketimi ve donanım karmaşıklığı önemli araştırma başlıklarıdır. Massive MIMO ve ultra-massive dizilerde eleman sayısının artması kapasite ve yönlülük açısından avantaj sağlarken; besleme ağı, karşılıklı kuplaj, kalibrasyon ve ölçeklenebilir donanım sorunlarını da beraberinde getirmektedir (Khwandah et al., 2021; Kikan & Kumar, 2024).

İnsan merkezli ve esnek uygulamalarda ise farklı sorunlar ön plana çıkmaktadır. Giyilebilir antenlerde biyogüvenlik, vücut etkisi, deformasyon altında performans kararlılığı ve uzun süreli kullanım güvenilirliği kritik konular arasındadır. Şeffaf antenlerde ise optik geçirgenlik ile elektromanyetik verim arasında süregelen denge problemi devam etmektedir (Dominguez et al., 2025; Singh et al., 2025). Bu alanlarda gelecekteki çalışmaların malzeme teknolojisi, üretim süreçleri ve deneysel doğrulama yöntemlerini birlikte ele alması gerekmektedir.

Bunlara ek olarak yapay zekâ destekli optimizasyon, anten-paketleme eş tasarımı, yeniden yapılandırılabilir yüzeylerle ortak tasarım, ölçüm standartları, sürdürülebilir malzemeler ve ISAC uyumlu çok işlevli anten platformları alanın en umut verici araştırma yönleri arasında yer almaktadır (Basherlou et al., 2025; Guo et al., 2025; Ojaroudi Parchin, 2025). Dolayısıyla anten tasarımı artık klasik elektromanyetik problem çözümünün ötesine geçmiş; malzeme, üretim, algoritma, kontrol ve sistem mimarisini aynı anda içeren çok disiplinli bir optimizasyon alanına dönüşmüştür.

13. SONUÇ

Bu bölümde 5G ve 6G kablosuz haberleşme sistemleri için anten teknolojileri; temel gereksinimler, başlıca mimari yaklaşımlar, teknik sınırlamalar ve gelecek eğilimleri açısından değerlendirilmiştir. İncelenen literatür, antenlerin yeni nesil kablosuz ağlarda yalnızca fiziksel katman elemanları olarak değil; kapasite, kapsama, enerji verimliliği, mekânsal işleme, algılama yeteneği ve akıllı radyo ortamı kontrolü üzerinde belirleyici role sahip bütünleşik sistem bileşenleri olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir (Guo et al., 2025; Kikan & Kumar, 2024; Thomas et al., 2024).

5G ile öne çıkan massive MIMO, mmWave anten dizileri ve demet şekillendirme teknikleri, 6G vizyonuyla birlikte sub-THz ve THz haberleşme, ultra-massive diziler, RIS destekli ortam mühendisliği, ISAC tabanlı çok

işlevli platformlar, NTN senaryoları ve yapay zekâ destekli optimizasyon yaklaşımlarıyla daha geniş ve daha karmaşık bir araştırma alanına dönüşmektedir (Guo et al., 2025; Koivunen et al., 2024; Lin, 2025). Bu dönüşüm, anten tasarımının artık yalnızca elektromanyetik performans iyileştirmesi problemi olarak değil; malzeme, üretim, paketlenme, RF ön uç entegrasyonu, termal yönetim, algoritmik kontrol ve sistem düzeyi uyumluluğu birlikte içeren çok disiplinli bir mühendislik problemi olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, 6G çağında başarılı anten sistemlerinin geliştirilebilmesi; yüksek frekans donanım teknolojilerinin, elektromanyetik tasarım yaklaşımlarının, akıllı kontrol yöntemlerinin ve sistem düzeyi entegrasyon stratejilerinin eşgüdümlü biçimde ilerlemesine bağlıdır. Bu nedenle geleceğin antenleri yalnızca daha yüksek kazanç veya daha geniş bant sağlayan yapılar değil; aynı zamanda çevreye uyumlanabilen, çok işlevli, enerji verimli ve haberleşme ile algılamayı bütünleştirebilen akıllı platformlar olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

Al-Hiti, A. S., Ahmed, A. K., Mhmood, S. H., & Hamdallah, B. I. (2025). Broadband and multiband millimeter wave microstrip patch antenna for 5G and 6G applications. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00161-w>

Algburi, M. Q., Al-Jaff, S. K., Muhi, A. N., & Ghanim, M. (2025). The evolution of mobile communications: A review about 5G technologies and future directions. *Journal of Communications*. <https://doi.org/10.12720/jcm.20.2.199-213>

Baqir, Z. M. (2025). Advancements in MIMO technology for 5G and 6G: A review of challenges, solutions, and performance. *Asian Journal of Science and Applied Technology*. <https://doi.org/10.70112/ajsat-2025.14.1.4285>

Basherlou, H. J., Ojaroudi Parchin, N., & See, C. H. (2025). Antenna design and optimization for 5G, 6G, and IoT. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s25051494>

Darling, J. S., Guruviah, V., & Dwivedi, R. P. (2025). SIW technology for 5G antenna applications and beyond—A critical review. *International Journal of Communication Systems*. <https://doi.org/10.1002/dac.6036>

Didi, S.-E., Halkhams, I., Es-Saqy, A., Fattah, M., Mazer, S., & El Bekkali, M. (2025). Design of a soft circular patch antenna operating in the 60 GHz band for 5G/6G applications. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v23i4.26722>

Dominguez, B., Silva, F., Baghel, A., Albuquerque, D., & Pinho, P. (2025). Optically transparent antennas for 5G and beyond: A review. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics14081616>

Guo, Y. J., Guo, C. A., Li, M., & Latva-aho, M. (2025). Antenna technologies for 6G—Advances and challenges. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. <https://doi.org/10.1109/TAP.2025.3550434>

Jain, R., Ramya, R., Thakare, V. V., & Singhal, P. K. (2025). Design and analysis of antenna through machine learning for next-generation IoT system. *Discover Internet of Things*. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00126-4>

Khan, S. D., Abbasi, M. I., Ibrahim, I. M., Zeain, M. Y., Mufti, N., Kamarudin, M. R., & Sulaiman, N. H. (2025). Bandwidth and gain performance of reflectarray antennas for 5G communications: A review. *ASEAN Engineering Journal*. <https://doi.org/10.11113/aej.v15.22408>

Khwandah, S. A., Cosmas, J. P., Lazaridis, P. I., Zaharis, Z. D., & Chochliouros, I. P. (2021). Massive MIMO systems for 5G communications. *Wireless Personal Communications*. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08550-9>

Kikan, V., & Kumar, A. (2024). A detailed review of 5G MIMO and array antenna design evolution with performance enhancement for mmWave applications. *Wireless Networks*. <https://doi.org/10.1007/s11276-024-03862-7>

Koivunen, V., Keskin, M. F., Wymeersch, H., Valkama, M., & González-Prelcic, N. (2024). Multicarrier ISAC: Advances in waveform design, signal processing, and learning under nonidealities. *IEEE Signal Processing Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MSP.2024.3420492>

Li, P., Fan, J., & Wu, J. (2025). Exploring the key technologies and applications of 6G wireless communication network. *iScience*. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112281>

Lin, X. (2025). 3GPP evolution from 5G to 6G: A 10-year retrospective. *Telecom*. <https://doi.org/10.3390/telecom6020032>

Manea, I.-A., Coșnița, M.-I., Andraș, C.-M., & Alexa, F. (2025). MIMO systems in 5G: A review. In *2025 18th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*. <https://doi.org/10.1109/EMES65692.2025.11045633>

Mehmood, F., & Mehmood, A. (2025). Recent advancements in millimeter-wave antennas and arrays: From compact wearable designs to beam-steering technologies. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics14132705>

Moltchanov, D., Sopin, E., Begishev, V., Samuylov, A., Koucheryavy, Y., & Samouylov, K. (2022). A tutorial on mathematical modeling of 5G/6G millimeter wave and terahertz cellular systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3156207>

Muttair, K. S., Shareef, O. A., & Taher, H. B. (2025). Machine learning based on antennas modeling for 5G and 6G communication systems: A systematic review. *International Journal of Communication Systems*. <https://doi.org/10.1002/dac.70105>

Nauman, A., Haider, S. K., Khurshaid, T., & Kim, S. W. (2025). Toward 6G and beyond: A comprehensive study of antenna design, selection, and suitability for cooperative communication. *Mobile Networks and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11036-025-02464-7>

Ojaroudi Parchin, N. (Ed.). (2025). Antenna design and optimization for 5G, 6G, and IoT. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-3642-0>

Omheni, N., Koubaa, H., & Zarai, F. (2025). Artificial intelligence for 5G and 6G networks: A taxonomy-based survey of applications, trends, and challenges. *Technologies*. <https://doi.org/10.3390/technologies13120559>

Saeed, M. A., & Nwajana, A. O. (2024). A review of beamforming microstrip patch antenna array for future 5G/6G networks. *Frontiers in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1288171>

Sandrasegaran, K., & Ali, S. (2025). Research directions in 6G: Pioneering the next generation of wireless communication. In *2025 22nd International Conference*

on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON64996.2025.11100997>

Siddiky, M. N. A., Rahman, M. E., Uzzal, M. S., & Kabir, H. M. D. (2025). A comprehensive exploration of 6G wireless communication technologies. *Computers*. <https://doi.org/10.3390/computers14010015>

Singh, S., Mishra, R., Kapoor, A., & Singh, S. (2025). A comprehensive review and analysis of the design aspects, structure, and applications of flexible wearable antennas. *Telecom*. <https://doi.org/10.3390/telecom6010003>

Sohu, I. A., Abbasi, M. I., Ibrahim, I. M., Sohoo, A. A., & Sulaiman, N. H. (2025). Shaping the future of wireless communication: An analysis of reflectarray antennas for 5G/6G. *ASEAN Engineering Journal*. <https://doi.org/10.11113/aej.v15.23195>

Thomas, S., Virdi, J. S., Babakhani, A., & Roberts, I. P. (2024). A survey on advancements in THz technology for 6G: Systems, circuits, antennas, and experiments. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3549710>

Wen, F., Wymeersch, H., Peng, B., Tay, W. P., So, H. C., & Yang, D. (2019). A survey on 5G massive MIMO localization. *Digital Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.05.005>

Yang, Y., Mao, M., Xu, J., Liu, H., Wang, J., & Song, K. (2025). Millimeter-wave antennas for 5G wireless communications: Technologies, challenges, and future trends. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s25175424>

İkiz Dönüşümde Yapay Zeka Ajanları: Dijital İkiz Tabanlı Karbon Yönetimi İçin Bir LangChain Mimarisi Önerisi

Alper AYTEKİN¹

İlknur AYTEKİN²

- 1- Prof. Dr.; Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, aytekin@ohu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2756-7870>
- 2- Yüksek Lisans Öğrencisi.; Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. ilknuraytekin@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1174-602X>

ÖZET

Endüstriyel üretim sistemlerinde dijital dönüşüm ve sürdürülebilirlik hedeflerinin eş zamanlı olarak ele alınması, “İkiz Dönüşüm” (Twin Transition) yaklaşımını stratejik bir araştırma alanı haline getirmiştir. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojileri, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve modellenmesinde önemli bir rol oynamakla birlikte, karar destek ve optimizasyon kapasitesi açısından belirli sınırlılıklar içermektedir. Özellikle karbon emisyonu yönetimi gibi çok değişkenli ve düzenleyici kısıtların yoğun olduğu problemler, geleneksel dijital ikiz mimarilerinin ötesinde daha gelişmiş bilişsel sistemlere ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışma, dijital ikiz sistemlerini Büyük Dil Modelleri (Large Language Models–LLM) tabanlı çoklu ajan mimarileri ile bütünleştiren yeni bir karar destek çerçevesi önermektedir. Önerilen mimari, LangChain orkestrasyon altyapısı kullanılarak tasarlanmış olup, fiziksel sistemlerden gelen IoT tabanlı sensör verileri ile sürdürülebilirlik regülasyonlarını içeren yapılandırılmamış bilgi kaynaklarını Geri Çağırma ile Zenginleştirilmiş Üretim (Retrieval-Augmented Generation–RAG) yaklaşımı aracılığıyla entegre etmektedir.

Geliştirilen çoklu ajan sistemi; karbon analitiği, regülasyon uyumu ve operasyonel optimizasyon görevlerini üstlenen uzman ajanlardan oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde sistem, yalnızca durum izleme işlevi gerçekleştirmekle kalmayıp, aynı zamanda karbon emisyonlarını optimize eden ve yasal uyumluluğu gözeten proaktif karar önerileri üretebilmektedir. Önerilen yaklaşım, dijital ikizlerin otonomi seviyesini artırarak siber-fiziksel sistemlerde karar destek kapasitesinin genişletilmesine katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak çalışma, yapay zeka tabanlı ajan mimarilerinin sürdürülebilir üretim sistemlerinde uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve karbon yönetimi odaklı dijital ikiz sistemleri için bütünsel bir mimari çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – İkiz Dönüşüm, Dijital İkiz, Büyük Dil Modelleri, Çoklu Ajan Sistemleri, LangChain, Karbon Yönetimi.

1. GİRİŞ

1.1. İkiz Dönüşüm Paradigması ve Endüstriyel Sürdürülebilirlik

Küresel ölçekte yaşanan dijitalleşme süreci ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri, endüstriyel üretim sistemlerinde köklü dönüşümlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Son yıllarda literatürde giderek daha fazla vurgulanan “İkiz Dönüşüm” (Twin Transition) kavramı, dijital dönüşüm ve

yeşil dönüşüm süreçlerinin eş zamanlı olarak değerlendirilmesini ifade etmektedir. Bu yaklaşım, dijital teknolojilerin yalnızca operasyonel verimliliği artıran araçlar olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı destekleyen stratejik bileşenler olarak ele alınmasını öngörmektedir (European Commission, 2020).

Dijital dönüşüm; nesnelerin interneti (Internet of Things–IoT), büyük veri analitiği, yapay zeka, siber-fiziksel sistemler ve bulut bilişim teknolojileri aracılığıyla üretim süreçlerinin daha akıllı, bağlantılı ve otonom hale getirilmesini amaçlamaktadır. Buna karşılık yeşil dönüşüm; enerji verimliliğinin artırılması, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi çevresel hedefleri kapsamaktadır. Günümüzde bu iki dönüşüm süreci birbirinden bağımsız olarak değerlendirilememekte ve işletmeler açısından bütünsel bir strateji gerektirmektedir.

Özellikle küresel iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında geliştirilen uluslararası politikalar ve düzenleyici mekanizmalar, endüstriyel kuruluşlar üzerinde önemli yükümlülükler oluşturmaktadır. Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal) ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (Carbon Border Adjustment Mechanism–CBAM) gibi düzenlemeler, işletmelerin karbon emisyonlarını yalnızca ölçmelerini değil, aynı zamanda gerçek zamanlı olarak izlemelerini, raporlamalarını ve azaltmalarını gerekli hale getirmektedir (Çelikyay ve Aytekin, 2016).

Karbon yönetimi; doğrudan emisyonlar (Scope 1), dolaylı enerji kaynaklı emisyonlar (Scope 2) ve tedarik zinciri kaynaklı emisyonlar (Scope 3) gibi farklı kaynakların eş zamanlı değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir süreçtir. Bu durum, karbon yönetimini klasik optimizasyon problemlerinden ayırmakta ve çok kriterli karar verme yaklaşımlarının kullanılmasını gerekli hale getirmektedir. Ayrıca enerji tüketim modelleri, üretim parametreleri, yasal kısıtlar ve ekonomik faktörler gibi değişkenlerin dinamik yapısı, geleneksel yönetim sistemlerinin yetersiz kalmasına neden olabilmektedir (European Commission, 2020).

Bu bağlamda, dijital teknolojilerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda kullanılması, endüstriyel sistemlerin geleceği açısından önemli araştırma alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu dönüşümün operasyonel seviyede yönetilebilmesi, siber-fiziksel sistemler ile bilişsel yapay zeka mimarilerinin bütünsel bir altyapıda ele alınmasını gerektirmektedir.

1.2. Geleneksel Dijital İkizlerin Sınırları ve Anlamlandırma Sorunu

Siber-fiziksel sistemlerin önemli bileşenlerinden biri olan Dijital İkiz (Digital Twin) teknolojisi, fiziksel bir sistemin gerçek zamanlı verilerle sürekli güncellenen sanal temsilini ifade etmektedir (Grieves, 2014). Dijital ikiz yaklaşımı, üretim sistemlerinin durum izleme, performans değerlendirme ve öngörücü bakım gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Literatürde dijital ikizlerin özellikle operasyonel süreçlerin görünürliğini artırma, süreç performansını izleme ve fiziksel sistem davranışlarını modelleme açısından önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir. Ancak karbon yönetimi gibi dinamik ve düzenlemelere bağımlı alanlarda mevcut dijital ikiz sistemlerinin bazı sınırlılıkları bulunmaktadır (Kritzing et al, 2018; Tao et al, 2019; Fuller et al, 2020).

İlk olarak, mevcut sistemler büyük ölçüde gözlem ve izleme temelli çalışmaktadır. Başka bir ifadeyle sistemler, belirli eşik değerlerin aşılması durumunda kullanıcıya uyarı verebilmekte; ancak oluşan durumun nasıl optimize edileceğine ilişkin proaktif öneriler geliştirememektedir. Örneğin bir üretim hattında karbon emisyonunun kritik seviyeyi aşması durumunda, sistem operatöre yalnızca bir alarm iletebilmekte, ancak üretim kayıplarını en aza indirecek alternatif operasyonel stratejileri değerlendirememektedir.

İkinci önemli sınırlılık ise yapılandırılmamış veri işleme kapasitesiyle ilişkilidir. Karbon yönetimi yalnızca sensörlerden elde edilen sayısal verilere dayanmamaktadır. Aynı zamanda uluslararası sürdürülebilirlik standartları, çevresel mevzuatlar, karbon fiyatlandırma politikaları ve kurumsal sürdürülebilirlik raporları gibi büyük miktarda metinsel verinin de değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Geleneksel veri işleme yöntemleri çoğunlukla yapılandırılmış veri kaynaklarına odaklandığından, yapılandırılmamış metinlerden anlamlı bilgi üretme ve bu bilgileri operasyonel karar süreçlerine dahil etme konusunda sınırlılıklar göstermektedir. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı sürdürülebilirlik yönetimi açısından önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır.

1.3. Önerilen Yaklaşım ve Çalışmanın Katkıları

Bu çalışma kapsamında, geleneksel dijital ikiz sistemlerinin veri izleme odaklı yapısını genişletmek amacıyla, Büyük Dil Modelleri (Large Language Models–LLM) ile desteklenen çoklu ajan tabanlı bir dijital ikiz mimarisi önerilmektedir.

Önerilen mimari, gerçek zamanlı IoT verileri ile sürdürülebilirlik regülasyonlarını bütünleşik biçimde değerlendirebilen ve karar destek süreçlerine katkı sağlayabilen akıllı bir sistem yaklaşımını temel almaktadır. Sistem mimarisinde, fiziksel üretim ortamından elde edilen operasyonel veriler dijital ikiz altyapısı üzerinden işlenmekte, sürdürülebilirlik düzenlemelerine ilişkin bilgi kaynakları ise Geri Çağırma ile Zenginleştirilmiş Üretim (Retrieval-Augmented Generation–RAG) altyapısı aracılığıyla sisteme entegre edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımın literatüre katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Dijital ikiz sistemlerinin yalnızca izleme ve durum değerlendirme işlevlerinin ötesine geçirilerek, LLM tabanlı ajan yapılarıyla desteklenen karar odaklı bir mimari önerilmiştir.

2. Karbon yönetimi süreçlerinde çoklu ajan sistemleri ile LangChain tabanlı araç kullanım mekanizmalarının bütünleşik biçimde kullanılmasına yönelik uygulanabilir bir mimari sunulmuştur.
3. Yapılandırılmış sensör verileri ile yapılandırılmamış sürdürülebilirlik regülasyonlarının RAG tabanlı bir çerçevede birlikte değerlendirilebildiği bir karar destek yaklaşımı geliştirilmiştir.
4. Karbon emisyonlarının gerçek zamanlı izlenmesi ve operasyonel optimizasyon süreçlerinin otonom biçimde desteklenmesine yönelik kavramsal bir sistem modeli ortaya konulmuştur.

Bu yaklaşımın, sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesine ve dijital ikiz tabanlı karar destek süreçlerinin daha akıllı hale getirilmesine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

2. KAVRAMSAL ALTYAPI VE TEKNOLOJİK BİLEŞENLER

Bu bölümde önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisinin teorik ve teknolojik altyapısını oluşturan temel bileşenler ele alınmaktadır. Çalışmanın kavramsal çerçevesi üç temel teknoloji üzerine inşa edilmiştir: dijital ikiz sistemleri, Büyük Dil Modelleri (Large Language Models–LLM) tabanlı ajan mimarileri ve bilgiye dayalı karar üretimini destekleyen Geri Çağırma ile Zenginleştirilmiş Üretim (Retrieval-Augmented Generation–RAG) yaklaşımı. Söz konusu teknolojilerin birlikte değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik odaklı karar destek süreçlerinin daha dinamik ve bağlamsal hale getirilmesini mümkün kılmaktadır.

2.1. Dijital İkizlerde Siber-Fiziksel Senkronizasyon Düzeyleri

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel sistemler ile bunların sanal temsilleri arasında sürekli veri alışverişine dayanan siber-fiziksel sistemlerin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Dijital ikiz kavramı ilk olarak fiziksel varlıkların yaşam döngüsü boyunca davranışlarının dijital ortamda modellenmesi amacıyla geliştirilmiş olmakla birlikte, günümüzde akıllı üretim, enerji yönetimi, sağlık sistemleri ve akıllı şehir uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Literatürde dijital ikiz sistemleri, fiziksel ve sanal sistemler arasındaki veri akış yönü ve etkileşim düzeyi dikkate alınarak farklı kategoriler altında incelenmektedir. Bu sınıflandırma, dijital sistemlerin sahip oldukları otonomi düzeylerini ve karar verme kapasitelerini ortaya koymaktadır (Kritzing et al, 2018).

İlk düzey olan Dijital Model (Digital Model), fiziksel sistem ile sanal temsil arasında otomatik veri aktarımının bulunmadığı yapıları ifade etmektedir. Bu yaklaşımda veriler manuel yöntemlerle sisteme aktarılmakta ve sanal modelde gerçekleştirilen değişiklikler fiziksel sistemi doğrudan etkilememektedir.

İkinci düzey olan Dijital Gölge (Digital Shadow) yaklaşımında fiziksel sistemden sanal sisteme doğru tek yönlü bir veri akışı bulunmaktadır. Bu modelde fiziksel sistemde meydana gelen değişiklikler gerçek zamanlı olarak sanal modele aktarılabilir; ancak sanal ortamda gerçekleştirilen işlemler fiziksel sistem üzerinde doğrudan bir etki oluşturmamaktadır.

En gelişmiş yapı olan Dijital İkiz (Digital Twin) yaklaşımında ise fiziksel ve sanal sistemler arasında çift yönlü ve sürekli veri iletişimi gerçekleştirilmektedir. Bu yapı, fiziksel sistem davranışlarının yalnızca izlenmesini değil, aynı zamanda sanal ortamda geliştirilen optimizasyon mekanizmalarının fiziksel süreçlere aktarılmasını da mümkün hale getirmektedir.

Bu çalışma kapsamında önerilen sistem mimarisi, tam ölçekli dijital ikiz yaklaşımını temel almaktadır. Önerilen yapıda fiziksel üretim ortamından elde edilen sensör verileri sürekli olarak dijital modele aktarılmakta, buna karşılık yapay zeka tabanlı karar mekanizmaları tarafından üretilen optimizasyon çıktıları fiziksel sistemlere geri beslenebilmektedir. Böylece sistem yalnızca durum izleme işlevi gerçekleştirmemekte, aynı zamanda operasyonel karar süreçlerini de destekleyebilmektedir.

2.2. Büyük Dil Modelleri ve Ajan Tabanlı Yapay Zeka Mimarileri

Yapay zeka teknolojilerindeki son gelişmeler, geleneksel veri odaklı tahmin mekanizmalarının ötesine geçerek doğal dil işleme ve akıl yürütme yeteneklerine sahip sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Özellikle Büyük Dil Modelleri (LLM), geniş veri kümeleri üzerinde eğitilmeleri sayesinde bağlamsal ilişki kurabilme, karmaşık problemleri yorumlayabilme ve doğal dil tabanlı görevleri yerine getirebilme kapasitesine sahiptir (Yao et al, 2022).

Geleneksel makine öğrenmesi modelleri çoğunlukla belirli görevler için eğitilmiş sınırlı yapılardan oluşurken, LLM tabanlı sistemler çok çeşitli görevleri yerine getirebilen daha genel amaçlı bir yapı sunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle LLM'ler son yıllarda karar destek sistemlerinde ve otonom yapay zeka uygulamalarında önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir (Yao et al, 2022).

LLM tabanlı sistemlerin gelişimiyle birlikte literatürde “Ajan Tabanlı Yapay Zeka” yaklaşımı ön plana çıkmıştır. Yapay zeka ajanı; çevresini algılayabilen, elde ettiği bilgileri değerlendirebilen ve belirli hedefler doğrultusunda eylem gerçekleştirebilen yazılım bileşeni olarak tanımlanmaktadır.

Ajanların çalışma mantığı çoğunlukla ReAct (Reasoning and Acting) yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yaklaşım kapsamında ajanlar yalnızca doğrudan yanıt üretmek yerine, çok aşamalı bir karar süreci gerçekleştirmektedir. Süreç genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Yao et al, 2022):

- Problemin değerlendirilmesi ve mevcut durumun yorumlanması,

- Uygun aracın veya veri kaynağının belirlenmesi,
- İlgili eylemin gerçekleştirilmesi,
- Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi,
- Hedef koşullar sağlanıncaya kadar sürecin tekrarlanması.

Bu yaklaşım, özellikle karmaşık endüstriyel problemlerde çok kriterli değerlendirme yapılmasını kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilen mimaride LangChain çerçevesi, ajanların koordinasyonunu sağlayan temel orkestrasyon mekanizması olarak kullanılmaktadır. LangChain mimarisi, LLM sistemlerinin harici veri kaynakları, veri tabanları ve yazılım araçlarıyla bütünleşik biçimde çalışmasına olanak sağlamaktadır. Böylece yapay zeka ajanları yalnızca doğal dil üretimi gerçekleştiren sistemler olmaktan çıkmakta, aynı zamanda çevresel verilerle etkileşim kurabilen karar destek mekanizmalarına dönüşmektedir.

2.3. Sürdürülebilirlik Yönetiminde Geri Çağırma ile Zenginleştirilmiş Üretim (RAG)

LLM tabanlı sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte karşılaşılan temel problemlerden biri, modellerin bilgi güncelliği ve doğruluk düzeyi ile ilişkilidir. Büyük Dil Modelleri belirli bir zaman dilimindeki veri kümeleri üzerinde eğitildikleri için sonradan ortaya çıkan gelişmeleri doğrudan bilememektedir. Ayrıca modeller bazı durumlarda gerçekte var olmayan ancak dilsel olarak tutarlı görünen bilgiler üretebilmektedir. Literatürde bu durum "halüsinasyon" (hallucination) olarak ifade edilmektedir (Lewis et al, 2020).

Mühendislik uygulamaları ve sürdürülebilirlik yönetimi gibi hata toleransının düşük olduğu alanlarda bu durum önemli riskler oluşturmaktadır. Özellikle karbon emisyonu yönetimi, yasal düzenlemeler ve uluslararası standartlara dayalı süreçlerde yanlış bilgi üretimi operasyonel ve finansal sonuçlar doğurabilmektedir (Gao et al., 2023)

Bu sınırlılıkların azaltılması amacıyla geliştirilen yöntemlerden biri Geri Çağırma ile Zenginleştirilmiş Üretim (Retrieval-Augmented Generation–RAG) yaklaşımıdır. RAG mimarisi, LLM sistemlerinin harici bilgi kaynaklarından gerçek zamanlı bilgi elde etmesini sağlayan hibrit bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır.

RAG sistemlerinin çalışma prensibi genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Abbatantuono et al, 2024):

1. Yasal düzenlemeler, teknik standartlar ve kurumsal belgeler gibi yapılandırılmamış veri kaynaklarının anlamlı alt parçalara ayrılması,
2. Metinlerin anlamsal özelliklerini temsil eden vektör yapılarına dönüştürülmesi,
3. Vektörlerin özel veri tabanlarında saklanması,
4. Kullanıcı sorgusuyla ilişkili içeriklerin anlamsal benzerlik yöntemleri kullanılarak geri çağırılması,

5. Elde edilen bağlamsal bilgilerin LLM sistemine aktarılması ve yanıt üretim sürecinde kullanılması.

Bu yaklaşım sayesinde sistemler yalnızca eğitim verilerine bağımlı olmaktan çıkmakta ve güncel bilgi kaynaklarını kullanabilmektedir.

Önerilen mimaride RAG sistemi; sürdürülebilirlik standartları, karbon düzenlemeleri, kurumsal çevresel politikalar ve uluslararası mevzuatlar gibi yapılandırılmamış bilgi kaynaklarının dijital ikiz ortamına entegre edilmesini sağlamaktadır. Böylece sistem tarafından gerçekleştirilen operasyonel kararlar yalnızca sensör verilerine değil, aynı zamanda güncel düzenleyici bağlama da dayandırılabilir.

Bu bütünlük yaklaşımın, sürdürülebilirlik odaklı dijital ikiz sistemlerinin karar doğruluğunu artırabileceği ve daha güvenilir operasyonel çıktılar üretebileceği değerlendirilmektedir.

3. ÖNERİLEN ÇOKLU AJAN TABANLI DİJİTAL İKİZ SİSTEM MİMARİSİ

Bu çalışma kapsamında önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisi, sürdürülebilirlik odaklı karbon yönetimi süreçlerinde gerçek zamanlı veri işleme, bağlamsal bilgi analizi ve otonom karar destek mekanizmalarının bütünlük biçimde çalışmasını amaçlamaktadır. Mimari tasarımın temel amacı, fiziksel üretim sistemlerinden elde edilen operasyonel verileri yalnızca izlemek değil, aynı zamanda bu verileri çevresel düzenlemeler ve operasyonel kısıtlar çerçevesinde değerlendirerek uygulanabilir aksiyon önerilerine dönüştürmektir.

Önerilen sistem, siber-fiziksel sistem yaklaşımına uygun biçimde katmanlı bir yapı üzerine kurulmuştur. Bu yapı; fiziksel sistemlerden veri toplama, verilerin depolanması ve anlamlandırılması, yapay zeka ajanları arasında koordinasyon sağlanması ve son aşamada operasyonel müdahale mekanizmalarının yürütülmesi olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Önerilen Sistemin Dört Katmanlı Yapısı

3.1. Katmanlı Sistem Mimarisi

Önerilen sistem mimarisi Şekil 1'de gösterildiği üzere dört temel katmandan oluşmaktadır.

Katman 1: Fiziksel ve Sensör Katmanı

Bu katman, üretim ortamında bulunan fiziksel bileşenleri ve veri üretim kaynaklarını kapsamaktadır. Akıllı enerji sayaçları, emisyon analiz cihazları, sıcaklık sensörleri, üretim hattı kontrol sistemleri ve PLC tabanlı otomasyon elemanları bu katmanda yer almaktadır.

Fiziksel katmandaki cihazlar sürekli veri üretmekte ve üretim süreçlerinin anlık durumuna ilişkin çeşitli parametreleri izlemektedir. Toplanan veriler arasında aşağıdaki değişkenler yer alabilmektedir:

- Anlık enerji tüketimi (kWh)
- Karbon emisyon miktarı (kg CO₂e)
- Makine çalışma sıcaklığı
- Üretim hızı
- Hata oranı
- Sistem durumu

Bu veriler, dijital ikiz modelinin fiziksel sistemi gerçek zamanlı olarak temsil edebilmesini sağlamaktadır.

Katman 2: Veri ve Bilgi Katmanı

Fiziksel sistemlerden elde edilen veriler, endüstriyel haberleşme protokolleri aracılığıyla veri işleme katmanına aktarılmaktadır. Bu çalışmada

MQTT ve OPC-UA protokolleri temel iletişim mekanizmaları olarak değerlendirilmiştir.

Bu katmanda iki farklı veri yapısı birlikte kullanılmaktadır:

1. Yapılandırılmış Veri Kaynakları

Yapılandırılmış veriler, ilişkisel veri tabanları veya zaman serisi veri tabanlarında depolanmaktadır. Bu veriler ağırlıklı olarak aşağıdaki bilgileri içermektedir:

- Sensör kayıtları
- Enerji tüketim logları
- Emisyon ölçümleri
- Üretim parametreleri
- Operasyonel geçmiş veriler

2. Yapılandırılmamış Bilgi Kaynakları

Karbon yönetimi süreçleri yalnızca sensör verilerine dayanmamaktadır. Sürdürülebilirlik standartları, yasal düzenlemeler, kurumsal politikalar ve uluslararası çevresel direktifler de karar sürecinin önemli girdilerini oluşturmaktadır.

Bu tür veriler vektör veri tabanlarında saklanmakta ve anlamsal arama yöntemleriyle erişilebilir hale getirilmektedir.

Veri katmanının temel amacı, farklı yapıdaki veri kaynaklarının ortak bir karar mekanizması altında bütünleştirilmesini sağlamaktır.

Katman 3: Yapay Zeka Ajan Orkestrasyon Katmanı

Bu katman sistemin bilişsel karar mekanizmasını oluşturmaktadır. Katman içerisinde görev paylaşımına dayalı çoklu ajan yapısı bulunmaktadır.

Tek bir büyük ajan yerine uzmanlaşmış çoklu ajan yaklaşımının tercih edilmesinin temel nedenleri şunlardır:

- Görev karmaşıklığının azaltılması
- Ölçeklenebilirliğin artırılması
- Hata yayılımının azaltılması
- Modüler sistem geliştirme imkânı

Önerilen mimaride üç temel ajan tanımlanmıştır:

- Karbon Analitiği Ajansı
- Regülasyon ve Uyum Ajansı
- Baş Orkestrasyon Ajansı

Bu ajanlar kendi görev alanlarına ilişkin analizleri gerçekleştirmekte ve sonuçları ortak karar mekanizmasına aktarmaktadır.

LangChain çerçevesi, ajanlar arasındaki koordinasyonun sağlanmasında temel orkestrasyon mekanizması olarak kullanılmaktadır.

Katman 4: Aksiyon ve Kontrol Katmanı

Sistemin son katmanı, üretilen kararların fiziksel sistemlere aktarılmasını sağlamaktadır.

Bu katmanda iki farklı uygulama yaklaşımı değerlendirilmektedir:

Yarı Otonom İşletim Modu

Üretilen öneriler mühendis veya operatör paneline iletilmekte ve insan onayı sonrasında uygulanmaktadır.

Tam Otonom İşletim Modu

Belirli güvenlik koşulları sağlandığında sistem tarafından oluşturulan kararlar doğrudan SCADA sistemleri veya aktüatörler aracılığıyla uygulanabilmektedir.

Bu yapı, insan denetimi ile tam otomasyon arasında esnek bir kullanım yaklaşımı sunmaktadır.

3.2. Çoklu Ajan Tasarımı ve Görev Dağılımı

Karbon yönetimi süreçleri, eş zamanlı olarak teknik, operasyonel ve düzenleyici faktörlerin değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir problem yapısına sahiptir. Bu nedenle önerilen sistemde görevler uzmanlaşmış ajanlar arasında dağıtılmıştır.

3.2.1. Karbon Analitiği Ajansı

Karbon Analitiği Ajansı, dijital ikiz ortamından gelen operasyonel verileri analiz etmekten sorumludur.

Temel görevleri şunlardır:

- Enerji tüketim verilerinin değerlendirilmesi
- Karbon emisyonlarının hesaplanması
- Anormal davranışların tespit edilmesi
- Kritik eşik değerlerinin izlenmesi

Ajanın kullandığı araçlar aşağıdaki gibidir:

- `execute_sql_query()`
- `get_realtime_energy_logs()`
- `calculate_carbon_index()`

Bu ajan tarafından üretilen çıktılar, operasyonel sistemin mevcut durumuna ilişkin teknik değerlendirmeleri içermektedir.

3.2.2. Regülasyon ve Uyum Ajansı

Bu ajanın temel amacı, operasyonel çıktılar ile sürdürülebilirlik düzenlemeleri arasındaki uyumluluğu değerlendirmektir.

Temel görevleri aşağıdaki gibidir:

- Karbon emisyon sınırlarının değerlendirilmesi
- Uluslararası standartların incelenmesi
- Çevresel uyumluluk analizleri
- Olası yasal risklerin belirlenmesi

Kullanılan araçlar:

- vector_db_semantic_search()
- fetch_ghg_protocol_directives()

RAG altyapısının kullanılması sayesinde ajan, yalnızca önceden öğrenilmiş bilgilerle değil, güncel mevzuat verileriyle de çalışabilmektedir.

3.2.3. *Baş Orkestrasyon ve Aksiyon Ajanı*

Baş Orkestrasyon Ajanı sistemin karar birimi olarak görev yapmaktadır.

Bu ajanın temel sorumlulukları şunlardır:

- Diğer ajanlardan gelen bilgilerin bütünleştirilmesi
- Senaryo analizlerinin yürütülmesi
- Alternatif çözüm stratejilerinin oluşturulması
- Operasyonel aksiyon önerilerinin geliştirilmesi

Kullanılan araçlar:

- simulate_production_shift()
- trigger_scada_emergency_mode()
- send_executive_alert()

Baş Orkestrasyon Ajanı tarafından oluşturulan öneriler aşağıdaki türde kararlar içerebilmektedir:

- Üretim hattı hızının azaltılması
- Alternatif enerji kaynaklarının kullanılması
- Kritik makinelerin çalışma modlarının değiştirilmesi
- Operasyonel kaynak dağılımının yeniden planlanması

Bu mekanizma sayesinde sistem yalnızca mevcut durumu değerlendiren bir yapı olmaktan çıkmakta, aynı zamanda proaktif karar destek işlevi de üstlenmektedir.

3.3. *Önerilen Mimarinin İşleyiş Süreci*

Önerilen sistemin çalışma süreci genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Fiziksel sistemlerden gerçek zamanlı verilerin elde edilmesi
2. Verilerin veri katmanına aktarılması ve depolanması
3. Yapay zeka ajanlarının ilgili veri kaynaklarını sorgulaması

4. RAG sistemi üzerinden bağlamsal bilgilerin elde edilmesi
5. Ajanlar arasında bilgi paylaşımının gerçekleştirilmesi
6. Senaryo analizlerinin yürütülmesi
7. Operasyonel aksiyon önerilerinin oluşturulması
8. Üretilen kararların fiziksel sistemlere aktarılması

Bu yaklaşım, geleneksel dijital ikiz sistemlerinden farklı olarak yalnızca gözlemlene işlevi gerçekleştirmemekte, aynı zamanda operasyonel optimizasyon süreçlerini de destekleyen aktif bir karar mekanizması oluşturmaktadır.

4. KOD TABANLI SENARYO ANALİZİ VE SİMÜLASYON

Bu bölümde önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisinin operasyonel davranışını değerlendirmek amacıyla örnek bir senaryo analizi sunulmaktadır. Amaç, sistemin gerçek zamanlı veriler karşısında nasıl tepki verdiğini, ajanlar arasındaki bilgi akışının nasıl gerçekleştiğini ve karar destek mekanizmasının nasıl çalıştığını kavramsal düzeyde göstermektir.

Sunulan senaryo, gerçek bir endüstriyel ortamı temsil etmekten ziyade, önerilen sistem mimarisinin çalışma mantığını ortaya koymayı amaçlayan kavramsal bir kullanım durumudur (proof-of-concept). Bu kapsamda önerilen yaklaşımın veri işleme, regülasyon kontrolü ve karar üretme süreçleri bütünlük biçimde değerlendirilmiştir.

4.1. Senaryo Tanımı: Akıllı Fabrikada Emisyon Eşik Değerinin Aşılması

Önerilen sistemin işleyişini değerlendirmek amacıyla otomotiv yan sanayi alanında faaliyet gösteren akıllı bir üretim tesisine ilişkin örnek bir senaryo oluşturulmuştur.

Senaryoda, üretim tesisinde bulunan "3 Nolu Ağır Pres Hattı"nda hidrolik sistem kaynaklı bir arıza meydana geldiği varsayılmıştır. Söz konusu arıza sonucunda üretim hattının enerji tüketiminde beklenmeyen düzeyde artış oluşmuştur.

Enerji tüketimindeki artışın üretim sistemi üzerindeki etkileri Tablo 1'de tanımlanmıştır:

Tablo 1: Enerji tüketimindeki artışın üretim sistemi üzerindeki etkileri

Parametre	Normal Durum	Anomali Durumu
Enerji tüketimi	845 kWh	1200 kWh
Karbon emisyonu	420 kg CO ₂ e/h	680 kg CO ₂ e/h
Emisyon üst sınırı	500 kg CO ₂ e/h	500 kg CO ₂ e/h
Üretim verimliliği	%100	%96

Tablo 1 incelendiğinde, enerji tüketimindeki artışın karbon emisyon düzeyini kritik eşik değerinin üzerine çıkardığı görülmektedir. Bu durum

yalnızca çevresel etkiler açısından değil, aynı zamanda düzenleyici uyumluluk ve ekonomik riskler açısından da değerlendirilmelidir.

Bu nedenle sistemin temel amacı aşağıdaki hedefleri eş zamanlı olarak gerçekleştirmektir:

- Karbon emisyonunu yasal sınırların altına düşürmek,
- Üretim kaybını minimum düzeyde tutmak,
- Operasyonel sürekliliği korumak,
- Olası finansal yaptırımları önlemek.

4.2. Sistem Mantığının Kod Tabanlı Temsili

Önerilen sistemin uygulama mantığı, LangChain tabanlı araç çağırma (tool calling) ve ajan koordinasyon mekanizmaları kullanılarak sözde kod (pseudocode) biçiminde modellenmiştir (Chase, 2022; Chase, 2023).

```
# Çoklu Ajan Entegrasyonu ve Karar Mekanizması Mantıksal Akışı
Tetikleyici: IoT_Sensor_Anomali_Alert("Line3")

# 1. ADIM: [Carbon Analyst Agent]
data = execute_sql_query("SELECT current_emission FROM TwinLogs WHERE line='Line3'")
if data.current_emission > 500:
    report_analyst = "Line3 emisyonu kritik sınırdadır: " + data.current_emission

# 2. ADIM: [Compliance Agent]
legal_context = vector_db_semantic_search("ISO 14064 ve SKDM Line3 ceza sınırları")
report_compliance = "Yasal Risk Analizi: " + legal_context + " standardına göre ihlal mevcut."

# 3. ADIM: [Chief Orchestrator Agent]
simulation = simulate_production_shift(line_id="Line3", mode="Eco_Mode")
if simulation.new_emission < 500:
    execute_action(trigger_scada_emergency_mode("Line3", "Eco_Mode"))

send_executive_alert("Sistem otonom olarak Eko-Moda geçirildi. Yasal uyum sağlandı.")
```

Bu yapı gerçek sistem uygulamasından ziyade, önerilen mimarinin mantıksal akışını temsil etmektedir.

Sistem içerisinde kullanılan araçlar aşağıdaki temel fonksiyonlardan oluşmaktadır:

Veri erişim araçları

- execute_sql_query()
- get_realtime_energy_logs()

Bilgi erişim araçları

- vector_db_semantic_search()
- fetch_ghg_protocol_directives()

Karar ve simülasyon araçları

- simulate_production_shift()
- trigger_scada_emergency_mode()

- send_executive_alert()

Bu araçlar, ajanların çevresel verileri değerlendirmesine ve operasyonel kararlar üretmesine olanak sağlamaktadır.

Kod düzeyinde sistem akışı aşağıdaki adımlarla özetlenebilir:

Adım 1: Sensör verilerinin elde edilmesi: Fiziksel üretim ortamındaki sensörlerden anlık enerji tüketim verileri alınmaktadır.

Adım 2: Karbon analizi: Karbon Analitiği Ajanı elde edilen verileri analiz ederek mevcut emisyon düzeyini hesaplamaktadır.

Adım 3: Düzenleyici kontrol: Regülasyon ve Uyum Ajanı, mevcut emisyon miktarını ilgili çevresel standartlarla karşılaştırmaktadır.

Adım 4: Senaryo simülasyonu: Baş Orkestrasyon Ajanı olası çözüm senaryolarını değerlendirmektedir.

Adım 5: Aksiyon önerisi: En uygun operasyonel çözüm belirlenerek ilgili sistemlere iletilmektedir.

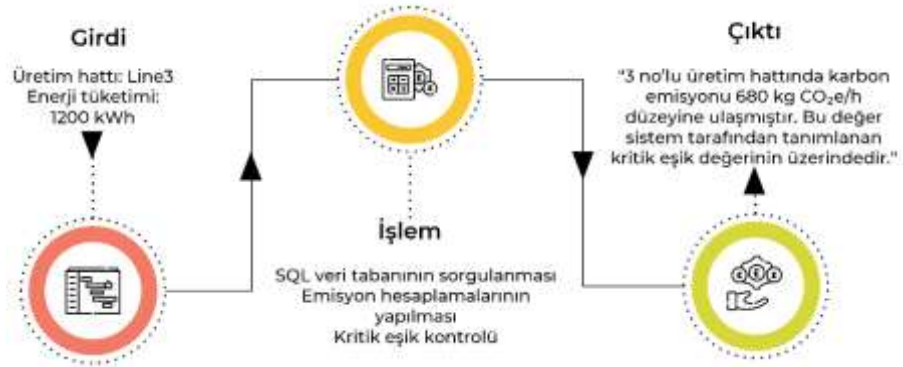
4.3. Ajanlar Arası Etkileşim Süreci

Önerilen mimarinin önemli özelliklerinden biri, ajanlar arasında gerçekleşen koordinasyon mekanizmasıdır. Sistem içerisinde bilgi akışı doğrusal değil, çoklu etkileşim modeli üzerinden gerçekleşmektedir.

Örnek senaryoda ajanların gerçekleştirdiği süreç aşağıda sunulmaktadır (Şekil 1, 2 ve 3).

Aşama 1: Karbon Analitiği Ajanı

İlk aşamada Karbon Analitiği Ajanı üretim hattındaki olağandışı enerji tüketimini değerlendirmektedir.



Şekil 2: Karbon Analitiği Ajanı (Aşama 1)

Aşama 2: Regülasyon ve Uyum Ajanı

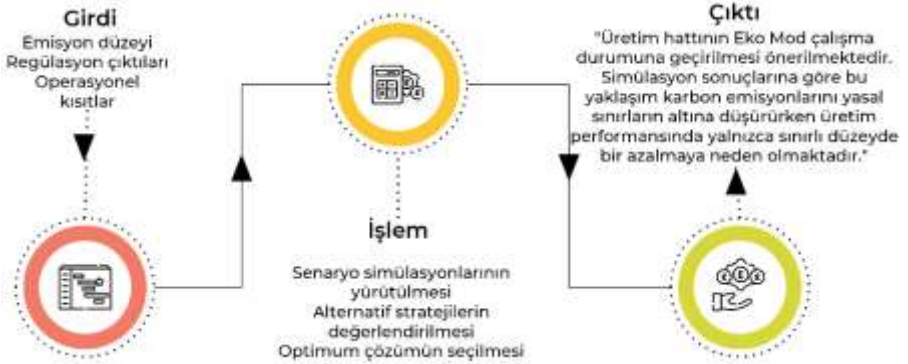
İkinci aşamada elde edilen emisyon değeri sürdürülebilirlik standartları ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 3: Regülasyon ve Uyum Ajanı (Aşama 2)

Aşama 3: Baş Orkestrasyon Ajanı

Son aşamada farklı ajanlardan elde edilen bilgiler bütünleşik biçimde değerlendirilmektedir.



Şekil 4: Baş Orkestrasyon Ajanı (Aşama 3)

Simülasyon sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur:

Tablo 2: Simülasyon sonuçları

Parametre	Müdahale Öncesi	Eko Mod Sonrası
Karbon emisyonu	680 kg CO ₂ e/saat	410 kg CO ₂ e/saat
Üretim kaybı	—	%5
Yasal uyumluluk	Uygun değil	Uygun
Operasyon durumu	Riskli	Kararlı

4.4. Senaryo Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar, önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisinin yalnızca mevcut operasyonel durumun izlenmesini sağlamadığını, aynı zamanda karar destek süreçlerine de katkı sağlayabildiğini göstermektedir.

Geleneksel dijital ikiz sistemleri çoğunlukla mevcut durumu görüntülemeye odaklanırken, önerilen yaklaşım:

- Operasyonel verileri analiz edebilmekte,
- Düzenleyici bilgileri yorumlayabilmekte,
- Alternatif senaryoları değerlendirebilmekte,
- Optimize edilmiş aksiyon önerileri geliştirebilmektedir.

Bu durumun sürdürülebilir üretim sistemlerinde daha yüksek operasyonel verimlilik ve daha etkin karbon yönetimi sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

5. TARTIŞMA VE GELECEK TRENDLER

5.1. Tartışma ve Endüstriyel Uygulanabilirlik

Bu çalışmada önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisi, siber-fiziksel sistemler ile yapay zeka tabanlı karar destek mekanizmalarının bütünleşik kullanımına yönelik kavramsal bir çerçeve sunmaktadır. Elde edilen bulgular, dijital ikiz teknolojilerinin yalnızca izleme ve görselleştirme işlevleriyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda otonom karar üretme kapasitesi ile genişletilebileceğini göstermektedir.

Geleneksel üretim yürütme sistemleri (Manufacturing Execution Systems–MES) ve denetim kontrol sistemleri (SCADA), genellikle önceden tanımlanmış kural tabanlı yapılar üzerinden çalışmaktadır (Schwartz et al, 2020). Bu sistemler, belirli eşik değerlerin aşılması durumunda alarm üretmekte; ancak karmaşık çok değişkenli optimizasyon problemlerinde sınırlı karar üretme kapasitesine sahip olmaktadır. Buna karşılık önerilen mimari, Büyük Dil Modelleri (LLM) ve ajan tabanlı yapıların entegrasyonu sayesinde yalnızca durum tespiti değil, aynı zamanda alternatif çözüm senaryolarının değerlendirilmesini de mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, önerilen yaklaşımın endüstriyel uygulamalara aktarımı bazı teknik ve yönetsel sınırlılıkları da beraberinde getirmektedir. Öncelikle, gerçek zamanlı veri akışına dayalı ajan tabanlı sistemlerin yüksek hesaplama maliyeti oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle büyük ölçekli üretim tesislerinde saniyelik veri üretim hacmi göz önüne alındığında, tüm verilerin eş zamanlı olarak LLM tabanlı ajanlar tarafından işlenmesi önemli bir bilişim yükü doğurabilir.

İkinci olarak, veri güvenliği ve gizlilik konusu kritik bir sınırlılık olarak ortaya çıkmaktadır. Endüstriyel üretim verilerinin dış LLM servislerine aktarılması, fikri mülkiyet ve operasyonel güvenlik açısından riskler içerebilmektedir. Bu nedenle, gelecekteki uygulamaların büyük ölçüde yerel

(on-premise) veya kapalı sistem LLM çözümlerine yönelmesi beklenmektedir.

Üçüncü olarak, ajanlar arası koordinasyon mekanizmalarının karmaşıklığı, sistem tasarımı dikkatle ele alınması gereken bir diğer unsurdur. Çoklu ajan sistemlerinde karar çakışmaları, gecikmeler ve tutarsızlıklar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle daha deterministik orkestrasyon yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

5.2. Gelecek Trendler: Yeşil Yapay Zeka Mimarileri

Sürdürülebilirlik odaklı yapay zeka uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, literatürde “Yeşil Yapay Zeka (Green AI)” kavramı giderek önem kazanmaktadır. Bu kavram, yapay zeka modellerinin yalnızca çıktı doğruluğu açısından değil, aynı zamanda enerji tüketimi ve karbon ayak izi açısından da optimize edilmesini hedeflemektedir (Schwartz et al, 2020).

Bununla birlikte, büyük ölçekli dil modellerinin (LLM) yüksek hesaplama gereksinimleri, veri merkezlerinde önemli düzeyde enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu durum, paradoksal bir biçimde sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek amacıyla geliştirilen sistemlerin dolaylı olarak karbon emisyonuna katkıda bulunması sonucunu doğurabilmektedir (Strubell et al, 2019).

Bu bağlamda gelecekteki araştırmaların aşağıdaki alanlara yoğunlaşması beklenmektedir:

Küçük Dil Modelleri (Small Language Models–SLM):

Daha düşük parametre sayısına sahip, görev odaklı ve alan spesifik modellerin geliştirilmesi, özellikle endüstriyel dijital ikiz uygulamalarında enerji verimliliğini artırabilir. Bu modellerin yerel sistemlerde çalışabilmesi hem gecikme süresini azaltmakta hem de veri güvenliğini artırmaktadır.

Edge AI Entegrasyonu:

Veri işleme süreçlerinin merkezi bulut sistemleri yerine uç bilişim (edge computing) cihazlarına kaydırılması, gerçek zamanlı karar verme süreçlerinde önemli avantajlar sağlayabilir.

Ajan Orkestrasyonunun Standardizasyonu:

LangGraph benzeri yönlendirilmiş döngüsel grafik yapılarının geliştirilmesi, çoklu ajan sistemlerinde daha tutarlı ve öngörülebilir karar mekanizmalarının oluşturulmasına katkı sağlayabilir.

Enerji Verimli LLM Mimarileri:

Model sıkıştırma, bilgi damıtma (knowledge distillation) ve sparse model yapıları gibi tekniklerin kullanılması, yapay zeka sistemlerinin çevresel etkisini azaltabilir.

SONUÇ

Bu kitap bölümünde, endüstriyel sürdürülebilirlik yönetiminde dijital ikiz teknolojileri ile yapay zeka tabanlı ajan mimarilerinin entegrasyonuna

yönelik kavramsal bir çerçeve geliştirilmiştir. Önerilen çoklu ajan tabanlı dijital ikiz mimarisi, gerçek zamanlı sensör verileri ile yapılandırılmamış sürdürülebilirlik bilgilerini bütünleştirerek karar destek süreçlerini genişletmektedir.

Elde edilen bulgular, geleneksel dijital ikiz sistemlerinin çoğunlukla izleme odaklı yapısının, LLM tabanlı ajan sistemleri ile desteklenmesi durumunda daha proaktif ve karar üreten bir yapıya dönüşebileceğini göstermektedir. Özellikle karbon emisyonlarının yönetimi gibi çok değişkenli ve düzenleyici kısıtların yoğun olduğu alanlarda, önerilen yaklaşımın operasyonel karar kalitesini artırma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, önerilen mimarinin gerçek endüstriyel ortamlarda uygulanabilirliğinin doğrulanması için kapsamlı deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca sistem performansının ölçeklenebilirliği, güvenilirliği ve enerji verimliliği gibi boyutlar gelecekteki araştırmalar için önemli çalışma alanları oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma dijital ikiz teknolojilerinin evriminde yeni bir aşamaya işaret etmekte; veri odaklı izleme sistemlerinden, karar odaklı otonom siber-fiziksel sistemlere geçişin teorik bir çerçevesini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbatantuono, I., Calvello, R., De Matteis, N., Facchini, F., ve Mossa, G. (2024). Digital twin for carbon footprint management in manufacturing systems: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 434, Article 139910. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139910>
- Chase, H. (2022). LangChain (Version 0.1) [Computer software]. <https://github.com/langchain-ai/langchain>
- Chase, H. (2023). LangChain documentation. <https://www.langchain.com/>
- Çelikyay, S., ve Aytekin, İ. (2016). Bartın Kentindeki Sanayi Bölgelerinin Ekolojik Planlama ve Kent Ekolojisi Açısından İrdelenmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2), 213-223. <https://doi.org/10.24011/barofd.277973>
- European Commission. (2020). Towards a green and digital future: Key requirements for successful twin transitions in the European Union. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/970637>
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., ve Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., Jia, K., Pan, J., ve Wang, Y. (2023). Retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *arXiv preprint arXiv:2312.10997*.
- Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., ve Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-*

PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

- Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 9459–9474.
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., ve Etzioni, O. (2020). Green AI. *Communications of the ACM*, 63(12), 54–63. <https://doi.org/10.1145/3381831>
- Strubell, E., Ganesh, A., ve McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. *Proceedings of ACL*, 3645–3650.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., ve Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Yao, S., Zhao, J., Yu, D., Du, N., Shafran, I., Narasimhan, K., ve Cao, Y. (2022). ReAct: Synergizing reasoning and acting in language models. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03629>

SPI ve SPEI İndekslerine Göre Hidrolojik Kuraklık ve Trend: Doğu Karadeniz Kıyı ve İç Kesimleri

Shams Emad Ali ALBUKAA¹

Aslı Ülke KESKİN²

- 1- Yüksek lisans öğrencisi.; Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye. shamosaalbekaa@gamil.com ORCID No: 0009-0000-0647-6163
- 2- Doç. Dr.; Ondokuzmayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye. asli.ulke@omu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9676-8377

ÖZET

Kuraklık, dünya genelinde en yıkıcı doğal afetlerden biri olarak kabul edilmesine rağmen, literatürde üzerinde uzlaşılan tek bir tanımı bulunmamaktadır. Yalnızca yağış eksikliği ile açıklanamayan bu olgu, esas olarak yağış ile buharlaşma–transpirasyon arasındaki su dengesi ilişkisinin bozulması sonucu ortaya çıkmakta ve uzun süreli etkiler göstermektedir. Bu çalışmada, kuraklığın çok boyutlu yapısı dikkate alınarak Doğu Karadeniz Bölgesi’nde kapsamlı bir kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Rize, Hopa, Gümüşhane ve Bayburt meteoroloji istasyonlarına ait 1975–2024 dönemini kapsayan aylık toplam yağış ve ortalama sıcaklık verileri kullanılmıştır. Kuraklık koşullarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Standart Yağış-Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) yöntemlerinden yararlanılmış; her iki indeks için 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde analizler gerçekleştirilmiştir. SPI kuraklığı yağış eksikliği üzerinden açıklarken, SPEI sıcaklık ve evapotranspirasyon bileşenlerini de içermesi nedeniyle kuraklık şiddetini daha bütüncül biçimde yansıtmaktadır. Ayrıca, elde edilen zaman serilerinin eğilim özelliklerini belirlemek amacıyla Mann–Kendall trend testi uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, kıyı ve iç kesimler arasında belirgin hidroklimatik farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. 6 aylık zaman ölçeğinde en şiddetli kuraklık koşulları Hopa istasyonunda gözlenirken, 12 aylık zaman ölçeğinde SPI indeksine göre Bayburt, SPEI indeksine göre ise Gümüşhane istasyonu öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, kısa vadede kıyı kesimlerde ani ve şiddetli kuraklıkların, uzun vadede ise iç kesimlerde birikimli kuraklık süreçlerinin daha etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, kuraklık dinamiklerinin hem zamansal ölçeğe hem de hidroklimatik bileşenlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiş olup, elde edilen bulguların sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerine önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – kuraklık, SPI, SPEI, Mann Kendall test, Bayburt, Gümüşhane, Hopa, Rize

GİRİŞ

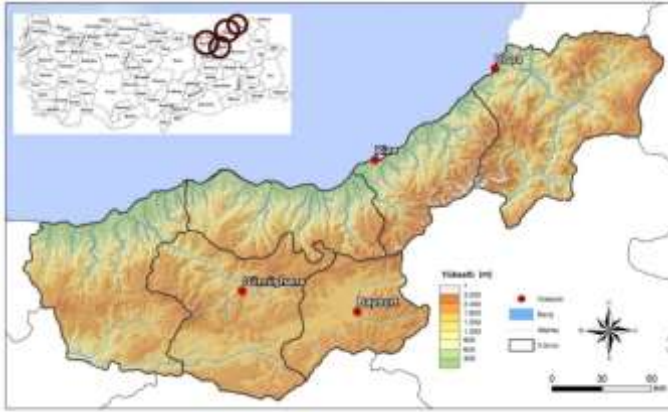
Kuraklık, dünya genelinde en yıkıcı doğal afetlerden biri olarak kabul edilmesine rağmen, literatürde üzerinde uzlaşılan tek bir tanımı bulunmamaktadır (Wilhite ve Glantz, 1985:110–120). Ani gelişmeyen, yavaş ilerleyen ve etkilerini uzun vadede gösteren bu olgu, başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenmesini güçleştiren karmaşık bir süreçtir (Mishra ve Singh, 2010:202–216). Kuraklık yalnızca yağış eksikliği ile açıklanamayıp, yağış ile buharlaşma ve bitki terlemesi arasındaki dengenin bozulması sonucu ortaya çıkmakta; bu yönüyle çevresel ve sosyoekonomik boyutları olan çok yönlü bir yapı sergilemektedir (Trenberth vd., 2014:17–22). Bu nedenle kuraklık, meteorolojik, tarımsal, hidrolojik ve sosyoekonomik olmak üzere dört ana kategoride değerlendirilmektedir (Wilhite, 2000:3–18). İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüzde, kuraklık analizleri sürdürülebilir mühendislik uygulamaları ve su kaynakları yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle su kaynaklarının planlanması, taşkın ve kuraklık risklerinin birlikte değerlendirilmesi ve altyapı sistemlerinin uzun vadeli dayanıklılığının artırılması için hidroklimatik analizlere dayalı yaklaşımlar kaçınılmaz hale gelmiştir. Kuraklık olaylarının izlenmesinde yaygın olarak kullanılan Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış–Buharlaşma İndisi (SPEI), kuraklık koşullarının belirlenmesinde önemli araçlar arasında yer almaktadır. SPI yalnızca yağış verilerine dayalı değerlendirme yaparken, SPEI sıcaklık ve potansiyel evapotranspirasyon etkilerini de dikkate alarak su dengesi değişimlerini daha kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır (McKee vd., 1993: 179–184; Vicente-Serrano vd., 2010: 1696–1718). Bu iki indeksin birlikte kullanılması, kuraklık dinamiklerinin daha bütüncül değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Türkiye’de kuraklık çalışmaları 1940’lı yıllardan itibaren yürütülmekte olup, farklı dönemlerde önemli kuraklık olaylarının yaşandığı bilinmektedir (Tümertekin, 1956:193–197; Tümertekin ve Cöntürk, 1956:107–123; Türkeş, 1996:1057–1076; Türkeş ve Tatlı, 2009:2270–2282). Kuraklık indekslerinden elde edilen zaman serilerinin analizinde trend yöntemleri önemli bir yer tutmakta; bu kapsamda Mann–Kendall testi, parametrik olmayan yapısı ve güvenilirliği nedeniyle hidroklimatik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi’nde kıyı kesimi temsil eden Rize ve Hopa ile iç kesimi temsil eden Bayburt ve Gümüşhane meteoroloji istasyonlarına ait veriler kullanılarak SPI ve SPEI indeksleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, elde edilen zaman serilerinin zamansal eğilimleri Mann–Kendall testi kullanılarak analiz edilmiş ve kuraklık koşullarındaki değişim yönü ile istatistiksel anlamlılığı değerlendirilmiştir. Çalışmada, yalnızca yağış verisine dayalı yaklaşımların yeterliliği sorgulanmakta ve sıcaklık ile buna bağlı potansiyel evapotranspirasyonun dikkate alınmasının kuraklık şiddeti ve süresinin belirlenmesine olan katkısı ortaya konulmaktadır. Bu yönüyle çalışma hem

güncel veri kullanımı hem de trend analizi yaklaşımı ile sürdürülebilir su yönetimi literatürüne katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanı ve Veri Seti

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde kıyı kesimini temsil eden Rize ve Hopa ile iç kesimi temsil eden Bayburt ve Gümüşhane illerinde kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, 1975–2024 dönemini kapsayan aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verilerine Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) ve Standartlaştırılmış Yağış–Buharlaştırma İndisi (SPEI) yöntemleri uygulanmıştır. Kullanılan veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilen Rize (17040), Hopa (17042), Bayburt (17089) ve Gümüşhane (17088) meteoroloji istasyonlarına ait yaklaşık 50 yıllık gözlem kayıtlarından oluşmaktadır. İstasyonlara ait uzun yıllar ortalama değerleri incelendiğinde, kıyı kesiminde yer alan Rize ve Hopa istasyonlarının yüksek yağış miktarları ve ılıman sıcaklık değerleri ile belirgin bir nemli iklim karakteri sergilediği görülmektedir. Bu kapsamda, Rize istasyonunda yıllık ortalama yağış 2265.52 mm ve ortalama sıcaklık 14.69 °C iken, Hopa istasyonunda bu değerler sırasıyla 2332.04 mm ve 14.85 °C olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, iç kesimde yer alan Bayburt ve Gümüşhane istasyonlarında daha düşük yağış miktarları ve daha düşük sıcaklık değerleri gözlenmekte olup, bu durum karasal iklim özelliklerinin belirginliğini ortaya koymaktadır. Bayburt istasyonunda yıllık ortalama yağış 459.44 mm ve ortalama sıcaklık 7.42 °C, Gümüşhane istasyonunda ise yıllık ortalama yağış 469.0 mm ve ortalama sıcaklık 9.7 °C olarak belirlenmiştir. Bu farklılıklar, kıyı ve iç kesimler arasında hidroklimatik koşulların belirgin şekilde ayrıştığını göstermekte olup, kuraklık analizlerinde SPI ve SPEI indekslerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi açısından uygun bir çalışma zemini sunmaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan Hopa, Bayburt, Rize ve Gümüşhane illerinin Türkiye içindeki coğrafi konumları Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1: Çalışma alanı olan Karadeniz Bölgesi ve Hopa, Bayburt, Rize ve Gümüşhane istasyonlarının konumu

Tablo 1: Meteoroloji İstasyonlarının Konum Bilgileri

İstasyon adı	İstasyon No	Enlem (K)	Boylam(D)	Rakım (m)
Hopa	17042	41°24'23,4"	41°25'58,8"	33
Bayburt	17089	40°15'16,9"	40°13'14,5"	1584
Gümüşhane	17088	40°27'35,3"	39°27'55,1"	1216
Rize	17040	41°02'24,0"	40°30'04,7"	3

Standart Yağış İndeksi (SPI)

Standart Yağış İndisi (SPI), belirli bir zaman diliminde gerçekleşen yağış miktarlarının uzun yıllar ortalamasına göre sapmasını standart sapma cinsinden ifade eden istatistiksel bir kuraklık göstergesidir. Bu yöntem, yağış verilerinin standartlaştırılmasına dayanmakta olup, farklı iklim koşullarına sahip bölgeler ile çeşitli zaman ölçekleri arasında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. SPI değerleri, incelenen dönemde gerçekleşen toplam yağışın uzun dönem ortalamasına göre ne ölçüde farklılaştığını nicel olarak ortaya koyarak kurak ve nemli koşulların şiddetinin belirlenmesine imkân vermektedir (Guttman, 1999:311–322; McKee vd., 1993:179–184). SPI'nin 3, 6, 12, 24 ve 48 ay gibi farklı zaman ölçeklerinde hesaplanabilmesi, kuraklığın zamansal değişkenliğinin çok yönlü biçimde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Kısa zaman ölçekleri tarımsal açıdan kısa süreli nem eksikliklerini gösterirken, uzun zaman ölçekleri hidrolojik sistemlerdeki birikimli etkileri ortaya koymaktadır. Bu analizler; akarsu akımları, toprak nemi ve yeraltı suyu gibi hidrolojik bileşenler üzerindeki yağış eksikliğinin etkisini değerlendirmeye olanak sağlar.

Ayrıca SPI'nin hem kurak hem de nemli dönemleri gösterebilme özelliği, uzun süreli kuraklık süreçleri içerisinde meydana gelen kısa süreli yağışlı periyotların belirlenmesine de imkân sağlamaktadır (Bakanoğulları, 2020:1–10; Jordaan vd., 2019:1–11).

$$SPI = \frac{(xi-xj)}{\sigma} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

SPI: Standart Yağış İndeksi,

Xi: İncelenen döneme ait toplam yağış miktarı (mm),

Xj: Uzun yıllar ortalama yağış miktarı (mm),

σ : Yağış serisine ait standart sapma değeridir (mm).

Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI)

Standart Yağış–Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI), iklimsel su dengesi yaklaşımına dayanan ve kuraklık analizlerinde sıcaklık etkisini de dikkate alan bir indis olarak tanımlanmaktadır. Yalnızca yağış verilerine dayanan Standart Yağış İndeksi’nden (SPI) farklı olarak SPEI, potansiyel evapotranspirasyon (PET) bileşenini de hesaba katarak kuraklık koşullarını daha kapsamlı bir çerçevede değerlendirmektedir. Bu özelliği sayesinde SPEI, özellikle sıcaklık artışları ve iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SPEI hesaplamasının ilk aşamasında potansiyel evapotranspirasyon (PET) değerleri belirlenmektedir. Bu çalışmada, yalnızca aylık ortalama sıcaklık verisine ihtiyaç duyması ve uzun süreli veri setlerine kolaylıkla uygulanabilmesi nedeniyle PET hesaplamalarında Thornthwaite yöntemi tercih edilmiştir (Thornthwaite, 1948:55–94; Thornthwaite ve Mather, 1955:104; Thornthwaite ve Mather, 1957:311). Thornthwaite yöntemine göre aylık sıcaklık indisi (i) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (2)$$

Burada T, aylık ortalama sıcaklığı (°C) ifade etmektedir. Yıllık sıcaklık indisi (I), aylık sıcaklık indislerinin toplamı alınarak aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (3)$$

Yıllık sıcaklık indisine bağlı katsayı (A) ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$A = 6.7510 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.7110 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.791210 \times 10^{-2} \times I + 0.49239 \quad (4)$$

Potansiyel evapotranspirasyon (PET) değeri aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir:

$$PET(T) = 16 \times ((10T) / I)^A \times G \quad (5)$$

Bu eşitlikte G enlem düzeltme katsayısını, T aylık ortalama sıcaklığı, I yıllık sıcaklık indis değerini ve A ise I'ye bağlı katsayıyı temsil etmektedir. İkinci aşamada, her bir ay için yağış (Pi) ve Thornthwaite yöntemi ile hesaplanan potansiyel evapotranspirasyon (PETi) değerleri kullanılarak aylık su fazlası veya su açığı (Di) aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir:

$$Di=Pi-PETi \quad (6)$$

Pozitif Di değerleri su fazlasını, negatif değerler ise su açığını ifade etmektedir. SPI ve SPEI yöntemlerine göre yapılan sınıflandırma ise Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2: SPI ve SPEI indis değerlerine göre kuraklık ve nemlilik sınıfları

SPEI & SPI Değerleri	Sınıflandırma	Sembol
≥ 2	Aşırı Nemli	AN
1.5 ~ 1.99	Çok Nemli	ÇN
1 ~ 1.49	Orta Nemli	ON
-0.99 ~ 0.99	Normale Yakın	NY
-1 ~ -1.49	Orta Kurak	OK
-1.50 ~ -1.99	Şiddetli Kurak	ŞK
≤ -2	Aşırı Kurak	AK

Kaynak: Aktürk vd. (2022); Bakanoğulları (2020)

Mann Kendall Trend Testi

Mann–Kendall trend testi, özellikle iklim ve hidroloji alanlarında zaman serilerindeki eğilimlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Mann, 1945:245–259; Kendall, 1948, 1970). Parametrik olmayan bir test olan bu yöntem, literatürde Kendall'ın tau testi olarak da bilinmektedir. Mann–Kendall testi; sıcaklık, yağış, akarsu debisi gibi hidro-meteorolojik değişkenlerdeki monoton (tek yönlü) eğilimlerin belirlenmesi amacıyla birçok çalışmada uygulanmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, analiz edilen veri setinin dağılımına ilişkin herhangi bir varsayım gerektirmemesidir. Bu sayede, farklı özelliklere sahip veri gruplarında güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Mann–Kendall testinde eğilimin varlığı ve yönü, S istatistiği kullanılarak değerlendirilmektedir. S istatistiği aşağıdaki eşitlik yardımıyla

hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında söz konusu analizler RStudio yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, hesaplamalarda “trend” ve “Kendall” paketlerinden yararlanılmıştır.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} (x_j - x_k) > 0 \Rightarrow +1 \\ (x_j - x_k) = 0 \Rightarrow 0 \\ (x_j - x_k) < 0 \Rightarrow -1 \end{cases} \quad (8)$$

S’in varyansı;

$$\text{var}(s) = \frac{n*(n-1)*(2n+5)}{18} \quad (9)$$

Eşitliği ile hesaplanır. Eğer zaman serisinde benzer değerler bulunuyorsa varyans hesabı;

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (10)$$

Şeklinde hesaplanır. Varyansı belirlenen Mann-Kendall testinin anlamlı olup olmadığı z değişkeninin aşağıdaki eşitlikle hesaplanıp kritik z değeriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir.

$$z = \begin{cases} S > 0 \Rightarrow \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \\ S = 0 \Rightarrow 0 \\ S < 0 \Rightarrow \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \end{cases} \quad (11)$$

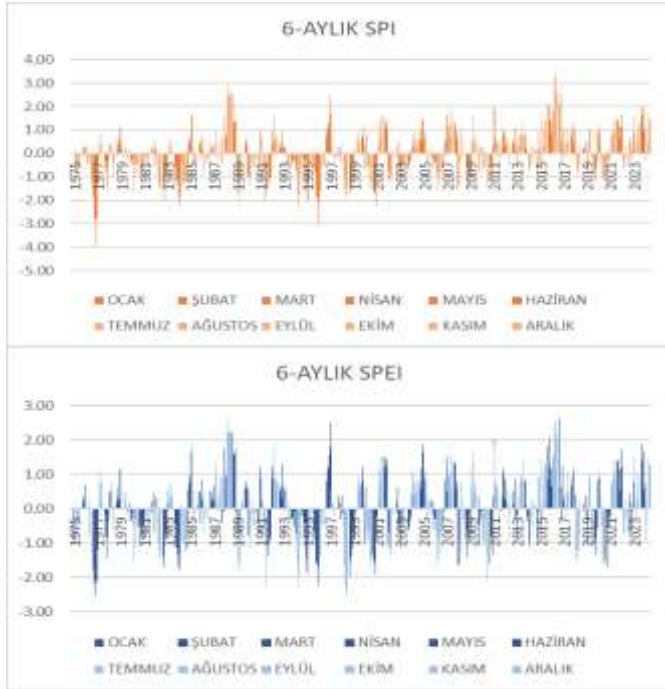
Hesaplanan z değeri pozitif ise artan, negatif ise azalan bir trendin varlığı söz konusudur.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanan SPI ve SPEI indekslerinden elde edilen zaman serilerinin eğilim özelliklerini belirlemek amacıyla parametrik olmayan Mann–Kendall testi uygulanmıştır. Analiz sonucunda, kuraklık koşullarındaki artış veya azalış yönündeki eğilimler ile bu eğilimlerin istatistiksel anlamlılığı değerlendirilmiştir.

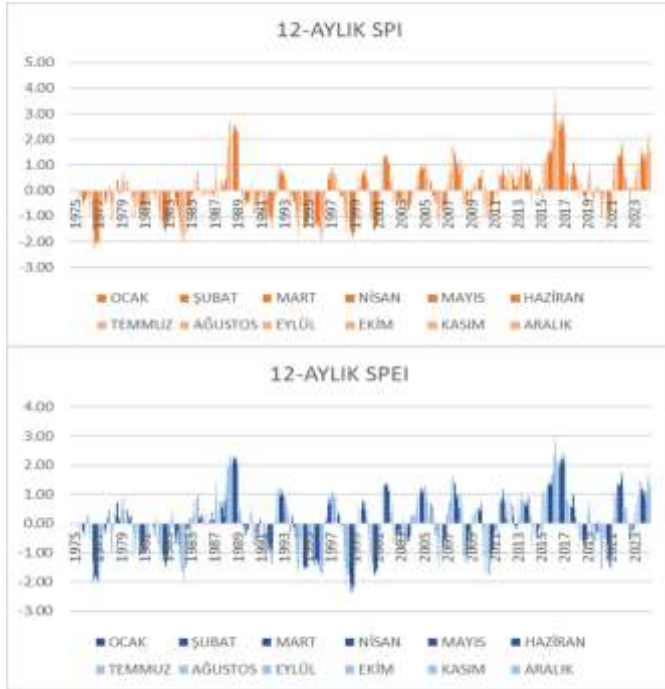
Hopa istasyonu

Hopa istasyonuna ait 6 aylık zaman ölçeğinde elde edilen SPI-6 sonuçları incelendiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1977, 1983, 1984, 1989, 1991, 1994, 1995, 1996 ve 2001 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. İncelenen dönem içerisindeki en düşük SPI-6 değeri $-3,97$ ile 1977 yılı Nisan ayında gerçekleşmiş olup, bu değer altı aylık ölçekte en şiddetli kuraklık koşulunu temsil etmektedir. SPEI-6 sonuçları değerlendirildiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1977, 1991, 1994, 1996, 1998, 1999 ve 2010 yıllarında meydana geldiği görülmektedir. En düşük SPEI-6 değeri $-2,53$ ile 1998 yılı Ekim ayında hesaplanmıştır. Her iki indeks birlikte değerlendirildiğinde, 1977 yılı Nisan ayında SPI-6 değerinin $-3,97$, SPEI-6 değerinin ise $-2,53$ olarak hesaplanması, kuraklığın temel olarak yağış eksikliğinden kaynaklandığını göstermektedir. SPI değerinin daha düşük olması, yağış açığının belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, 1998 yılı Ekim ayında SPI-6 değerinin $-1,96$ ile orta şiddetli kuraklık sınıfında yer almasına karşın, SPEI-6 değerinin $-2,53$ ile aşırı kuraklık sınıfında bulunması, sıcaklık artışı ve buna bağlı evapotranspirasyon etkisinin kuraklık şiddetini artırdığını işaret etmektedir. Hopa istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024) Şekil 2’de gösterilmiştir.



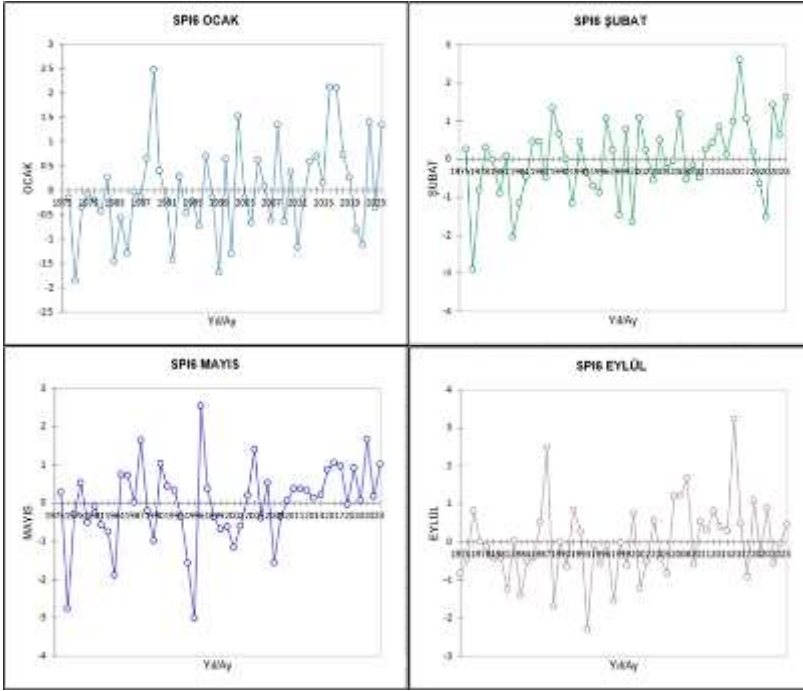
Şekil 2: Hopa istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024)

12 aylık zaman ölçeğinde elde edilen SPI-12 sonuçlarına göre, aşırı kuraklık koşullarının 1977 ve 1984 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. İncelenen dönem içerisindeki en düşük SPI-12 değeri $-2,30$ ile 1977 yılı Şubat ayında gerçekleşmiş olup, bu değer yıllık ölçekte en şiddetli kuraklık koşulunu temsil etmektedir. Bu bulgular, literatürde benzer yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla uyum göstermekte olup, özellikle (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından raporlanan bulgularla paralellik arz etmektedir. SPEI-12 sonuçlarına göre ise aşırı kuraklık koşulları 1977, 1998 ve 1999 yıllarında belirlenmiştir. En düşük SPEI-12 değeri $-2,40$ ile 1999 yılı Nisan ayında hesaplanmıştır. SPI-12 ve SPEI-12 indeksleri birlikte değerlendirildiğinde, 1977 yılı Şubat ayında SPI-12 değerinin $-2,30$, SPEI-12 değerinin ise $-2,00$ olması, kuraklığın ağırlıklı olarak yağış eksikliğinden kaynaklandığını işaret etmektedir. Buna karşılık, 1999 yılı Nisan ayında SPI-12 değerinin $-1,84$, SPEI-12 değerinin ise $-2,40$ olarak hesaplanması, kuraklık şiddetinin sıcaklık artışı ve buna bağlı evapotranspirasyon etkisiyle arttığını ortaya koymaktadır. SPEI değerinin daha düşük olması, bu dönemde sıcaklık ve buharlaşma bileşenlerinin kuraklık üzerindeki etkisinin belirginleştiğini açıkça göstermektedir. Hopa istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024) Şekil 3'te gösterilmiştir.



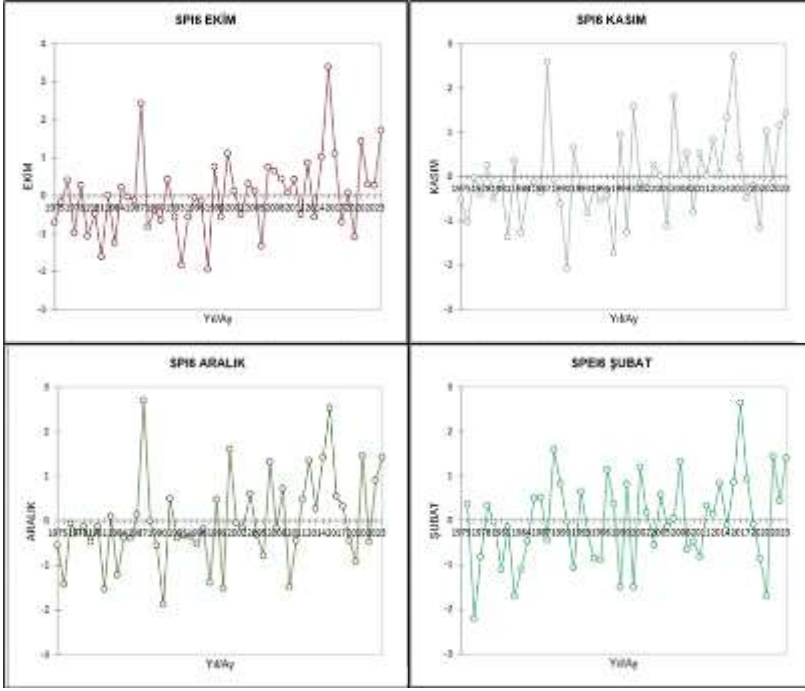
Şekil 3: Hopa istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024)

SPI ve SPEI indekslerine ilişkin bulguların ortaya konulmasının ardından, bu indekslerden elde edilen zaman serilerinin zamansal eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla Mann–Kendall trend analizi uygulanmıştır. Elde edilen Mann–Kendall test sonuçlarına göre Orta zaman ölçeğini temsil eden SPI-6 sonuçlarına göre, Ocak ($Z=2,00$), Şubat ($Z=2,51$), Mayıs ($Z=2,23$), Eylül ($Z=2,01$), Ekim ($Z=2,75$), Kasım ($Z=2,78$) ve Aralık ($Z=2,61$) aylarında istatistiksel olarak anlamlı artan trendler tespit edilmiştir. Buna karşılık, SPEI-6 indeksinde yalnızca Şubat ayında ($Z=2,09$) anlamlı artan bir eğilim belirlenmiştir. Bu durum, orta zaman ölçeğinde yağışa dayalı değişimlerin daha belirgin olduğunu, sıcaklık ve evapotranspirasyon etkisinin ise sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Hopa istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 4’te gösterilmiştir.



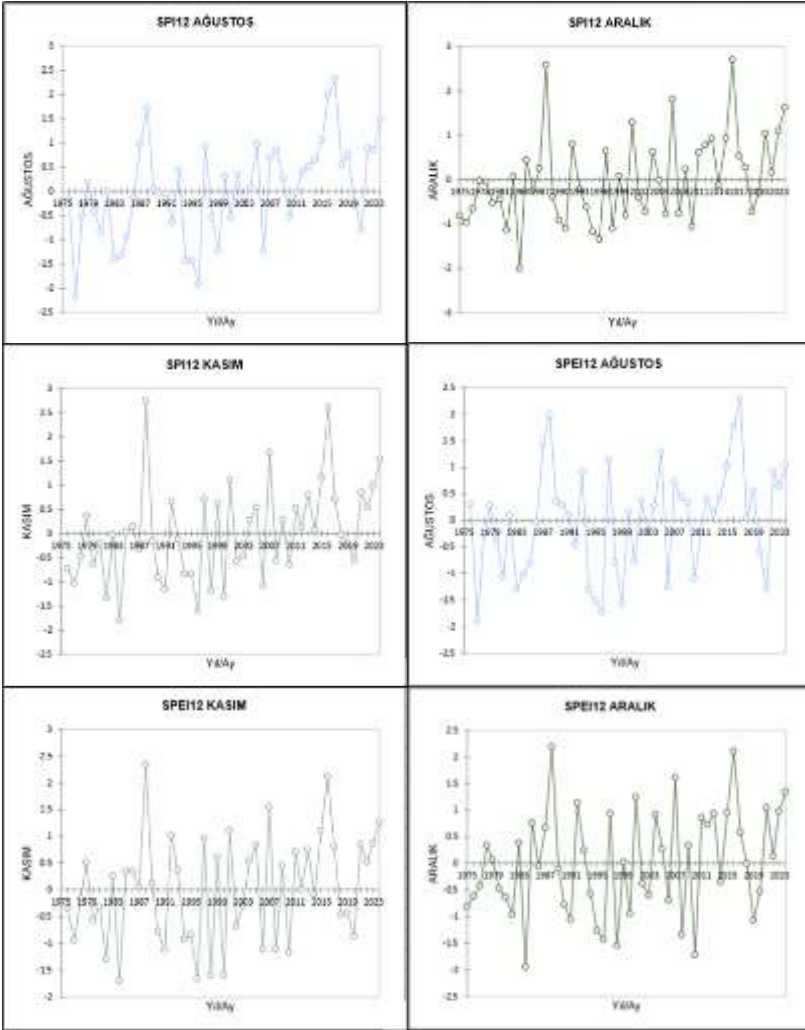
Şekil 4: Hopa istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Hopa istasyonunda SPI-6 ve SPEI-6 indekslerine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5: Hopa istasyonunda SPI-6 ve SPEI-6 indekslerine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 sonuçları incelendiğinde, indeksin genel olarak tüm aylarda artan eğilim gösterdiği ve bu eğilimin özellikle Ağustos ($Z=3,53$), Kasım ($Z=3,16$) ve Aralık ($Z=3,11$) aylarında daha belirgin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, SPEI-12 indeksi de Ağustos ($Z=2,43$), Kasım ($Z=2,22$) ve Aralık ($Z=2,00$) aylarında istatistiksel olarak anlamlı artan trendler tespit edilmiştir. Mann-Kendall testine göre pozitif Z değerleri, indekslerin zamanla arttığını ve kuraklık şiddetinin azalarak daha nemli koşulların öne çıktığını göstermektedir. Özellikle SPI-12 ve SPEI-12 sonuçları, Hopa istasyonunda uzun dönemli nemlilik artışını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, Karadeniz Bölgesi'nde gerçekleştirilen benzer çalışmalarla da uyum göstermektedir. Nitekim (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından yapılan çalışmada, özellikle kıyı kesimlerinde uzun zaman ölçeklerinde nemlilik eğilimlerinin belirginleştiği ifade edilmiştir. Hopa istasyonunda SPI-12 ve SPEI-12 indekslerine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 6'da gösterilmiştir.

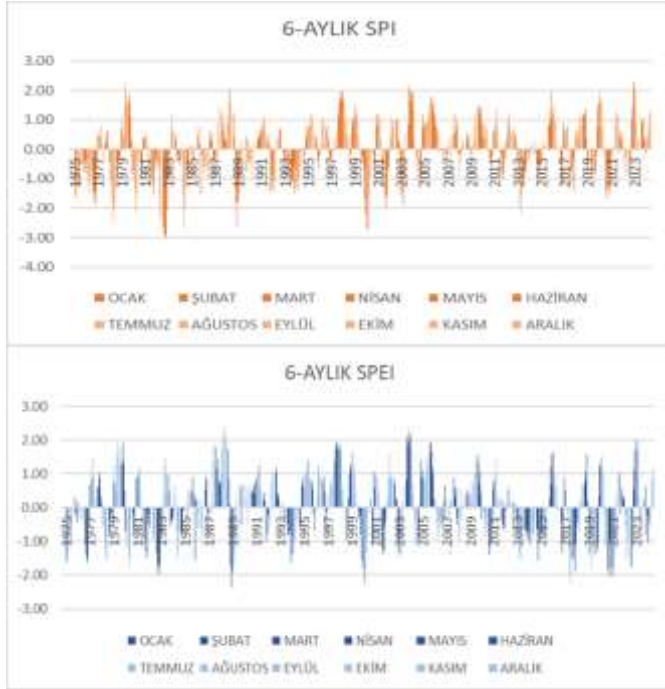


Şekil 6: Hopa istasyonunda SPI-12 ve SPEI-12 indekslerine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Bayburt istasyonu

Orta zaman ölçeğini temsil eden SPI-6 sonuçları incelendiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1978, 1980, 1982, 1983, 1984, 1989, 2000, 2002 ve 2013 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. İncelenen dönem içerisindeki en düşük SPI-6 değeri $-3,02$ ile 1983 yılı Nisan ayında gerçekleşmiştir. SPEI-6 sonuçlarına göre ise aşırı kuraklık koşullarının 1983, 1989, 2000, 2017 ve 2021 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. En düşük SPEI-6 değeri $-2,38$ ile 1989 yılı Mayıs ayında hesaplanmıştır. Her iki indeks birlikte değerlendirildiğinde, 1983 yılı Nisan ayında SPI-6 değerinin $(-3,02)$, SPEI-6

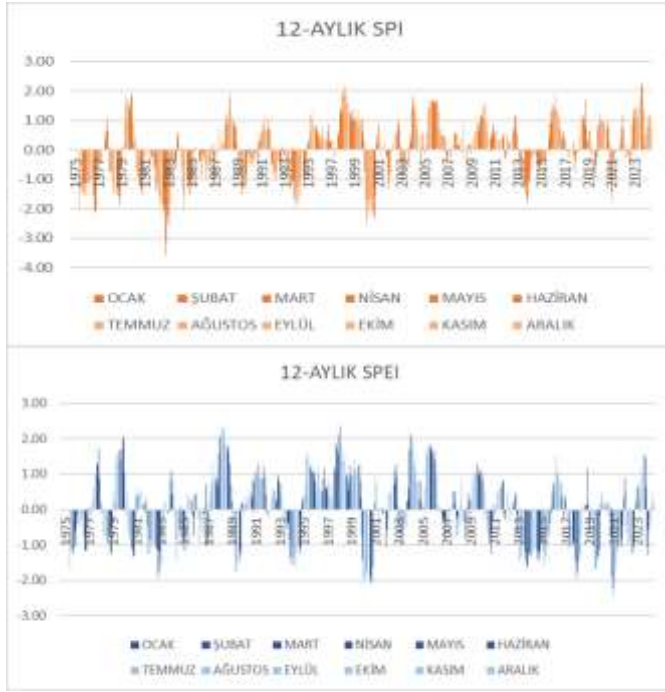
değerine (-1,82) göre daha şiddetli kuraklık koşullarını yansıttığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu dönemde kuraklığın temel olarak yağış eksikliğinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, 1989 yılı Mayıs ayında SPI-6 (-2,62) ve SPEI-6 (-2,38) değerleri birbirine yakın olmakla birlikte, SPI-6 indeksinin kuraklık şiddetini daha belirgin şekilde ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, orta zaman ölçeğinde kuraklık oluşumunda yağışın belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bayburt istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024) Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7: Bayburt istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024)

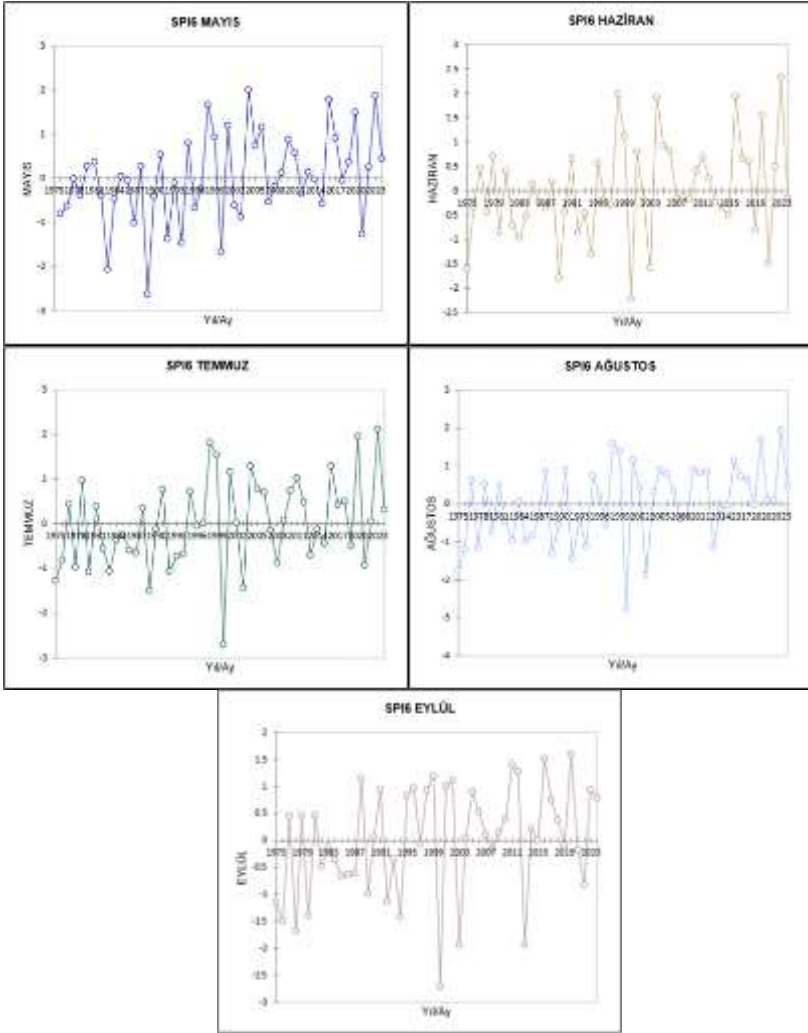
Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 sonuçları incelendiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1977, 1983, 1984, 2000 ve 2001 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. İncelenen dönem içerisindeki en düşük SPI-12 değeri -3,60 ile 1983 yılı Nisan ayında kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular, literatürde benzer çalışmalarla uyum göstermekte olup, özellikle (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından bildirilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir. SPEI-12 sonuçlarına göre ise aşırı kuraklık koşullarının 2000, 2001 ve 2021 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. En düşük SPEI-12 değeri -2,45 ile 2021 yılı Temmuz ayında hesaplanmıştır. SPI-12 ve SPEI-12 indeksleri birlikte değerlendirildiğinde, 1983 yılı Mayıs ayında SPI-12

değerinin (-3,60), SPEI-12 değerine (-1,74) göre daha şiddetli kuraklık koşullarını yansıttığı görülmektedir. Bu durum, kuraklığın büyük ölçüde yağış eksikliğine bağlı olarak geliştiğini göstermektedir. Buna karşılık, 2021 yılı Temmuz ayında SPEI-12 değerinin (-2,45), SPI-12 değerine (-1,75) göre daha düşük olması, sıcaklık artışı ve buna bağlı evapotranspirasyon etkilerinin kuraklık şiddetini artırdığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, özellikle uzun zaman ölçeklerinde sıcaklık bileşeninin kuraklık üzerindeki etkisinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Bayburt istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024) Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Bayburt istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024)

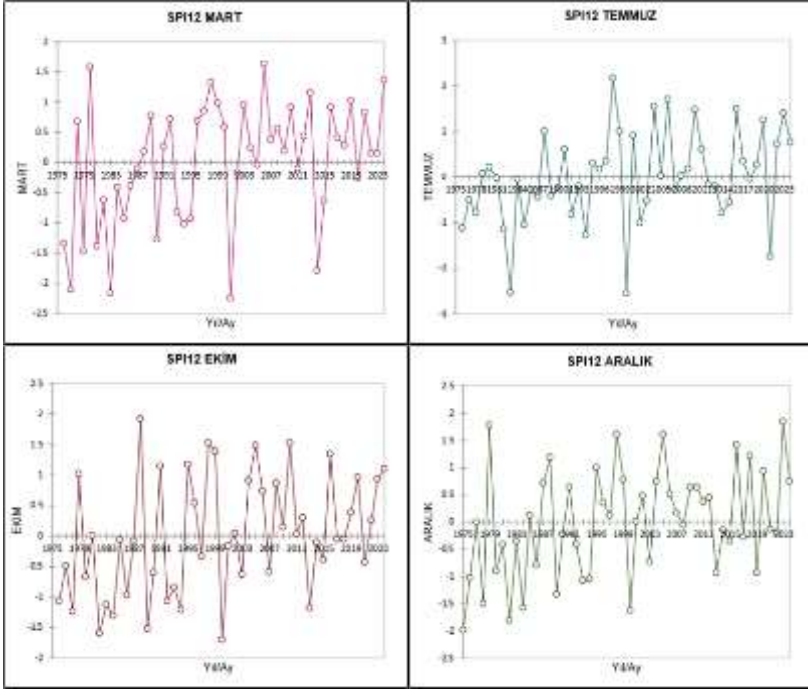
SPI-6 indeksine uygulanan Mann–Kendall testi sonuçlarına göre, Mayıs ($Z=2,61$), Haziran ($Z=2,14$), Temmuz ($Z=2,43$), Ağustos ($Z=2,92$) ve Eylül ($Z=2,51$) aylarında istatistiksel olarak anlamlı artan trendler tespit edilmiştir. Buna karşılık, SPEI-6 indeksinde herhangi bir ay için istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenmemiştir. Bu durum, orta zaman ölçeğinde kuraklık koşullarındaki değişimlerin büyük ölçüde yağışa bağlı olduğunu, sıcaklık ve evapotranspirasyon etkisinin ise sınırlı kaldığını göstermektedir. Bayburt istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9: Bayburt istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 sonuçları incelendiğinde, indeksin genel olarak tüm aylarda artan eğilim gösterdiği belirlenmiş; bu eğilimin özellikle Mart ($Z=2,72$), Temmuz ($Z=2,60$), Ekim ($Z=2,63$) ve Aralık ($Z=2,64$) aylarında istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, SPEI-12 indeksinde hiçbir ay için anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Mann–Kendall testinde pozitif Z değerlerinin artan trendi ifade ettiği dikkate alındığında, SPI indeksinde gözlenen bu artış eğilimi, kuraklık şiddetinin azaldığını ve daha nemli koşulların hâkim olmaya başladığını göstermektedir. Ancak SPEI indeksinde anlamlı bir eğilim bulunmaması, uzun vadede sıcaklık ve buna bağlı evapotranspirasyon etkilerinin kuraklık dinamikleri üzerindeki rolünün sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bu bulgular, Karadeniz Bölgesi'nde gerçekleştirilen benzer çalışmalarla uyum göstermektedir. Nitekim (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından yapılan çalışmada da Bayburt istasyonunda özellikle uzun zaman ölçeklerinde nemlilik eğilimlerinin belirginleştiği ifade edilmiştir. Bayburt istasyonunda SPI-12 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 10'da gösterilmiştir.

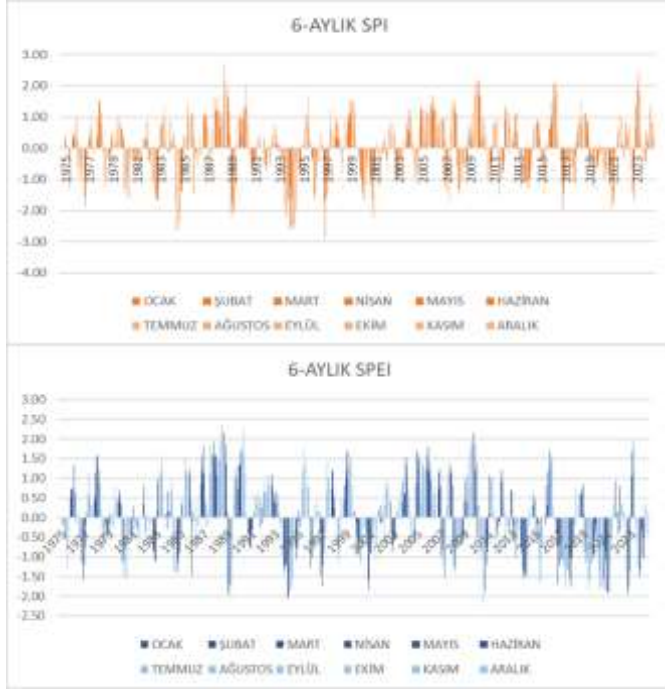


Şekil 10: Bayburt istasyonunda SPI-12 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Gümüşhane istasyonu

Orta zaman ölçeğini temsil eden SPI-6 sonuçları, aşırı kuraklık koşullarının 1984, 1985, 1989, 1994, 1997 ve 2001 yıllarında meydana geldiğini göstermektedir. Bu dönem içerisindeki en düşük SPI-6 değeri $-2,86$ ile 1997 yılı Nisan ayında hesaplanmıştır. SPEI-6 sonuçları incelendiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1989, 1994 ve 2010 yıllarında meydana geldiği ve en düşük değer $-2,16$ ile 2010 yılı Aralık ayında kaydedildiği görülmektedir. İki indeks birlikte değerlendirildiğinde, 1997 yılı Nisan ayında SPI-6 değerinin $-2,86$ ile aşırı şiddetli kuraklığı, SPEI-6 değerinin ise $-1,75$ ile daha düşük şiddette bir kuraklığı temsil ettiği görülmektedir. Buna karşılık, 2010 yılı Aralık ayında SPI-6 değerinin $-0,95$ ile normal koşullara işaret ettiği, SPEI-6 değerinin ise $-2,16$ ile aşırı kuraklık düzeyine ulaştığı

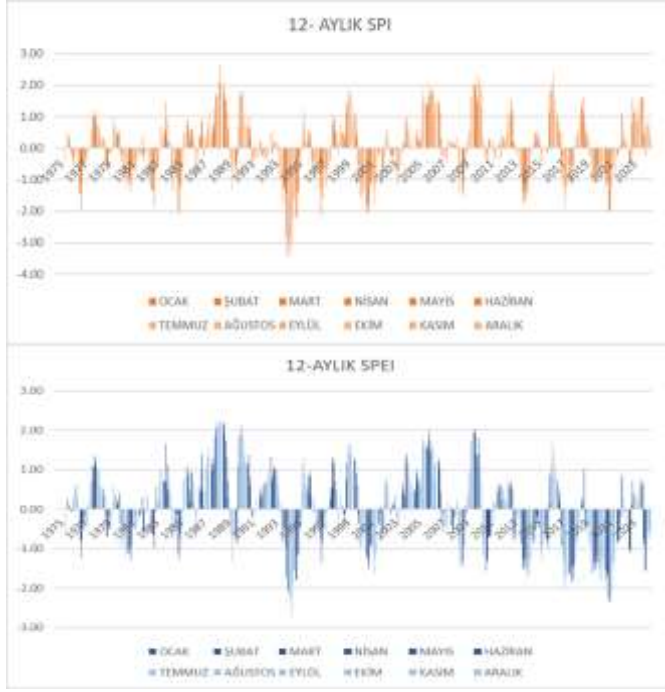
belirlenmiştir. Bu farklılıklar, kuraklık dinamiklerinin bazı dönemlerde yağış eksikliğinden, bazı dönemlerde ise sıcaklık ve buna bağlı evapotranspirasyon etkilerinden daha güçlü biçimde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Gümüşhane istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024) Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11: Gümüşhane istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024)

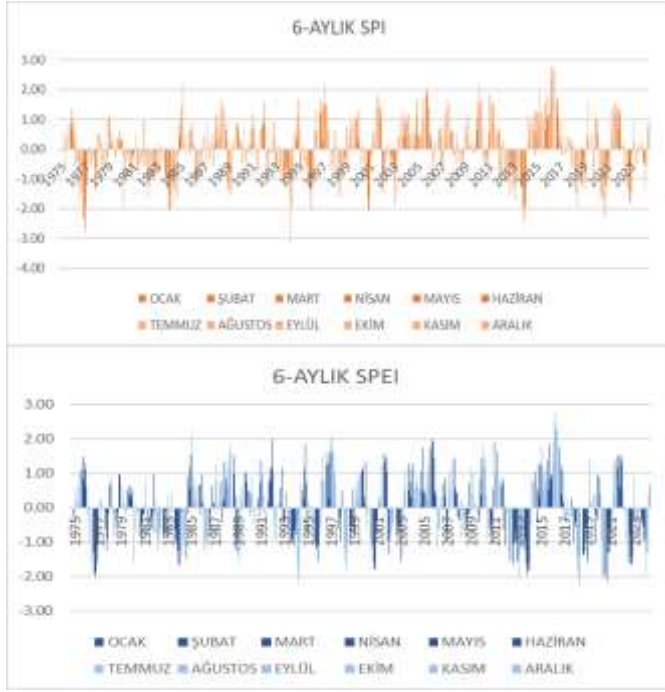
Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 sonuçları incelendiğinde, aşırı kuraklık koşullarının 1985, 1994, 1995, 1997, 2001 ve 2021 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. En düşük SPI-12 değeri $-3,45$ ile 1994 yılı Haziran ayında kaydedilmiştir. SPEI-12 sonuçları ise aşırı kuraklık koşullarının 1994, 2017 ve 2021 yıllarında meydana geldiğini göstermektedir. En düşük SPEI-12 değeri $-2,71$ ile 1994 yılı Kasım ayında hesaplanmıştır. İki indeks birlikte değerlendirildiğinde, 1994 yılı Haziran ayında SPI-12 ($-3,45$) ve SPEI-12 ($-2,09$) değerlerinin her ikisinin de aşırı kuraklık sınıfında yer aldığı, ancak SPI-12’nin daha yüksek kuraklık şiddeti ürettiği görülmektedir. Benzer şekilde, 1994 yılı Kasım ayında SPI-12 ($-3,04$) ve SPEI-12 ($-2,71$) değerleri de aşırı kuraklık koşullarını göstermekte olup, SPI-12’nin daha baskın sonuç verdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, kuraklığın büyük ölçüde yağış eksikliğinden kaynaklandığını, ancak sıcaklık ve evapotranspirasyon

etkilerinin de uzun vadede kuraklık şiddetini artırarak önemli bir hidroklimatik risk oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından Karadeniz Bölgesi için ortaya konulan sonuçlarla uyum göstermektedir. Gümüşhane istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024) Şekil 12’de gösterilmiştir.



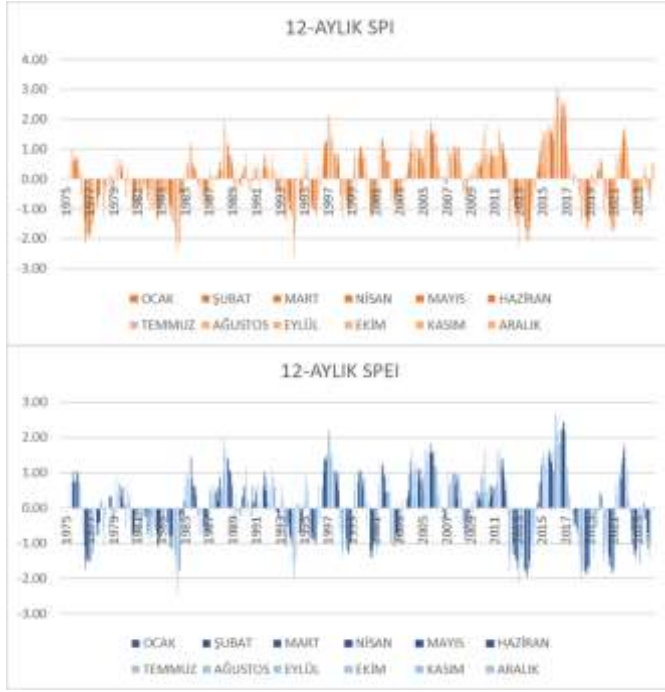
Şekil 12: Gümüşhane istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024)

Gümüşhane istasyonuna ait SPI-6 ve SPEI-6 indekslerine uygulanan Mann–Kendall trend analizi sonuçları incelendiğinde, her iki indeks için de hiçbir ayda istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir. Bu durum, orta zaman ölçeğinde kuraklık koşullarının belirli bir artış ya da azalış eğilimi göstermediğini, dolayısıyla kuraklık karakterinin daha çok dönemsel dalgalanmalar şeklinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 ve SPEI-12 sonuçları değerlendirildiğinde, SPI-12 indeksinde herhangi bir ayda istatistiksel olarak anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Buna karşılık, SPEI-12 indeksinde Kasım ayında ($Z=-2,13$) istatistiksel olarak anlamlı azalan trend tespit edilmiştir. Negatif Z değerleri kuraklık şiddetinin arttığını göstermekte olup, bu durum uzun zaman ölçeğinde sıcaklık ve evapotranspirasyonun etkili olduğunu ortaya koymaktadır. SPI’nın bu eğilimi yansıtmaması, yalnızca yağışın yetersiz



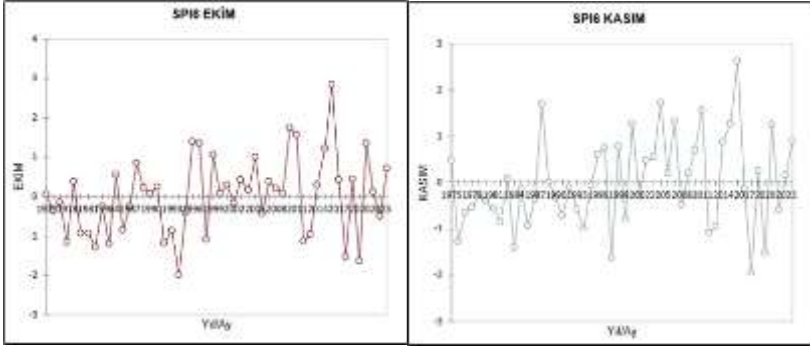
Şekil 14: Rize istasyonunda orta süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-6, (b) SPEI-6 (1975–2024)

Uzun zaman ölçeğini temsil eden SPI-12 sonuçları incelendiğinde, aşırı şiddetli kuraklık koşullarının 1977, 1984, 1985, 1994, 2013 ve 2014 yıllarında meydana geldiği belirlenmiştir. En düşük SPI-12 değeri $-2,61$ ile 1994 yılı Eylül ayında hesaplanmıştır. SPEI-12 sonuçları ise aşırı kuraklık koşullarının 1984, 1994, 2013 ve 2018 yıllarında meydana geldiğini göstermektedir. En düşük SPEI-12 değeri $-2,39$ ile 1984 yılı Aralık ayında belirlenmiştir. İki indeks birlikte değerlendirildiğinde, 1984 yılı Aralık ayında SPI-12 ($-2,49$) ve SPEI-12 ($-2,39$) değerlerinin her ikisinin de aşırı şiddetli kuraklık koşullarını gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde 1994 yılı Eylül ayında SPI-12 ($-2,61$) ve SPEI-12 ($-2,00$) değerleri de aşırı kuraklık sınıfında yer almaktadır. Bu bulgular, uzun vadeli kuraklık koşullarının hem yağış eksikliği hem de iklimsel değişkenliklerin ortak etkisiyle şekillendiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, (Deniz Öztürk ve Ünlü, 2024: 247–262) tarafından Karadeniz Bölgesi için ortaya konulan bulgularla uyumlu olup, uzun zaman ölçeklerinde kuraklık olaylarının belirli yıllarda yoğunlaştığını doğrulamaktadır. Rize istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024) Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15: Rize istasyonunda uzun süreli kuraklık koşullarının zamansal değişimi: (a) SPI-12, (b) SPEI-12 (1975–2024)

Rize istasyonuna ait SPI-6 ve SPEI-6 indekslerine uygulanan Mann–Kendall trend analizi sonuçları incelendiğinde, SPI-6 indeksinde Ekim ($Z=2,11$) ve Kasım ($Z=2,13$) aylarında istatistiksel olarak anlamlı artan trendler tespit edilmiştir. Buna karşılık, SPEI-6 indeksinde herhangi bir ayda anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Bu durum, orta zaman ölçeğinde kuraklık değişimlerinin ağırlıklı olarak yağış değişkeni tarafından kontrol edildiğini, sıcaklık ve evapotranspirasyon etkisinin ise sınırlı kaldığını göstermektedir. Rize istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri şekil 16’da gösterilmiştir.



Şekil 16: Rize istasyonunda SPI-6 indeksine ait Mann-Kendall trend grafikleri

Uzun zaman ölçeğinde değerlendirilen SPI-12 ve SPEI-12 indekslerine ait sonuçlara göre ise her iki indekste de herhangi bir ayda istatistiksel olarak anlamlı bir trend bulunmamıştır. Bu bulgu, uzun dönemli kuraklık koşullarında belirgin bir artış ya da azalış eğilimi olmadığını, dolayısıyla sistemin daha çok doğal dalgalanmalarla karakterize edildiğini ortaya koymaktadır.

Mann-Kendall trend analizi sonuçlarına göre, Gümüşhane istasyonunda SPEI-12 indeksinde Kasım ayında belirlenen anlamlı azalan trend ($Z = -2,13$), diğer istasyonlardan ayrıışan önemli bir bulgudur. Bu durum, uzun vadede kuraklık şiddetinin arttığını ve sıcaklık–evapotranspirasyon etkisinin belirleyici olabileceğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi’nde yer alan Rize, Hopa, Gümüşhane ve Bayburt meteoroloji istasyonlarına ait 1975–2024 dönemine ilişkin aylık toplam yağış ve ortalama sıcaklık verileri kullanılarak SPI ve SPEI kuraklık indeksleri hesaplanmış; 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde kuraklık koşulları analiz edilmiş ve Mann-Kendall trend testi ile zamansal eğilimler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kıyı ve iç kesimler arasında belirgin hidroklimatik farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur. Kıyı kesiminde yer alan Rize ve Hopa istasyonlarında yüksek yıllık yağış miktarlarına rağmen dönemsel olarak şiddetli kuraklık olaylarının meydana gelebildiği; buna karşılık, iç kesimlerde yer alan Bayburt ve Gümüşhane istasyonlarında düşük yağış rejiminin kuraklık oluşumunda daha belirleyici olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, kuraklık süreçlerinin coğrafi konuma bağlı olarak farklı hidroklimatik mekanizmalarla şekillendiğini ortaya koymaktadır. SPI ve SPEI indekslerinin birlikte değerlendirilmesi, kuraklık oluşumunda yalnızca yağışın değil, aynı zamanda sıcaklık ve buna bağlı evapotranspirasyon süreçlerinin de önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. SPI sonuçları kuraklığın büyük ölçüde yağış eksikliğine bağlı geliştiğini gösterirken, SPEI sonuçları bazı dönemlerde sıcaklık artışlarının kuraklık

şiddetini artırıcı yönde etkide bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgu, kuraklık analizlerinde yalnızca yağış verisine dayalı yaklaşımların yeterli olmadığını, iklimsel su dengesi bileşenlerinin de mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Zamansal ölçekte yapılan değerlendirmelerde, 6 aylık zaman ölçeğinde (SPI-6 ve SPEI-6) en şiddetli kuraklık koşullarının Hopa istasyonunda gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu bulgu, orta vadeli kuraklıkların kıyı kesimlerde ani ve yüksek şiddette gelişebildiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, 12 aylık zaman ölçeğinde (SPI-12 ve SPEI-12) kuraklık şiddetinin mekânsal dağılımının değiştiği görülmüştür. SPI-12 indeksine göre en şiddetli kuraklık Bayburt istasyonunda, SPEI-12 indeksine göre ise Gümüşhane istasyonunda meydana gelmiştir. Bu sonuç, uzun vadeli kuraklık koşullarında yağış eksikliğinin iç kesimlerde daha baskın bir rol oynadığını; buna karşılık sıcaklık ve evapotranspirasyon etkilerinin bazı istasyonlarda kuraklık şiddetini artırarak belirleyici hale gelebildiğini göstermektedir. Mann–Kendall trend analizi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, uzun zaman ölçeğinde istasyonların büyük bir kısmında belirgin ve süreklilik gösteren bir eğilim yapısının bulunmadığı belirlenmiştir. Orta zaman ölçeğinde ise bazı istasyonlarda özellikle SPI indeksinde istatistiksel olarak anlamlı artan trendler tespit edilmiş, ancak bu eğilimlerin SPEI indeksinde daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu durum, kuraklık değişkenliğinde yağışın hâlen temel belirleyici faktör olduğunu, ancak sıcaklık etkisinin belirli dönemlerde süreci güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, kuraklık süreçlerinin zaman ölçeği ve coğrafi konuma bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Orta vadede kıyı kesimlerde ani ve şiddetli kuraklık olayları öne çıkarken, uzun vadede iç kesimlerde daha birikimli ve kalıcı kuraklık koşullarının baskın olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, su kaynakları planlaması, baraj işletimi ve kuraklık erken uyarı sistemleri açısından önemli bir bilimsel temel sunmaktadır. Kıyı ve iç kesimler arasındaki hidroklimatik farklılıklar, bölgeye özgü sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

REFERANSLAR

- Aktürk, G., Zeybekoğlu, U., & Yıldız, O. (2022). SPI ve SPEI yöntemleri ile kuraklık araştırması: Kırıkkale örneği. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 762–776. <https://doi.org/10.29137/umagd.1100886>
- Bakanoğulları, F. (2020). SPEI ve SPI indisleri kullanılarak İstanbul-Damlıca Deresi havzasında kuraklık şiddetlerinin analizi. *Toprak Su Dergisi*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.21657/topraksu.566693>
- Deniz Öztürk, Y., & Ünlü, R. (2024). Karadeniz Bölgesi'nde kurak ve nemli dönemlerin SPI yöntemi kullanılarak belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 247–262. <https://doi.org/10.21324/dacd.1383857>

- Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311–322.
- Jordaan, A. J., Mlenga, D. H., & Mandebvu, B. (2019). Monitoring droughts in Eswatini: A spatiotemporal variability analysis using the standardized precipitation index. *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*, 11(1), 1–11.
- Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Kendall, M. G. (1970). *Rank correlation methods* (4th ed.). Griffin.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). Anaheim, CA.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202–216.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). *The water balance*. Laboratory of Climatology.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration. Drexel Institute of Technology.
- Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Tümtürk, E. (1956). Türkiye’de kurak mevsimler. *Türk Coğrafya Dergisi*, 15–16, 193–197.
- Tümtürk, E., & Cöntürk, H. (1956). İstatistik metotları ile Türkiye’de kuraklığın incelenmesi. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi*, 4(7), 107–123.
- Türkeş, M. (1996). Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey. *International Journal of Climatology*, 16, 1057–1076.
- Türkeş, M., & Tatlı, H. (2009). Use of the standardized precipitation index (SPI) and a modified SPI for shaping the drought probabilities over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29, 2270–2282.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718.
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In D. A. Wilhite (Ed.), *Drought: A global assessment* (Vol. 1, pp. 3–18). Routledge.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 110–120.

Sinyalize Kavşaklarda İkilem Bölgesi Analizi:Antalya Manavgat Çakal Deresi Kavşağı Örneği

Bedriye Özge ERGEN¹

Ebru ARIKAN ÖZTÜRK²

- 1- Yüksek Lisans Öğrencisi; Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trafik Planlaması ve Uygulaması A.B.D. bozge.ergen@gazi.edu.tr ORCID No:0009-0004-0889-2426
- 2- Doç.Dr.Ebru ARIKAN ÖZTÜRK Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Trafik Planlaması ve Uygulaması A.B.D. eozturk@gazi.edu.tr ORCID No:0000-0002-4971-2442

ÖZET

Bu çalışmada, kentsel bir sinyalize kavşakta sürücü davranışları, sarı faz başlangıcında hız ve durma çizgisine olan mesafe değişkenleri çerçevesinde analiz edilmiştir. Antalya ili Manavgat ilçesinde yer alan Çakal Deresi kavşağında drone kullanılarak elde edilen saha verileri doğrultusunda toplam 82 araca ait sürücü davranışları analiz edilmiştir. Araçların hız ve konum bilgileri referans noktaları aracılığıyla belirlenmiş olup, sürücü kararları “duran”, “geçen” ve “kırmızıda geçen” olmak üzere üç kategori altında sınıflandırılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, sürücü davranışlarının durma çizgisine olan mesafe ve araç yaklaşım hızı gibi temel değişkenlerle anlamlı ve sistematik bir ilişki içerisinde olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük hız ve durma çizgisine uzak mesafelerde durma davranışı baskın hâle gelirken, yüksek hız ve yakın mesafelerde geçme davranışı öne çıkmaktadır. Öte yandan, orta mesafe aralıklarında durma, geçme ve ihlal davranışlarının birlikte görülmesi, bu bölgenin sürücüler açısından yüksek karar belirsizliği içerdiğini göstermektedir. Çalışma sonuçları, Tip II ikilem bölgesinin kesin sınırları olan fiziksel bir alan olmaktan ziyade, sürücü davranışlarının olasılıksal dağılımına bağlı olarak değişen dinamik bir yapı sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, kırmızı ışık ihlallerinin belirli hız-mesafe kombinasyonlarında yoğunlaşması, bu bölgenin trafik güvenliği açısından kritik bir risk alanı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma bulguları doğrultusunda, sinyalize kavşak tasarımında yalnızca geometrik düzenlemelerin değil, sürücü davranışlarının da dikkate alınması gerektiği; özellikle sarı faz süresi, yaklaşım hızları ve ikilem bölgesi uzunluğunun birlikte değerlendirilmesinin trafik güvenliği açısından önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler –Tip II İkilem Bölgesi, Sinyalize Kavşak,,Sürücü Davranışı, Trafik Güvenliği

GİRİŞ

Kavşaklar, iki veya daha fazla karayolunun kesiştiği, birleştiği veya ayrıldığı ve araç ile yaya trafiğinin karşılaştığı düzenleme alanlarıdır. Karayolu sisteminin en kritik bileşenlerinden biri olan kavşaklar; yolun performansı, güvenliği, hız seviyesi, işletme maliyeti ve taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu alanlarda yalnızca doğrusal trafik akışları değil, aynı zamanda farklı yönler arasındaki dönüş hareketleri de söz konusu olup, bu hareketler kavşak tipine bağlı olarak geometrik düzenlemeler ve trafik kontrol yöntemleri ile yönetilmektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2005:100).

Sinyalize kavşaklar, farklı yönlerden gelen trafik akımlarının kesişmesi nedeniyle çok sayıda çatışma noktası barındıran ve bu yönüyle trafik güvenliği açısından kritik öneme sahip ulaşım unsurlarıdır. Bu kavşaklarda meydana gelen kazaların önemli bir bölümü, sürücülerin sinyal değişim aralığında (özellikle sarı ve kırmızı geçiş sürecinde) verdikleri durma veya geçme kararlarıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle sarı faz süresinin yetersiz olması, sürücünün güvenli bir şekilde durması ya da kavşağı geçmesi için gerekli koşulları sağlayamamakta; bu durum arkadan çarpma ve dik açılı çarpışma türü kazaların oluşma riskini artırmaktadır.

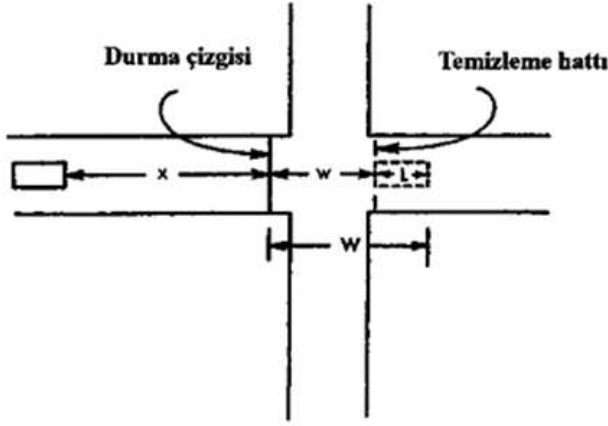
Bu bağlamda, sinyal değişim aralıklarında sürücü kararlarının belirsizleştiği kritik durumları açıklayan “ikilem bölgesi (dilemma zone)” kavramı öne çıkmaktadır. Sinyalize kavşaklarda ikilem bölgesi, trafik ışığı yeşilden sarıya döndüğünde sürücünün güvenli bir şekilde durmak ya da kavşağı geçmek konusunda kararsız kaldığı veya fiziksel olarak her iki eylemi de emniyetle gerçekleştiremediği kritik bir alan olarak tanımlanmaktadır (Zhao, 2023:1). Bu bölge; araç hızı, sürücü tepki süresi, kavşak geometrisi ve sinyal zamanlaması gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Ampirik çalışmalar, ikilem bölgesinin sabit bir yapı göstermediğini, sürücü özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak dinamik biçimde değiştiğini ve sarı ışık süresinin artırılmasının bu bölgeyi tamamen ortadan kaldırmayabileceğini ortaya koymaktadır (Kang, 2020:273). İkilem bölgesi, sürücülerin karar verme sürecinde yaşadıkları belirsizlik nedeniyle trafik güvenliğini de olumsuz yönde etkilemektedir (Pathivada, 2017:962, Rahman 2021:11,Zhao 2024:1).

Literatürde ikilem bölgesi genellikle iki ana tipte sınıflandırılmaktadır: (Pathivada, 2017:962, Mercan 2023:5)

Tip I İkilem Bölgesi

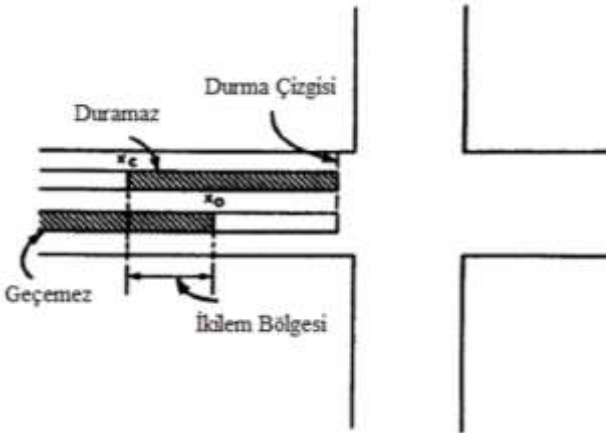
Bir sürücünün sarı sinyalle karşılaştığında kavşaktan güvenli bir şekilde geçemediği veya durma çizgisinden önce rahatça durmadığı alan, Tip I ikilem bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge, literatürde ilk olarak Gazis, Herman ve Maradudin (1960) tarafından ele alınmıştır. Genellikle hatalı veya yetersiz sinyal zamanlamasından kaynaklanır. Bu bölgedeki bir sürücü, sarı ışık yandığında ne durma çizgisinden önce emniyetli bir şekilde durabilir ne de sinyal kırmızıya dönmeden kavşağı tamamen terk edebilir.

Aracın tam kırmızı ışık yanmaya başladığı anda kavşağı geçebilmesi için gereken sabit ivme, sarı ışık başladığında kavşağa olan mesafesi x 'e bağlıdır.



Şekil 1. L uzunluğundaki bir aracın kavşaktan geçme veya durma durumlarında kat edeceği mesafeler (Gazis vd., 1960)

Kritik durma mesafesi x_c aracın mevcut hızı ve yavaşlama kapasitesi dikkate alındığında güvenli biçimde durabileceği sınır konumu ifade etmektedir. Araç konumu $x > x_c$ olduğunda güvenli durma mümkündür; ancak $x < x_c$ durumunda durma manevrası konforsuz, riskli ya da fiziksel olarak mümkün olmayabilir. Bu kritik mesafe sarı faz süresinden bağımsız olup, sürücünün algı-tepki süresi ile aracın dinamik özelliklerine bağlıdır (Gazis vd., 1960:115).



Şekil 2. Kavşak yakınında ikilem bölgesini gösteren diyagram (Gazis vd., 1960)

Şekil 2’de, sürücünün sarı ışık başlangıcında karşılaştığı karar durumunu gösteren iki kritik mesafe tanımlanmaktadır. Kavşağa olan mesafesi x_c ’den daha küçük olan bir araç güvenli şekilde duramaz; buna karşılık kavşağa olan mesafesi x_0 ’dan daha büyük olan bir araç ise kırmızı faz başlamadan önce ivmelenmeden kavşağı geçemez. $x_0 > x_c$ ise, sürücü kritik mesafe x_c ’yi geçtikten sonra sinyal kırmızıya dönmeye önce kavşağı temizleyebilir.

Ancak eğer $x_0 < x_c$ ise, sürücü kavşağa olan mesafesi x iken, $x_0 < x < x_c$ aralığında bulunuyorsa, o anda sarı ışık yanmaya başlarsa sürücü kendini çok zor bir durumda bulacaktır.

Bu durumda, aracı güvenli bir şekilde durduramayacağı için kavşağı geçmek zorunda kalır ve bunu ancak ivmelenerek başarabilir.

Ancak, eğer başlangıç hızı v_0 , aracın ulaşabileceği maksimum yasal hız ise, sürücü; ne aracını güvenli bir şekilde durdurabileceği ne de hız sınırını ihlal etmeden kırmızı ışık yanmadan kavşaktan geçebileceği bir ikileme karşılaşır(Gazis vd., 1960:116).

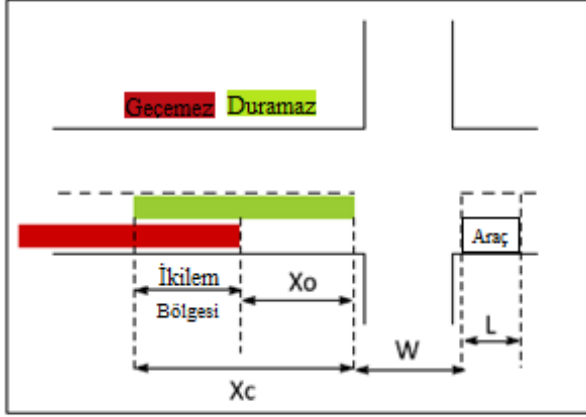
Tip II İkilem Bölgesi

Tip II ikilem bölgesi ise ilk olarak 1974 yılında Institute of Transportation Engineers (ITE) tarafından hazırlanan bir komite raporunda tanımlanmıştır. Tip I ikilem bölgesinin uygun zamanlama tasarımı ile ortadan kaldırılması durumunda, fiziksel zorunluluk ortadan kalkmakta; ancak sürücülerin sarı faz başlangıcında karar verme sürecine ilişkin belirsizlik devam edebilmektedir. Bu durum, sürücü davranışına dayalı daha geniş bir “seçenek” veya “kararsızlık” alanının oluşmasına yol açmakta ve literatürde Tip II ikilem bölgesi olarak adlandırılan kavramı ortaya çıkarmaktadır.

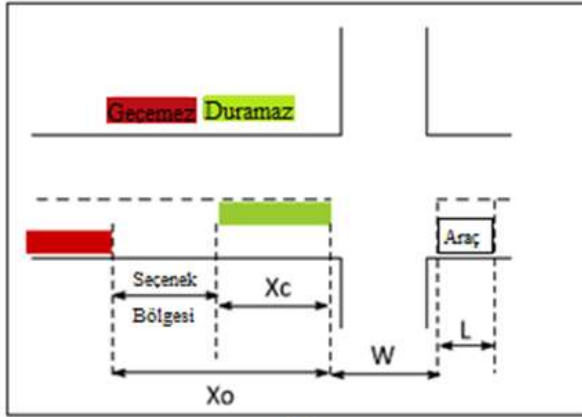
Tip II ikilem bölgesi sürücünün sarı ışıkla karşılaştığında durup durmama konusunda kararsız kaldığı ve sürücünün karar verme sürecindeki karmaşıklıklardan kaynaklanan bir alandır. Sarı ışık süresi yeterli olsa dahi sürücüler durma veya geçme kararı konusunda tereddüt yaşayabilmektedir.

Bu durum literatürde, sürücülerin durma olasılığının %10 ile %90 arasında değiştiği mesafe aralığı olarak tanımlanmaktadır (Pawar, 2022:4; Pudasaini, 2025:2). Bu bağlamda, ikilem bölgesinin sınırları sürücülerin yaklaşık %90’ının durma kararı verdiği daha uzak nokta ile yalnızca %10’unun durduğu daha yakın nokta arasında kalan bölgeyi ifade etmektedir (Zegeer ve Deen, 1978:2). Benzer şekilde, Chang vd. (1985:26) sürücü davranışlarının zamana bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuş; durma çizgisine 3 saniyeden daha fazla mesafede bulunan araçların büyük

çoğunluğunun durduğunu, 2 saniyeden daha kısa mesafede bulunanların ise neredeyse tamamının geçme eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, Tip II ikilem bölgesinin kesin bir fiziksel sınırdan ziyade sürücü davranışlarının dağılımına bağlı olarak değişen olasılıksal bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3. Tip I ikilem bölgesi (a), Tip II ikilem bölgesi (b) (Akgüngör ve Mercan 2021)

- X_c : Minimum durma mesafesi (m)
- X_o : Güvenli geçiş için maksimum mesafe (m)
- W : Kavşak genişliği (m)
- L : Ortalama araç uzunluğu (m)

İkilem bölgesinin trafik güvenliği üzerindeki olumsuz etkileri şu şekillerde ortaya çıkar (Mercan 2023:1,Papaioannou 2021:1-2):

- Arkadan Çarpmalar: İkilem bölgesinde bulunan bir sürücü aniden durmaya karar verdiğinde, arkadan gelen ve geçeceğini varsayan araçların çarpma riski önemli ölçüde artar.
- Dik Açılı Çarpışmalar: Sürücü kavşağı geçmeye karar verir ancak hızı veya mesafesi yetersiz olduğu için kırmızı ışıktaki yakalanırsa, diğer yönlerden gelen araçlarla dik açılı çarpışma riski oluşur.
- Kırmızı Işık İhlalleri: Belirsizlik içindeki sürücülerin yanlış kararlar vermesi, kırmızı ışık ihlallerine ve dolayısıyla kavşak disiplininin bozulmasına yol açar.
- Sürücü Davranışında Tutarsızlık: Sürücülerin yaş, cinsiyet ve özellikle agresiflik düzeyleri bu bölgedeki kararlarını etkiler. Agresif sürücüler durmaları gereken mesafelerde bile geçmeyi tercih ederek güvenliği riske atabilirler.

Tip I ikilem bölgesi bir mühendislik ve zamanlama hatasıyla, Tip II ikilem bölgesi sürücünün psikolojik karar verme sürecinin bir sonucudur.

Trafik güvenliği açısından Tip I, kırmızı ışık ihlallerini ve dik açılı çarpışmaları tetiklerken; Tip II, ani duruşlar nedeniyle arkadan çarpışma riskini artırır (Akgüngör Mercan 2021:1).

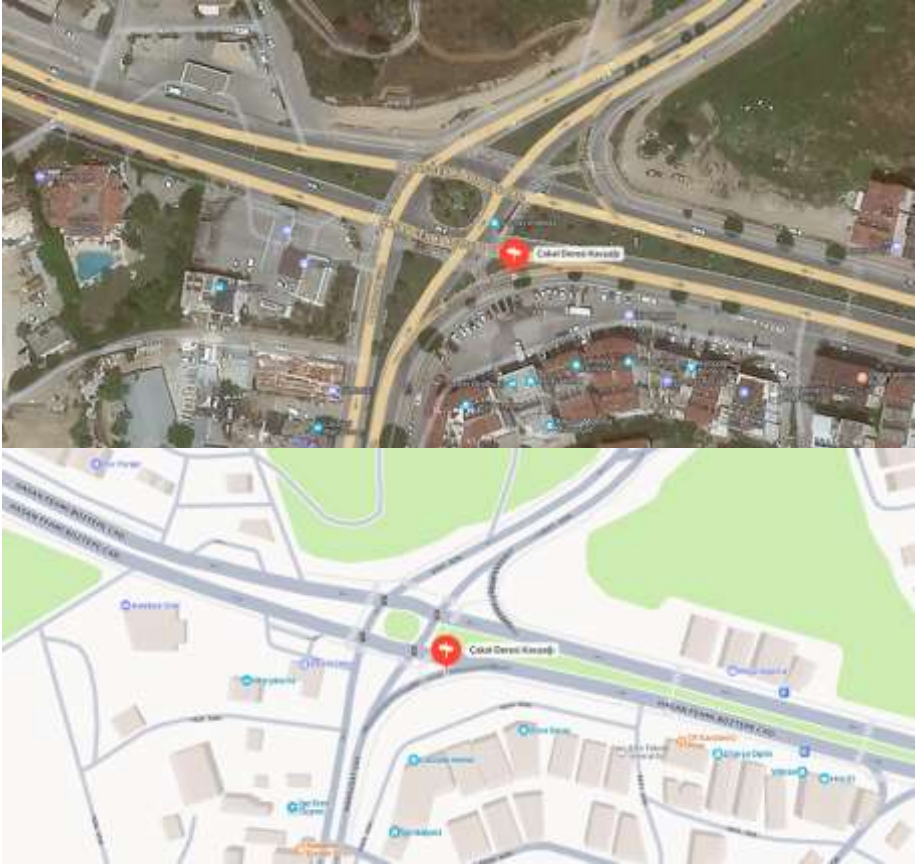
İkilem bölgesi, özellikle yüksek hızlı kırsal sinyalizasyon kavşaklarında sürücü kararlarını doğrudan etkileyen kritik bir güvenlik unsurudur. Bu bağlamda, bağlantılı araç teknolojisi kullanılarak geliştirilen kontrol stratejileri, araçların ikilem bölgesine maruz kalmasını azaltmayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, bu tür yaklaşımların ikilem bölgesine girişleri azaltarak kavşak performansı ve güvenliği üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır (Li vd., 2020:305-312).

Bu çalışmada, kentsel bir ulaşım koridoru üzerinde yer alan sinyalizasyon bir kavşakta sürücü davranışları ve karar verme süreçleri detaylı olarak incelenerek Tip II ikilem bölgesinin karakteristik özelliklerinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, sarı sinyal başlangıcında araçların hızları, durma çizgisine olan mesafeleri ve sürücülerin durma/geçme kararları birlikte değerlendirilerek ikilem bölgesinin mekânsal sınırları ve davranışsal dinamikleri analiz edilmektedir.

2. Metodoloji

2.1. Saha verilerinin elde edilmesi

Çalışma kapsamındaki veriler, Antalya ili Manavgat ilçesinde bulunan Çakal Deresi kavşağında drone kullanılarak elde edilmiştir. Çakal Deresi kavşağı 4 kollu sinyalizasyonlu bir kavşak olup 2 fazlı olarak çalışmaktadır. (Şekil 4)



Şekil 4. Çakal Deresi kavşağı (Yandex, t.y.)

Çekimler, trafik akışının doğal koşullarda gözlemlenebilmesi amacıyla hafta içi öğleden sonra saatlerinde ve yağışsız günlerde gerçekleştirilmiştir. Görüntüler, durma çizgisinden yaklaşık 95 ile 127 m mesafeler arasında değişen bir görüş alanını kapsayacak şekilde kaydedilmiştir. Toplam çekim süresi 73 dakika olup, çekimler ofis ortamında analiz edilmiştir.

2.2.Konum ve Hız Belirleme Yöntemi

Araçların konumları, video görüntüleri üzerinde yer alan aydınlatma direkleri, ağaçlar ve bordür taşları gibi sabit referans noktaları kullanılarak belirlenmiştir. Araç hızlarının hesaplanmasında ise 60 ve 72 metre referans alınmıştır.

Analiz sırasında genel olarak 72 m mesafe referans olarak kullanılmış, ancak bazı araçların görüntü kaydı durma çizgisine 60 m mesafede başlatıldığından, bu araçlar için 60 m referans mesafesi esas alınmıştır.

2.3.Çalışmada Kullanılan Değişkenler

Çalışmada analiz edilen temel parametreler; aracın sinyalin yeşilden sarıya döndüğü andaki ve sarıdan kırmızıya geçtiği andaki durma çizgisine olan uzaklığı, sarı faz başlangıcındaki yaklaşım hızı ve sürücü davranışdır.

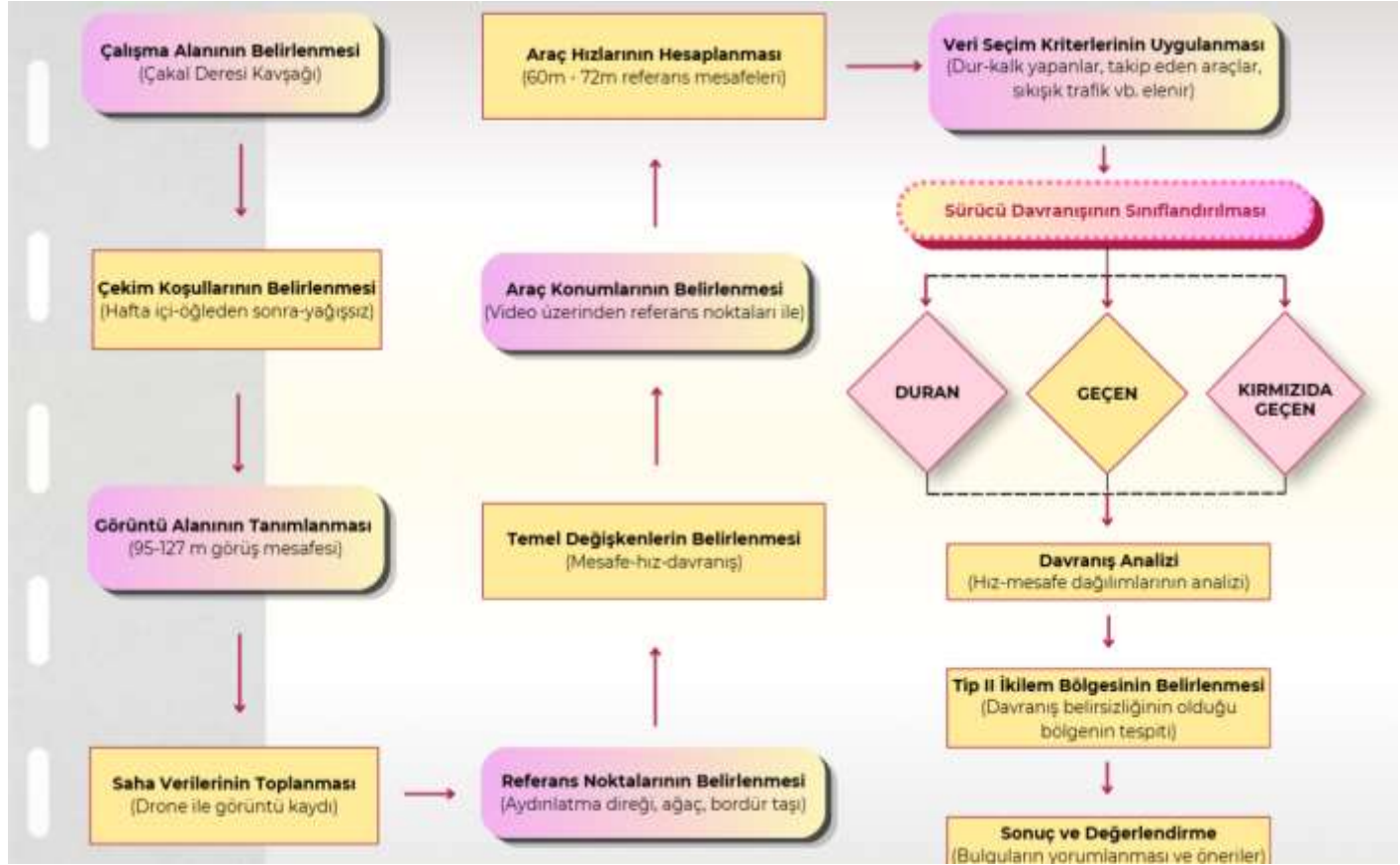
2.4.Veri Seçim Kriterleri

Analiz kapsamında, durduktan sonra yeniden hareket eden araçlar veri setine dahil edilmemiştir. Bununla birlikte, otobüs, minibüs, ağır taşıtlar ile iki ve üç tekerlekli motorlu taşıtlar çalışma kapsamına alınmıştır. Öte yandan, sürücü davranışlarını etkileyebilecek sıkışık trafik koşulları dikkate alınarak, özellikle takip eden araçların öndeki araca bağlı olarak karar verdiği durumlar veri setine dahil edilmemiştir.

2.5.Sürücü Davranışının Sınıflandırılması

Sarı faz başlangıcında durma çizgisine ulaşmadan duran araçlar “duran”, durma çizgisini geçerek kavşağa giriş yapan araçlar ise “geçen” olarak sınıflandırılmıştır. Sarı faz sırasında durma çizgisinde durmadan hareketine devam ederek kırmızı ışıktaki kavşağa giren araçlar ayrıca “kırmızıda geçen” olarak kaydedilmiştir. Araç ön tamponunun durma çizgisini geçmesi, kavşağa giriş kriteri olarak kabul edilmiştir.

Çalışmada izlenen metodolojik süreç, çalışma alanının belirlenmesi ile başlayıp veri toplama, veri işleme, analiz ve sürücü davranışlarının değerlendirilmesi aşamalarını içerecek şekilde Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. Çalışmanın metodolojik akış şeması

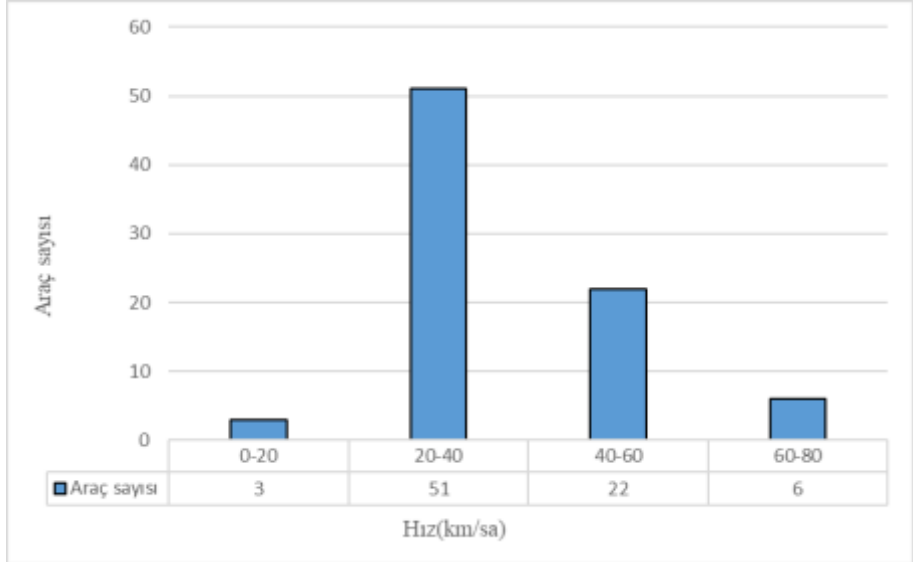
3. Veri Analizi ve Bulgular

Bu bölümde, sarı faz başlangıcında elde edilen saha verileri doğrultusunda sürücü davranışları incelenmiş; hız, mesafe ve davranış ilişkisi grafiksel analizler ile değerlendirilmiştir.

Referans noktaları arasındaki mesafe ve bu mesafenin geçilme süresi esas alınarak araçların hızları m/s cinsinden hesaplanmış, ardından elde edilen hız değerleri km/sa birimine dönüştürülmüştür.

Hazırlanan veri seti sinyalin yeşil fazdan sarı faza geçiş anında toplam 82 sürücünün verdiği tepkileri içermektedir. Video kayıtlarından elde edilen bu verilere ilişkin özet bilgiler Çizelge 1’ de sunulmaktadır.

Yapılan gözlemler sonucunda 82 aracın verileri Çizelge 1’deki gibi kaydedilmiştir. Mesafesi tam olarak belirlenemeyen araçlar yaklaşık değerler ile ifade edilmiştir: Sarı sinyalin bitmesiyle kadrja giren bir aracın sarı sinyal başlangıcındaki konumu tespit edilemediği için kadrja girdiği mesafeden daha büyük bir mesafede sarı sinyal yandığından dolayı mesafe >104 şeklinde kabul edilmiştir. Benzer şekilde sarı sinyal bitiminde kavşağa giriş yapmış olan araçlar <0 şeklinde çizelgeye kaydedilmiştir. Sarı sinyal başlangıcında kavşağa yaklaşan araçların hangi hız aralıklarında yoğunlaştığını belirlemek amacıyla elde edilen hız verileri gruplandırılarak Şekil 5’deki dağılım grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 5. Gözlemlenen araçların hız dağılımı ve sayısı

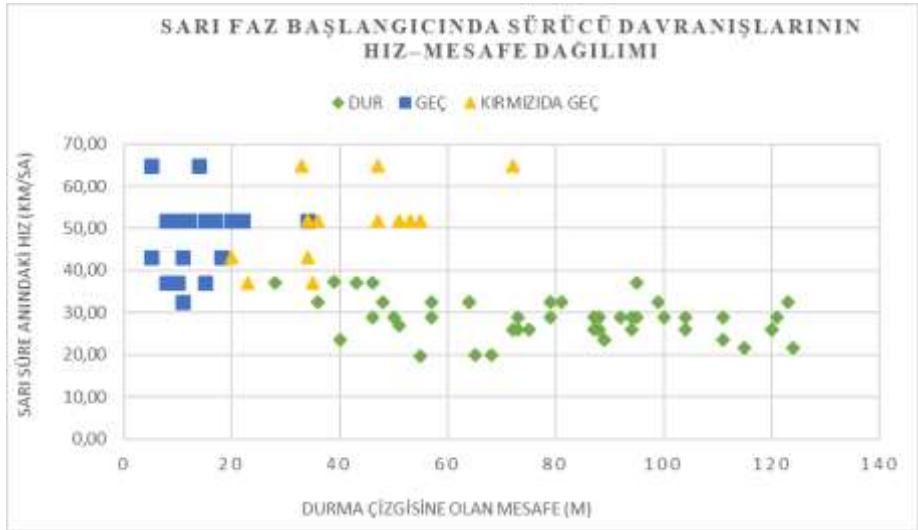
Çizelge 1.Video analizi sonucunda elde edilen veriler

NO	SARI BAŞLANGICINDA DURMA	SARI BİTİŞİNDE DURMA	GİRİŞ	ÇIKIŞ	SÜRE	REFERANS	HIZ	HIZ	SÜRÜCÜ DAVRANIŞI		
	ÇİZGİSİNE OLAN MESAFE (m)	ÇİZGİSİNE OLAN MESAFE (m)							DURAN	GEÇEN	KIRMIZIDA GEÇEN
1	>104	104	00:29	00:38	9,0	72	8,00	28,80	+		
2	95	33	01:14	01:21	7,0	72	10,29	37,03	+		
3	104	55	02:07	02:17	10,0	72	7,20	25,92	+		
4	50	27	02:52	03:01	9,0	72	8,00	28,80	+		
5	22	<0	03:40	03:45	5,0	72	14,40	51,84		+	
6	33	12	03:42	03:46	4,0	72	18,00	64,80			+
7	51	27	00:00	00:08	8,0	60	7,50	27,00	+		
8	55	38	00:00	00:11	11,0	60	5,45	19,64	+		
9	11	<0	03:16	03:21	5,0	72	14,40	51,84		+	
10	53	27	03:19	03:24	5,0	72	14,40	51,84			+
11	15		04:55	05:02	7,0	72	10,29	37,03		+	
12	17		04:57	05:02	5,0	72	14,40	51,84		+	
13	95	71	05:02	05:11	9,0	72	8,00	28,80	+		
14	72	40	00:27	00:31	4,0	72	18,00	64,80			+
15	34	<0	01:14	01:19	5,0	72	14,40	51,84		+	
16	92	68	02:09	02:18	9,0	72	8,00	28,80	+		
17	64	37	02:56	03:04	8,0	72	9,00	32,40	+		
18	87	61	02:58	03:08	10,0	72	7,20	25,92	+		
19	88	65	02:58	03:08	10,0	72	7,20	25,92	+		
20	8	<0	03:42	03:47	5,0	72	14,40	51,84		+	
21	36	12	03:44	03:52	8,0	72	9,00	32,40	+		
22	43	15	03:45	03:52	7,0	72	10,29	37,03	+		
23	89	67	01:45	01:56	11,0	72	6,55	23,56	+		
24	34	5	00:02	00:07	5,0	72	14,40	51,84			+
25	10	<0	01:39	01:46	7,0	72	10,29	37,03		+	
26	39	15	01:42	01:49	7,0	72	10,29	37,03	+		
27	72	51	02:35	02:45	10,0	72	7,20	25,92	+		
28	87	66	05:06	05:15	9,0	72	8,00	28,80	+		
29	34	12	00:28	00:34	6,0	72	12,00	43,20			+
30	51	23	00:30	00:35	5,0	72	14,40	51,84			+

Şekil 5’de hız aralıklarına göre dağılım incelendiğinde araçların büyük çoğunluğunun 20–40 km/sa hız aralığında toplandığı görülmektedir. Bu aralıkta toplam 51 araç yer almakta olup, bu değer tüm gözlemlerin en yüksek frekansını oluşturmaktadır. 40–60 km/sa aralığında 22 araç bulunurken, 60–80 km/sa aralığında yalnızca 6 araç kaydedilmiştir. En düşük frekans ise 0–20 km/sa aralığında 3 araç ile gözlenmiştir.

Bu dağılım, çalışma alanındaki araç hareketlerinin ağırlıklı olarak orta hız bandında gerçekleştiğini göstermektedir. Özellikle 20–40 km/sa aralığındaki yoğunlaşma, kavşağa yaklaşan sürücülerin kontrollü ve nispeten düşük hızlarda seyrettiklerini ortaya koymaktadır. Daha yüksek hız aralıklarında araç sayısının azalması ise sürücülerin kavşağa yaklaştıkça hız düşürme eğiliminde olduklarını göstermektedir. Bu durum, kavşak yaklaşımında sürücü davranışlarının güvenlik odaklı bir şekilde şekillendiğine işaret etmektedir.

Sürücülerin sarı faz başlangıcındaki davranışlarını hız ve konum ilişkisi çerçevesinde değerlendirebilmek amacıyla, araçların sarı ışık anındaki hızları ile durma çizgisine olan mesafeleri birlikte analiz edilmiş ve elde edilen dağılım Şekil 6’da sunulmuştur.



Şekil 6. Sarı faz başlangıcındaki sürücü davranışları

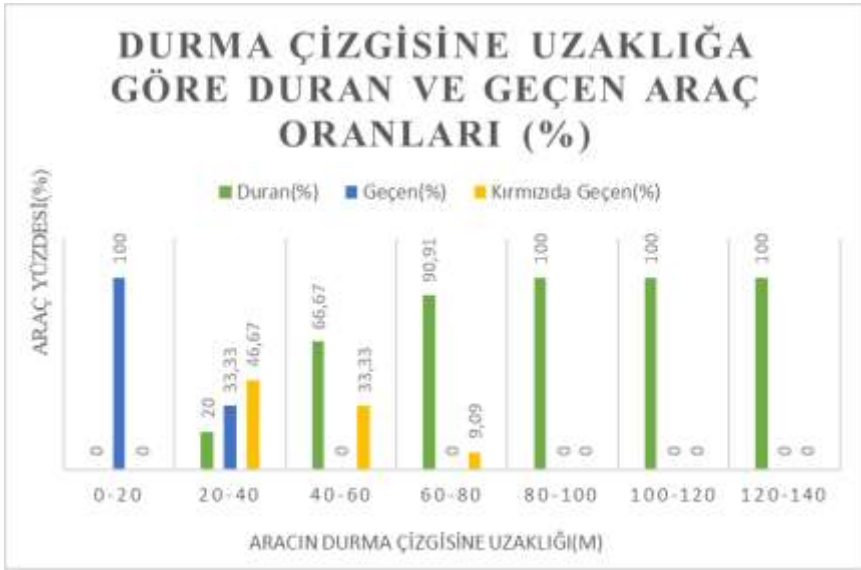
Şekil 6 incelendiğinde, sürücü davranışlarının hız ve mesafeye bağlı olarak belirgin biçimde ayrıştığı görülmektedir. Durma davranışı gösteren araçların genellikle daha düşük hızlarda ve durma çizgisine daha uzak mesafelerde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Buna karşılık, geçme davranışı

sergileyen araçların daha yüksek hızlarda ve kavşağa daha yakın mesafelerde bulunduğu gözlemlenmektedir.

Kırmızı ışık ihlali yapan araçların ise genellikle yüksek hız ve orta mesafe aralığında kümелendiğı görülmektedir. Bu durum, sürücülerin sarı faz başlangıcında hızlarını yeterince düşürmemeleri halinde durma yerine geçme kararına yöneldiklerini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, hız arttıkça durma olasılığının azaldığı, geçme ve ihlal davranışlarının ise daha olası hâle geldiğı söylenebilir. Bu dağılım, sürücülerin karar verme sürecinde hızın belirleyici bir parametre olduğunu ve belirli hız–mesafe aralıklarında ikilem bölgesi davranışlarının ortaya çıktığını göstermektedir.

Sürücü davranışlarının durma çizgisine olan mesafeye bağılı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymak amacıyla, araçların durma, geçme ve kırmızı ışık ihlali davranışları mesafe aralıklarına göre yüzdesel olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. Kavşak yaklaşımında sürücü kararlarının mesafeye göre değişimi

Şekil 7 incelendiğinde, sürücü davranışlarının durma çizgisine olan mesafeye bağılı olarak belirgin biçimde değiştiğı görülmektedir. Kavşağa en yakın mesafe aralığı olan 0–20 m’de araçların tamamının geçme davranışı gösterdiği, bu mesafede durma davranışının neredeyse hiç gözlenmediğı dikkat çekmektedir.

20–40 m aralığında durma, geçme ve kırmızı ışık ihlali davranışlarının birlikte görülmesi, bu bölgenin sürücü kararlarının belirsizleştiği bir geçiş bölgesi olduğunu göstermektedir. Ancak bu aralıkta geçme davranışının diğer davranışlara göre daha yüksek oranda gerçekleştiği görülmektedir.

40–60 m ve 60–80 m aralıklarında durma oranlarının belirgin şekilde arttığı, buna karşılık geçme oranlarının azaldığı gözlenmektedir. 40–60 m aralığında geçme davranışı gözlenmezken, kırmızı ışık ihlali davranışının düşük oranda devam ettiği görülmektedir. 60–80 m aralığında ise araçların büyük çoğunluğunun durma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Daha uzak mesafelerde (80 m ve üzeri) ise araçların büyük çoğunluğunun durma davranışı sergilediği ve geçme ile ihlal oranlarının yok denecek kadar azaldığı görülmektedir. 80 m ve üzerindeki mesafe aralıklarında geçme ve kırmızı ışık ihlali davranışına rastlanmamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, durma çizgisine olan mesafe arttıkça durma olasılığının arttığı, buna karşılık geçme ve kırmızı ışık ihlali davranışlarının azaldığı söylenebilir. Özellikle 20–40 m aralığında farklı sürücü davranışlarının birlikte görülmesi, bu bölgenin sürücüler açısından karar verme sürecinin yoğunlaştığı bir alan olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, mesafe arttıkça sürücülerin durma yönünde daha tutarlı davranış sergilediği anlaşılmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, kentsel bir sinyalize kavşakta sarı faz başlangıcında sürücü davranışları hız ve durma çizgisine olan mesafe parametreleri çerçevesinde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, sürücü kararlarının bu iki temel değişkene bağlı olarak sistematik biçimde değiştiğini ve belirli hız–mesafe kombinasyonlarında davranışların belirgin şekilde ayrıştığını ortaya koymaktadır.

Hız dağılımı analizleri, araçların büyük ölçüde orta hız aralığında (20–40 km/sa) yoğunlaştığını göstermiştir. Buna karşın hız–mesafe ilişkisine dayalı değerlendirmeler, hız arttıkça durma olasılığının azaldığını; geçme ve özellikle kırmızı ışık ihlali davranışlarının daha olası hâle geldiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yaklaşım hızının sürücü karar mekanizmasında kritik bir belirleyici olduğunu açıkça göstermektedir.

Mesafeye bağlı yüzdesel analizler ise sürücü davranışlarının mekânsal olarak belirgin eşikler içerdiğini ortaya koymaktadır. Kavşağa çok yakın mesafelerde (0–20 m) geçme davranışı baskın hâle gelirken, uzak mesafelerde (80 m ve üzeri) durma davranışı neredeyse tamamen hâkimdir.

Buna karşılık, özellikle 20–40 m mesafe aralığında durma, geçme ve kırmızı ışık ihlali davranışlarının birlikte gözlenmesi, bu bölgenin sürücüler açısından yüksek belirsizlik içeren bir karar alanı olduğunu göstermektedir.

Tip II ikilem bölgesi, kesin sınırları olan fiziksel bir alan olmaktan ziyade, sürücü davranışlarının olasılıksal dağılımına bağlı olarak değişen dinamik bir yapı sergilemektedir. Bu bağlamda çalışmada elde edilen bu bulgular, literatürde tanımlanan Tip II ikilem bölgesinin saha verileri ile uyumludur. Bu yönüyle çalışma, ikilem bölgesinin yalnızca teorik bir kavram olmadığını, gerçek trafik koşullarında ölçülebilir ve analiz edilebilir bir davranışsal alan olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bir diğer önemli sonucu, kırmızı ışık ihlallerinin özellikle orta mesafe ve nispeten yüksek hız kombinasyonlarında yoğunlaşmasıdır. Bu durum, sürücülerin sarı faz başlangıcında hızlarını yeterince düşürmemeleri halinde riskli kararlar almaya daha yatkın olduklarını göstermekte ve trafik güvenliği açısından kritik bir risk alanına işaret etmektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, sinyalizasyon kavşak tasarımında yalnızca geometrik düzenlemelerin değil, aynı zamanda sürücü davranışlarının da dikkate alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Özellikle sarı faz süresinin belirlenmesinde yaklaşım hızları, sürücü tepki süreleri ve ikilem bölgesi uzunluğu birlikte değerlendirilmelidir. Ayrıca, yüksek riskli mesafe aralıklarında sürücü davranışlarını yönlendirmeye yönelik dinamik hız uyarı sistemleri, geri sayım göstergeleri veya adaptif sinyal kontrol sistemleri gibi uygulamaların kullanılması, ikilem bölgesinin olumsuz etkilerini azaltmada etkili olabilir.

Bununla birlikte, çalışmanın tek bir kavşak ve sınırlı sayıda gözlem (n=82) ile gerçekleştirilmiş olması, elde edilen sonuçların genellenebilirliği açısından bir kısıt oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda farklı geometrik özelliklere ve trafik hacimlerine sahip kavşaklarda daha geniş veri setleri ile analizlerin tekrarlanması, ayrıca sürücü davranışlarının demografik ve psikolojik boyutlarının da incelenmesi önerilmektedir.

REFERANSLAR

- Akgüngör, A. P. ve Mercan, E. Z. (2021). An analysis of Type I dilemma zone at signalised intersecitons. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.2021, 112, 05-16. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.112.1>.
- Chang, M., Messer, J. C. ve Santiago, A. (1985). Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior. Transportation Research Board 1027, 20-30 ISSN: 0361-1981.

- Gazis, D., Herman, R. ve Maradudin, A. (1960). The Problem of The Amber Signal Light in Traffic Flow. *Operation Research* 8(1),112-132.
- Kang, M. W., Rahman, M., & Lee, J. (2020). Determination and utilization of dilemma zone length and location for safety assessment of rural high-speed signalized intersections. *Transportation research record*, 2674(4), 272-280.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2005). *Karayolu tasarım el kitabı*. Ankara.
- Li, H., Platte, T., Mathew, J., Smith, W. B., Saldivar-Carranza, E., & Bullock, D. M. (2020). Using connected vehicle data to reassess dilemma zone performance of heavy vehicles. *Transportation research record*, 2674(5), 305-314.
- Mercan, E. Z. (2023). *Sinyalize kavşaklarda ikilem bölgeleri ve sarı ışık süresinin etkisi* (Yüksek lisans tezi). Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Kırıkkale.
- Papaioannou, P., Papadopoulos, E., Nikolaidou, A., Politis, I., Basbas, S., & Kountouri, E. (2021). İkilem bölgesi: İHA teknolojisi kullanılarak sinyalizasyonlu kavşaklarda sürücülerin agresiflik ve diğer faktörlere karşı karar vermelerinin modellenmesi. *Güvenlik*, 7 (1), 11.
- Pathivada, B. K., & Perumal, V. (2017). Modeling driver behavior in dilemma zone under mixed traffic conditions. *Transportation research procedia*, 27, 961-968.
- Pawar, DS, Pathak, D., & Patil, GR. (2022). Modeling dynamic distribution of dilemma zone at signalized intersections for developing world traffic, *Journal of Transportation Safety & Security*, 14:5, 886-904, DOI:10.1080/19439962.2020.1852464
- Pudasaini, P., Haule, H., & Wu, Y. J. (2025). Modeling dilemma zone at urban signalized intersections using crowdsourced trajectory data. *Accident Analysis & Prevention*, 219, 108070.
- Rahman, M., Kang, M. W., & Biswas, P. (2021). Predicting time-varying, speed-varying dilemma zones using machine learning and continuous vehicle tracking. *Transportation research part C: emerging technologies*, 130, 103310.
- Yandex.(t.y.). Çakal Deresi Kavşağı. Yandex Haritalar. https://yandex.com.tr/maps/17307/manavgat/geo/cakal_deresi_kavsagi/3975081750/ Erişim tarihi:20.04.2026
- Zegeer, C. V., & Deen, R. C. (1978). Green-extension systems at high-speed intersections (Vol. 496). Department of Transportation.
- Zhao, J., Yu, J., Zhang, F., & Liu, Y. (2023). Yörünge tabanlı dinamik ikilem bölgesi koruması ile sinyalize kavşak çarpışma risklerinin azaltılması. *Kaza Analizi ve Önleme*, 192, 107288.
- Zhao, W., Gu, R., & Sze, NN (2024). Sarı ikilem bölgelerinde sürücülerin dur-kalk kararlarını ne etkiler? Hong Kong'da bir sürüş simülatörü çalışması. *Kaza Analizi ve Önleme*, 207, 107767.

İndüksiyonla Isıtılan Boru Sistemlerinde İnsert Geometrisinin Isı Transfer Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

Çağla YILDIRIM¹

Kemal ERMİŞ²

- 1- Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü 23500905029@subu.edu.tr ORCID No 0009-0000-2791-8549
- 2- Prof. Dr., Makina Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Türkiye, ermis@subu.edu.tr ORCID No:0000-0003-3110-2731

ÖZET

Bu çalışmada, indüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan farklı insert geometrilerinin ısı transfer performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, indüksiyon bobini ile ısıtılan bir boru içerisinde geçen akışkana aktarılan ısıнын farklı geometrik yapılara sahip insert elemanları ile nasıl değiştiği araştırılmıştır. Deney düzeneğinde sabit gerilim ve benzer çalışma koşulları altında; ısıtıcı elemanı olmayan durum, 15×15 mm demir profil, demir spiral, neodimyum mıknatıs, demir boru, demir helezon, bakır spiral, bakır boru, bakır helezon 1 ve bakır helezon 2 geometrileri kullanılmıştır.

Deneylede giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüş, sıcaklık farkı değerleri kullanılarak akışkana aktarılan ısı miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca her deney için güç kaynağı akım ve güç değerleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, insert geometrisinin akış yapısını ve türbülans seviyesini değiştirerek ısı transfer performansını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Özellikle demir esaslı geometrilerin elektromanyetik alan etkisiyle daha yüksek ısı üretimine katkı sağladığı belirlenmiştir. Buna karşılık, bazı bakır geometrilerde yüksek ısı iletkenliğe rağmen indüksiyon etkisinin düşük olması nedeniyle daha sınırlı ısı transfer performansı elde edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde en yüksek ısı transfer değerlerinin demir bazlı insertlerde elde edildiği, helezon ve spiral benzeri geometrilerin ise akış içerisinde karışımı artırarak sıcaklık dağılımını iyileştirdiği görülmüştür. Çalışma, indüksiyonla akışkan ısıtma uygulamalarında yalnızca bobin tasarımının değil, aynı zamanda boru içerisine yerleştirilen insert geometrisinin de sistem verimi açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulguların enerji verimli indüksiyon sistemlerinin geliştirilmesi, kompakt ısı değiştirici tasarımları ve endüstriyel akışkan ısıtma uygulamalarına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler – İndüksiyonla ısıtma, Insert geometrisi, ZVS sürücü, Isı transferi, ST-37 aparat boru

GİRİŞ

İndüksiyonla ısıtma, alternatif manyetik alan etkisiyle iletken malzemelerde girdap akımları oluşturarak temassız ısı üretimine imkân sağlayan elektromanyetik bir ısıtma yöntemidir. Yüksek enerji yoğunluğu, kısa işlem süresi, hassas sıcaklık kontrolü ve düşük enerji kayıpları nedeniyle son yıllarda özellikle metal işleme, yüzey sertleştirme, ergitme, boru ısıtma ve enerji sistemleri uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel rezistanslı sistemlere kıyasla daha yüksek enerji verimi sağlaması ve lokal

ısıtma kabiliyeti sunması, indüksiyon teknolojilerine yönelik endüstriyel ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır (Rudnev vd., 2017).

İndüksiyonla ısıtmada temel prensip, alternatif akım ile beslenen bir bobin etrafında oluşan değişken manyetik alanın iletken malzemede girdap akımları oluşturmaya dayanmaktadır. Oluşan girdap akımları Joule etkisiyle malzeme içerisinde ısı üretmektedir. Ferromanyetik malzemelerde ise girdap akımlarına ek olarak histerezis kayıpları da ısı oluşumuna katkı sağlamaktadır. Bu nedenle malzemenin elektriksel iletkenliği, manyetik geçirgenliği, geometrisi ve kullanılan bobin yapısı sistem performansını doğrudan etkilemektedir. (Davies ve Simpson, 1979).

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde elektromanyetik alan dağılımını belirleyen temel parametrelerden biri bobin geometrisidir. Bobin çapı, sarım sayısı, sarım aralığı ve bobin-iş parçası arasındaki mesafe, manyetik akı yoğunluğunu, girdap akımı dağılımını ve buna bağlı olarak oluşan ısı miktarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek frekanslı sistemlerde bobin geometrisinin optimize edilmesi, enerji veriminin artırılması ve homojen sıcaklık dağılımının sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Lucía vd., 2013).

İndüksiyonla ısıtılan boru sistemlerinde yalnızca bobin geometrisi değil, aynı zamanda boru içerisinde kullanılan akış yönlendirici aparatların geometrisi de ısı transfer performansını doğrudan etkilemektedir. Boru içerisine yerleştirilen spiral, helezon, profil veya türbülans artırıcı insert yapıları akış karakteristiğini değiştirerek sınır tabaka oluşumunu azaltmakta ve konvektif ısı transfer katsayısını artırabilmektedir. Özellikle swirl akış oluşturan geometrilerin akışkan içerisinde türbülansı artırarak daha homojen sıcaklık dağılımı sağladığı bilinmektedir. Ancak bu yapıların basınç kaybını artırması nedeniyle sistem performansının hem termal hem de hidrodinamik açıdan birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. (Manglik ve Bergles, 1993).

Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların büyük bölümü, indüksiyon sistemlerinde bobin geometrisinin elektromanyetik performansına veya klasik ısı değiştiricilerde kullanılan türbülans artırıcı insert yapılarına ayrı ayrı odaklanmaktadır. Bükümlü bant, spiral ve helisel insert geometrilerinin konvektif ısı transferini artırdığı birçok çalışmada raporlanmış olsa da, bu yapıların elektromanyetik indüksiyonla ısıtılan boru sistemleri içerisindeki davranışları sınırlı düzeyde incelenmiştir. Özellikle farklı insert malzemelerinin elektromanyetik alan ile etkileşiminin ve bunun akışkan sıcaklığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği deneysel çalışmalar literatürde yeterince yer almamaktadır.

Bu çalışmada, indüksiyonla ısıtılan bir boru sistemi içerisinde kullanılan farklı insert geometrilerinin ve malzeme tiplerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında boş boru, 15×15 mm profil, spiral, helezon, neodyum mıknatıs, bakır boru ve farklı bakır helezon geometrileri olmak üzere toplam on farklı konfigürasyon incelenmiştir. Deneylerde sabit güç koşullarında çalışan tek

fazlı bir indüksiyon sistemi kullanılmış ve her konfigürasyon için sıcaklık farkı, debi ve ısı transfer miktarı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların indüksiyonla akışkan ısıtma sistemlerinin tasarımı ve enerji verimliliğinin artırılması açısından literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. İNDÜKSİYONLA ISITMANIN TEORİK TEMELLERİ

2.1 Elektromanyetik İndüksiyon Prensibi

İndüksiyonla ısıtma, elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanan ve iletken malzemelerde temassız şekilde ısı üretimini sağlayan bir yöntemdir. Bu prensibin temeli Michael Faraday tarafından ortaya konulan elektromanyetik indüksiyon yasasına dayanmaktadır. Alternatif akım ile beslenen bir bobin etrafında zamana bağlı değişen bir manyetik alan oluşmakta ve bu manyetik alan iletken malzemeler üzerinde girdap akımları (eddy currents) meydana getirmektedir. Oluşan girdap akımları malzemenin elektriksel direnci nedeniyle Joule ısısı oluşturarak malzemenin hızlı şekilde ısınmasına neden olmaktadır. (Faraday, 1832).

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde oluşan toplam ısının önemli bir bölümü girdap akımlarından kaynaklanırken, ferromanyetik malzemelerde histerezis kayıpları da ek ısı üretimine katkı sağlamaktadır. Özellikle çelik gibi yüksek manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerde manyetik domenlerin sürekli yön değiştirmesi ek enerji kayıplarına neden olmakta ve bu durum malzemenin daha hızlı ısınmasını sağlamaktadır. Bu nedenle ferromanyetik malzemeler indüksiyonla ısıtma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. (Rudnev vd., 2017).

İndüksiyon sistemlerinde üretilen ısı miktarı; uygulanan frekans, akım şiddeti, bobin geometrisi, malzeme özellikleri ve bobin-iş parçası arasındaki mesafe gibi birçok parametreye bağlıdır. Manyetik alan yoğunluğunun artmasıyla girdap akımı yoğunluğu da artmakta ve buna bağlı olarak ısı üretimi yükselmektedir. Bu nedenle bobin geometrisinin optimize edilmesi indüksiyon sistemlerinde enerji verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. (Zinn ve Semiatin, 1988).

2.2 İndüksiyonla Isı Üretim Mekanizması

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde enerji dönüşümü doğrudan iş parçası üzerinde gerçekleşmektedir. Geleneksel ısıtma yöntemlerinden farklı olarak ısı önce ortam havasına veya rezistansa aktarılmamakta, elektromanyetik alan sayesinde doğrudan malzeme içerisinde üretilmektedir. Bu durum enerji kayıplarını azaltmakta ve yüksek verimli bir ısıtma süreci sağlamaktadır.

İndüksiyonla ısıtma sırasında oluşan girdap akımlarının yoğunluğu malzemenin yüzey bölgelerinde daha yüksek olmaktadır. Bu durum yüzey etkisi olarak tanımlanmaktadır. Yüksek frekanslarda akım yoğunluğu malzemenin dış yüzeyine yakın bölgelerde yoğunlaşmakta ve yüzeysel ısınma

meydana gelmektedir. Akımın malzeme içerisine nüfuz ettiği derinlik nüfuziyet derinliği olarak adlandırılmaktadır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

Burada;

- δ : nüfuziyet derinliği (m)
- ρ : malzemenin elektriksel öz direnci ($\Omega \cdot m$),
- ω : açısal frekans (rad/s),
- μ : manyetik geçirgenliktir (H/m).

parametrelerini ifade etmektedir.

Frekans arttıkça nüfuziyet derinliği azalmakta ve ısı üretimi daha yüzeysel hale gelmektedir. Bu özellik özellikle yüzey sertleştirme uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Ancak boru tipi akışkan ısıtma sistemlerinde oluşan ısının boru cidarından akışkana aktarılması gerektiğinden, yüzeyde oluşan ısının konveksiyon yoluyla etkin şekilde taşınması büyük önem taşımaktadır. (Davies ve Simpson, 1979).

2.3 Konvektif Isı Transferi

İndüksiyonla ısıtılan boru sistemlerinde oluşan ısının akışkana aktarılması temel olarak zorlanmış taşınım mekanizması ile gerçekleşmektedir. Konvektif ısı transfer performansı; akış rejimi, sıcaklık farkı, akışkan özellikleri ve yüzey geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle türbülans seviyesindeki artışın termal sınır tabakasını incelterek konvektif ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırdığı bilinmektedir (Incropera vd., 2011). Isı transfer miktarı aşağıdaki temel denklem ile ifade edilmektedir:

$$Q = h A \Delta T \quad (2)$$

Burada;

- Q: ısı transfer miktarı,
- h: konvektif ısı transfer katsayısı,
- A: yüzey alanı,
- ΔT : sıcaklık farkıdır.

Konvektif ısı transfer katsayısı büyük ölçüde akış rejimine bağlıdır. Laminer akış koşullarında akışkan tabakaları düzenli hareket etmekte ve sınır tabaka kalınlığı arttığı için ısı transferi sınırlı olmaktadır. Türbülanslı akışta ise akışkan parçacıkları sürekli karıştığından sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmekte ve ısı transfer katsayısı önemli ölçüde yükselmektedir. (Incropera vd., 2011).

Akış rejiminin belirlenmesinde Reynolds sayısı kullanılmaktadır:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3)$$

Reynolds sayısının artması türbülans oluşumunu artırmakta ve dolayısıyla konvektif ısı transfer performansını geliştirmektedir.

2.4 İnsert Geometrisinin Akışa Etkisi

Boru içerisine yerleştirilen insert yapıları, akış karakteristiğini değiştirerek konvektif ısı transfer performansını artıran pasif yöntemler arasında yer almaktadır. Spiral, helezon, profil ve girdap oluşturuvcu geometriler akış yönünü değiştirerek türbülans oluşumunu artırmakta ve sınır tabaka kalınlığını azaltmaktadır.

Spiral ve helezon insert geometrileri, akışkana dönel hareket kazandırarak akış içerisindeki karışımı artırmakta ve termal sınır tabakasının incelmeye katkı sağlamaktadır. Manglik ve Bergles (1993) swirl etkisi oluşturan insertlerin Nusselt sayısını önemli ölçüde artırdığını ve böylece konvektif ısı transfer performansını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, insert geometrisinin oluşturduğu türbülans artışı, sistemdeki basınç kayıplarını da yükseltebilmektedir. Bu nedenle insert tasarımında termal performans ile hidrodinamik kayıpların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Profil tipi insertler ise akış kesitini değiştirerek lokal türbülans bölgeleri oluşturmakta ve akışkanın boru yüzeyi ile etkileşimini artırmaktadır. Bununla birlikte, insert geometrilerinin oluşturduğu türbülans aynı zamanda basınç kaybını da artırabilmektedir. Bu nedenle insert tasarımında hem ısı transfer performansı hem de hidrodinamik kayıplar birlikte değerlendirilmelidir.

Ferromanyetik insertler yalnızca akış karakteristiğini değil, elektromanyetik alan dağılımını da etkileyebilmektedir. Çelik gibi yüksek manyetik geçirgenliğe sahip malzemeler elektromanyetik alan yoğunluğunu artırarak lokal ısı üretimini geliştirebilirken, bakır gibi yüksek termal iletkenliğe sahip malzemeler sistemin içerisinde daha hızlı yayılmasını sağlayabilmektedir. Bu nedenle insert geometrisinin yanı sıra insert malzemesi de indüksiyonla ısıtılan sistemlerin performansında önemli rol oynamaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Bobin Geometrisinin Isı Transferine Etkisi

İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde bobin geometrisi, elektromanyetik alan dağılımını ve buna bağlı olarak oluşan girdap akımı yoğunluğunu doğrudan belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bobin çapı, sarım sayısı, sarım aralığı, bobin yüksekliği ve bobin-iş parçası arasındaki mesafe sistemin toplam enerji transfer performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışmada, bobin geometrisinin optimize

edilmesiyle ısıtma veriminin ciddi oranda artırılabilceği belirtilmiştir. (Zinn ve Semiatin, 1988).

Spiral bobin geometrileri indüksiyonla ısıtma sistemlerinde en yaygın kullanılan yapılardan biridir. Spiral yapılar özellikle silindirik iş parçalarında daha homojen manyetik alan dağılımı sağlamakta ve yüzey boyunca eşit ısı oluşumuna katkı vermektedir. Bununla birlikte, sarım aralığının azalması manyetik alan yoğunluğunu artırırken, aşırı sık sarımlar bobin üzerinde ek termal yük oluşturabilmektedir. Bu nedenle bobin tasarımında elektromanyetik performans ile termal dayanım birlikte değerlendirilmelidir. (Rudnev vd., 2017).

Lucía ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, bobin geometrisinin elektromanyetik kuplaj üzerindeki etkisi detaylı şekilde incelenmiş ve özellikle yüksek frekanslı sistemlerde bobin-iş parçası geometrik uyumunun sistem verimliliği açısından kritik olduğu gösterilmiştir. Araştırmacılar, uygun bobin geometrisi kullanılarak enerji kayıplarının azaltılabileceğini ve daha kısa sürede daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilceğini raporlamıştır. (Lucía vd., 2013).

Gao ve arkadaşları ise manyetizer geometrisinin lokal manyetik akı yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelemiş ve geometrik değişimlerin girdap akımı dağılımını doğrudan değiştirdiğini göstermiştir. Özellikle bobin yakınındaki keskin geometrik değişimlerin lokal ısınma bölgeleri oluşturduğu belirtilmiştir. (Gao vd., 2016).

İndüksiyon sistemlerinde bobin-iş parçası arasındaki hava boşluğu da önemli parametrelerden biridir. Bobin ile iş parçası arasındaki mesafenin artması elektromanyetik kuplajı zayıflatmakta ve enerji transfer verimini düşürmektedir. Çok düşük mesafelerde ise bobinin aşırı ısınması ve sistem kararsızlığı görülebilmektedir. Bu nedenle optimum hava boşluğu tasarımı sistem performansı açısından kritik öneme sahiptir. (Davies ve Simpson, 1979).

3.2 İç Akış Aparatlarının (İnsertlerin) Isı Transferine Etkisi

Akışkanla çalışan boru tipi ısı transfer sistemlerinde kullanılan insert yapıları, pasif ısı transfer artırma yöntemleri arasında yer almakta ve özellikle türbülans seviyesini artırarak konvektif ısı transfer performansını geliştirmektedir. Literatürde bükümlü bant, helisel insert, yivli insert ve girdap üretici gibi farklı geometrilerin Nusselt sayısı ve basınç kaybı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde incelenmiştir.

Spiral ve helezon insertlerin temel çalışma prensibi, akışkana dönel hareket kazandırarak türbülans seviyesini artırmaktır. Oluşan girdap akış sayesinde akışkanın merkez bölgesindeki yüksek enerjili parçacıklar sürekli olarak boru yüzeyine taşınmakta ve sınır tabaka kalınlığı azalmaktadır. Bu durum konvektif ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırmaktadır. (Manglik ve Bergles, 1993).

Bükümlü bant tipi insertlerin kullanıldığı çalışmalarda Nusselt sayısında önemli artışlar elde edildiği raporlanmıştır. Bununla birlikte insert geometrisinin oluşturduğu basınç kayıplarının da arttığı belirtilmiştir. Dolayısıyla ısı transfer performansı değerlendirilirken yalnızca sıcaklık artışı değil, hidrodinamik kayıplar da dikkate alınmalıdır. (Eiamsa-ard ve Promvonge, 2010).

Profil tipi insertler ise akış kesitini değiştirerek lokal hız farklılıkları oluşturmakta ve akışkanın boru yüzeyi ile temasını artırmaktadır. Kare profil veya kanatçıklı yapıların özellikle düşük Reynolds sayılarında türbülans oluşumunu desteklediği ve böylece laminar akış koşullarında dahi ısı transferini iyileştirdiği belirtilmektedir. (Bergles, 2002).

Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu klasik ısı eşanjörleri veya rezistanslı sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. İndüksiyonla ısıtılan boru sistemlerinde insert geometrilerinin elektromanyetik alan ile birlikte değerlendirilmesi ise oldukça sınırlıdır. Özellikle insert geometrisinin yalnızca akış rejimini değil, aynı zamanda manyetik alan dağılımını da etkileyebileceği düşünülmektedir.

3.3 Ferromanyetik ve Bakır İnsertlerin Karşılaştırılması

İndüksiyonla ısıtılan sistemlerde insert malzemesi yalnızca termal iletkenlik açısından değil, elektromanyetik davranış açısından da kritik öneme sahiptir. Çelik gibi ferromanyetik malzemeler yüksek manyetik geçirgenlik özellikleri sayesinde elektromanyetik alanı yoğunlaştırabilmekte ve girdap akımı oluşumunu artırabilmektedir.

Ferromanyetik malzemelerde histerezis kayıpları da ek ısı üretimine katkı sağladığından, bu tür malzemelerin indüksiyon sistemlerinde daha yüksek lokal sıcaklık oluşturduğu bilinmektedir. Rudnev tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, çelik esaslı sistemlerin elektromanyetik kuplaj açısından yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir. (Rudnev vd., 2017).

Bakır ise yüksek termal iletkenliğe sahip olmasına rağmen ferromanyetik değildir. Bu nedenle manyetik alan ile etkileşimi çelik malzemelere göre daha düşüktür. Ancak bakırın yüksek termal iletkenliği, oluşan ısının sistem içerisinde daha hızlı yayılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Literatürde bakır ve çelik insertlerin aynı sistem içerisinde karşılaştırıldığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Özellikle indüksiyonla ısıtılan akışkan sistemlerinde hem elektromanyetik hem de hidrodinamik etkilerin birlikte değerlendirildiği kapsamlı deneysel çalışmalar yeterli düzeyde bulunmamaktadır.

3.4 Literatürdeki Boşluk ve Çalışmanın Özgünlüğü

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde araştırmaların çoğunlukla üç ana başlık altında toplandığı görülmektedir:

- bobin geometrisinin elektromanyetik performansı,

- klasik akışkan sistemlerinde kullanılan türbülans artırıcı insertler,
- indüksiyon sistemlerinin enerji verimi.
- Ancak indüksiyonla ısıtılan boru sistemlerinde:
- bobin geometrisi,
- insert geometrisi,
- insert malzemesi,
- akışkan davranışı,
- elektromanyetik kuplaj,
- konvektif ısı transferi

parametrelerinin birlikte değerlendirildiği deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Özellikle aynı dış geometriye sahip sistemlerde farklı iç insert geometrilerinin ve farklı malzemelerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi literatürde önemli bir eksiklik oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında:

- çelik ve bakır esaslı insertler,
- spiral, helezon, profil ve boru geometrileri,
- neodyum mıknatıs destekli yapı,
- sabit güç altında çalışan indüksiyon sistemi

birlikte değerlendirilmiş ve insert geometrisinin hem akışkan davranışı hem de elektromanyetik alan etkileşimi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Bu yönüyle çalışmanın, indüksiyonla sıvı ısıtma sistemlerinin tasarımında kullanılabilecek yeni geometrik optimizasyon yaklaşımlarına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, indüksiyonla ısıtılan boru sisteminde farklı iç akış aparatı geometrilerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma açıklanmıştır. Deneylerde temel amaç, sabit dış ısıtma koşulları altında boru içerisine yerleştirilen farklı insert geometrilerinin suyun sıcaklık artışı ve taşınımıyla ısı transferi üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktır. Insert geometrileri toplu görseli Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1: İnsert Geometrileri Toplu Görseli

Deneyisel sistem laboratuvar ölçeğinde kurulmuş olup ZVS indüksiyon sürücü devresi, ayarlanabilir DC güç kaynağı, indüksiyon bobini, ST37 çelik aparat boru, su tankı, akış kontrol vanaları, debi sensörü, sıcaklık ölçüm elemanları ve Arduino tabanlı ölçüm sistemi kullanılmıştır. Önceki bildiride de deney düzeneğinin DC güç kaynağı ve Arduino tabanlı izleme sistemi ile desteklenen taşınabilir bir deney seti olduğu belirtilmiştir.

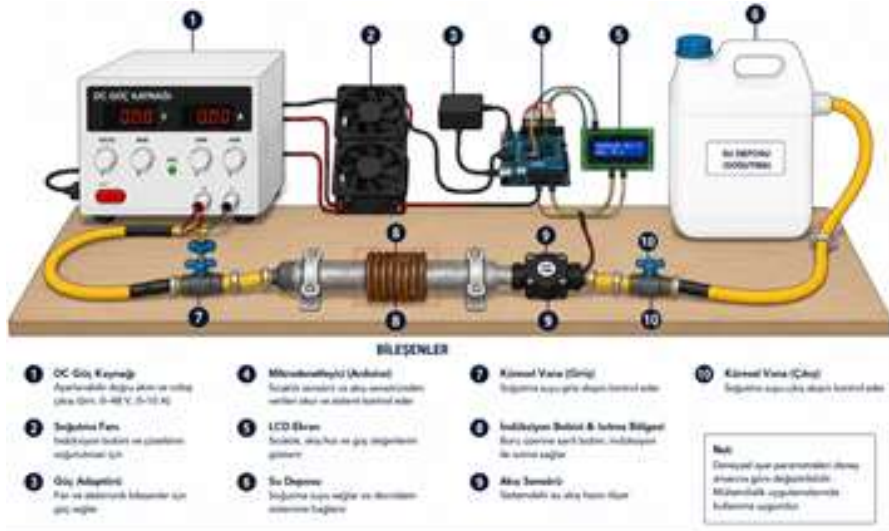
4.1 Deney Düzeneği

Deney düzeneği temel olarak kapalı devre su sirkülasyonu ve indüksiyonla ısıtılan test bölgesinden oluşmaktadır. Su, tanktan alınarak pompa yardımıyla sistem içerisinde dolaştırılmış, akış vanası ile debi kontrol edilmiş ve test borusu içerisinde geçtikten sonra tekrar tanka yönlendirilmiştir. Isıtma işlemi, ST37 çelik borunun dış kısmına yerleştirilen indüksiyon bobini ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2: Deney Düzeneği

Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 3: Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi

Deney düzeneği: güç kaynağı, indüksiyon bobini, debi ölçüm sistemi ve sıcaklık ölçüm elemanlarından oluşmaktadır. Sistem bileşenleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Deney Sistem Bileşenleri

Bileşen	Açıklama
Güç kaynağı	1,5 kW Ayarlanabilir DC güç kaynağı
İndüksiyon	İndüksiyon sürücü devresi
Bobin	Bakır spiral indüksiyon bobini
Test borusu	ST37 çelik boru
Akışkan	Su
Ölçüm sistemi	Ardunio tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi
Debi ölçer	Dijital akış sensörü
Soğutma sistemi	Fan destekli elektronik soğutma

Bu nedenle deneylerde karşılaştırma yapılırken güç kaynağı şartları sabit kabul edilmiş, temel değişkenler olarak yalnızca boru içi insert geometrisi ve insert malzemesi değerlendirilmiştir.

Deneylerde kullanılan indüksiyon sistemi tek fazlı ayarlanabilir DC güç kaynağı ile beslenmiştir. Güç kaynağı değerleri sabit deney şartları altında yaklaşık olarak 24,5 V ve 35 A olarak alınmıştır. Buna göre elektriksel güç aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$P_e = V \cdot I \quad (4)$$

$$P_e = 24.5 \times 35 = 857,5W \quad (5)$$

4.2 Kullanılan Malzeme ve Test Borusu

Deneylerde kullanılan ana gövde borusu ST37 çelik malzemeden üretilmiştir. ST37 çeliği, ferromanyetik yapısı nedeniyle indüksiyonla ısıtma uygulamaları için uygun bir malzemedir. Ferromanyetik malzemelerde değişken manyetik alan etkisiyle girdap akımları ve histerezis kayıpları oluşmakta, bu durum malzeme içerisinde doğrudan ısı üretimini desteklemektedir.

Deneyisel çalışmada kullanılan aparat boru ve insertlerin ST37 çelik malzemeden üretildiği, ST37'nin ferromanyetik özelliği nedeniyle indüksiyonla ısıtma uygulamalarında tercih edilmiştir.

4.3 Deneyisel Konfigürasyonlar

Çalışma kapsamında toplam on farklı konfigürasyon incelenmiştir. Bu konfigürasyonlar, boru içerisindeki akış yolunu değiştirmek, türbülans seviyesini artırmak, akışkanın boru yüzeyi ile temasını geliştirmek ve farklı malzemelerin elektromanyetik etkileşimlerini karşılaştırmak amacıyla seçilmiştir.

Deneylerde kullanılan konfigürasyonlar aşağıdaki gibidir:

1. Isıtıcı eleman olmayan boş boru
2. 15×15 mm demir profil

3. Demir spiral
4. Neodyum mıknatıs
5. Demir boru
6. Demir helezon
7. Bakır spiral
8. Bakır boru
9. Bakır helezon 1
10. Bakır helezon 2

Bu yapı sayesinde hem geometri etkisi hem de malzeme etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmiştir.

4.4 Ölçüm Parametreleri

Elektriksel güç parametreleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2: Elektriksel Güç Parametreleri

Parametre	Değer
Gerilim (V)	24,5
Akım (A)	35
Elektriksel güç(W)	857,5
Güç kaynağı tipi	Tek faz DC
Sistem gücü	1,5 kW

Deneylerde her konfigürasyon için giriş sıcaklığı, çıkış sıcaklığı, sıcaklık farkı, hacimsel debi ve güç kaynağı değerleri değerlendirilmiştir. Sıcaklık farkı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\Delta T = T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}} \quad (6)$$

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \Delta T \quad (7)$$

Burada suyun özgül ısısı 4180 J/kg.K olarak alınmıştır.

Bu bölümde oluşturulan deneysel veri ve hesaplama yapısı, daha sonraki bulgular kısmında insert geometrilerinin ısı transfer performansını karşılaştırmak için temel oluşturmuştur.

5. ISI TRANSFER HESAPLAMALARI

İndüksiyonla ısıtılan boru sistemlerinde üretilen ısıнын akışkana aktarılması taşınım (konveksiyon) gerçekleşmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmada her bir insert geometrisinin performansı, akışkana aktarılan toplam ısı miktarı üzerinden değerlendirilmiştir.

Deneylerde giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüş, elde edilen sıcaklık farkları kullanılarak her konfigürasyon için taşınım aktarılan ısı miktarı

hesaplanmıştır. Tüm deneylerde güç kaynağı şartları sabit tutulmuş ve yalnızca insert geometrisinin etkisi incelenmiştir.

5.1 Elektriksel Güç Hesabı

Deneylerde kullanılan ayarlanabilir DC güç kaynağının çıkış değerleri yaklaşık olarak:

- Gerilim: $V=24,5V$
- Akım: $I=35 A$

olarak ölçülmüştür.

Elektriksel güç aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:
Buna göre:

$$P_e = V \cdot I \quad (8)$$

9 nolu eşitlik yardımıyla sisteme verilen elektrik gücü 857,5 W olarak hesaplanmıştır.

Deneyler boyunca güç kaynağı parametreleri sabit tutulmuş ve yalnızca insert geometrisinin etkisi incelenmiştir.

5.2 Kütlesel ve Hacimsel Debi Hesabı

Deneyisel çalışmada hacimsel debi ölçümleri esas alınmıştır. Kütlesel debi hesabı aşağıdaki denklem yardımıyla gerçekleştirilmiştir:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \quad (9)$$

Burada; $\dot{m}$: kütlesel debi (kg/s), ρ : akışkan yoğunluğu (kg/m³) ve V : hacimsel debidir (m³/s). Deneyler boyunca su için yoğunluk yaklaşık olarak 1000 kg/m³ olarak alınmıştır.

Deneylerde farklı insert geometrilerinin akış direncini değiştirmesi nedeniyle hacimsel debi değerleri geometriye bağlı olarak değişmiştir. Spiral ve helezon yapılar akış yolunu uzattığından daha düşük debi değerleri oluştururken, boş boru geometrisinde daha yüksek debiler elde edilmiştir.

5.3 Konvektif Isı Transferi Hesabı

Akışkana aktarılan toplam ısı miktarı 7 no'lu enerji denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu yöntem literatürde indüksiyonla akışkan ısıtma sistemlerinin enerji analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.4 Deneysel Hesaplama Sonuçları

Farklı insert geometrileri için hesaplanan kütlesel debi, hacimsel debi, sıcaklık farkı ve ısı transfer miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Deneysel Ölçüm Sonuçları

ID	Konfigürasyon	$\dot{m}(kg/s)$	$\dot{V}(L/dk)$	$\Delta T(K)$	Q(W)	$I(A)/P_{el}(W)$
1	Isıtıcı eleman olmayan	0,023	1,38	8,57	823,92	35/857,5
2	Demir profil	0,021	1,26	6,80	596,90	35/857,5
3	Demir spiral	0,020	1,20	8,11	678,00	35/857,5
4	Neodyum mıknatıs	0,019	1,14	9,28	737,02	35/857,5
5	Demir boru	0,0205	1,23	7,86	673,52	35/857,5
6	Demir helezon	0,018	1,08	4,07	306,23	35/857,5
7	Bakır spiral	0,019	1,14	2,65	210,46	35/857,5
8	Bakır boru	0,020	1,20	3,74	312,66	35/857,5
9	Bakır helezon-1	0,017	1,02	4,22	299,87	35/857,5
10	Bakır helezon-2	0,016	0,96	5,83	389,91	35/857,5

Deneysel sonuçlar incelendiğinde insert geometrisinin sistem performansı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmüştür. En yüksek ısı transfer değeri neodyum mıknatıs destekli konfigürasyonda elde edilmiş olup, bu yapı boş boru geometrisine göre yaklaşık %10,5 daha düşük debi koşullarına rağmen yüksek sıcaklık farkı oluşturmuştur. Çelik esaslı spiral ve boru geometrilerinde ise boş boruya kıyasla daha dengeli bir termal performans elde edilmiştir.

Bakır esaslı insertlerde ise elektromanyetik etkileşimin daha düşük olması nedeniyle toplam ısı transfer performansının çelik esaslı yapılara göre daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Özellikle bakır spiral geometrisinin çelik spiral yapıya göre yaklaşık %69 daha düşük ısı transfer değeri oluşturduğu görülmüştür.

Elektriksel giriş gücünün tüm deneylerde yaklaşık olarak sabit tutulmasına rağmen, farklı insert geometrileri arasında önemli ısı transfer farklılıklarının olduğu belirlenmiştir. Bu durum, sistem performansının yalnızca giriş gücüne değil, akış geometrisi ve elektromanyetik kuplaj seviyesine de bağlı olduğunu göstermektedir.

Özellikle çelik esaslı insertlerin elektromanyetik alan ile daha güçlü etkileşime girmesi nedeniyle daha yüksek lokal ısı üretimi oluşturduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, bakır insertlerde yüksek termal iletkenliğe rağmen elektromanyetik alan yoğunlaşmasının sınırlı kalması nedeniyle daha düşük sıcaklık farkları elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, indüksiyonla ısıtılan sistemlerde yalnızca akış karakteristiğinin değil, insert malzemesinin elektromanyetik özelliklerinin de sistem performansı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışma sonucunda elde edilen sıcaklık farkı, debi ve hesaplanan ısı transfer verileri değerlendirilmiş, farklı insert

geometrilerinin ve insert malzemelerinin sistem performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, boru içerisine yerleştirilen insert yapılarının akış davranışını önemli ölçüde değiştirdiği ve buna bağlı olarak konvektif ısı transfer performansının doğrudan etkilendiği görülmüştür. Özellikle ferromanyetik özellik gösteren çelik esaslı insertlerin, elektromanyetik alan ile daha güçlü etkileşime girerek sistem içerisinde daha yüksek sıcaklık farkı oluşturduğu belirlenmiştir.

6.1 Insert Geometrisinin Sıcaklık Farkına Etkisi

Deney sonuçları incelendiğinde farklı insert geometrileri için elde edilen sıcaklık farklarının önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. En yüksek sıcaklık farkı neodyum mıknatıs destekli konfigürasyonda elde edilmiş olup yaklaşık olarak $\Delta T = 9,28$ °C olarak ölçülmüştür.

Bunun temel nedeni olarak neodyum mıknatısın lokal elektromanyetik alan yoğunluğunu artırması ve girdap akımı oluşumunu desteklemesi değerlendirilmektedir. Manyetik alan yoğunluğundaki artışın boru yüzeyinde oluşan lokal ısı miktarını artırdığı düşünülmektedir.

Çelik esaslı spiral ve boru geometrileri de yüksek sıcaklık farkı oluşturan yapılar arasında yer almıştır. Spiral yapıların akışkana dönöl hareket kazandırarak türbülans seviyesini artırdığı ve akışkanın boru yüzeyi ile temasını geliştirdiği düşünülmektedir. Türbülansın artması, termal sınır tabakasının kırılmasını sağlayarak konvektif ısı transfer katsayısını yükseltmiştir.

Buna karşılık bakır esaslı insertlerde daha düşük sıcaklık farkları elde edilmiştir. Özellikle bakır spiral insertte sıcaklık farkı $\Delta T = 2,65$ °C olarak ölçülmüştür. Bakırın yüksek termal iletkenliğe sahip olmasına rağmen ferromanyetik özellik göstermemesi nedeniyle elektromanyetik alan ile daha zayıf etkileşime girdiği düşünülmektedir.

6.2 Insert Malzemesinin Isı Transferine Etkisi

Deney sonuçları insert malzemesinin sistem performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Çelik esaslı insertlerin genel olarak bakır insertlere göre daha yüksek ısı transfer performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Ferromanyetik malzemeler yüksek manyetik geçirgenlikleri nedeniyle elektromanyetik alan çizgilerini yoğunlaştırabilmekte ve girdap akımı yoğunluğunu artırabilmektedir. Bu durum lokal ısı oluşumunu desteklemektedir. Ayrıca histerezis kayıpları da toplam ısı üretimine katkı sağlamaktadır.

Bakır insertlerde ise elektromanyetik etkileşimin daha düşük olduğu görülmektedir. Her ne kadar bakır yüksek termal iletkenliğe sahip olsa da, elektromanyetik alan ile zayıf etkileşim göstermesi nedeniyle toplam sistem performansı daha düşük gerçekleşmiştir.

Bu sonuçlar, indüksiyonla sıvı ısıtma sistemlerinde yalnızca geometrik yapının değil, kullanılan malzemenin elektromanyetik özelliklerinin de kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

6.3 Spiral ve Helezon Geometrilerinin Etkisi

Spiral ve helezon insert geometrileri akışkanın doğrusal akışını bozarak girdap akışı oluşmasına neden olmuştur. Bu yapı sayesinde:

- akışkan içerisinde karışım artmış,
- sınır tabaka incelmış,
- sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelmiş,
- akışkanın boru yüzeyi ile temas süresi artmıştır.

Bu etkiler sonucunda konvektif ısı transfer performansında artış meydana gelmiştir.

Özellikle çelik spiral insertin yüksek performans göstermesi, hem türbülans artışı hem de ferromanyetik etkileşim nedeniyle açıklanabilmektedir.

Ancak bazı helezon geometrilerinde akış direncinin yükseldiği düşünülmektedir. Akış yolunun uzaması ve dar geçiş bölgelerinin oluşması basınç kayıplarını artırabilmektedir. Bu nedenle geometrik optimizasyon yapılırken yalnızca sıcaklık artışı değil, hidrodinamik kayıplar da değerlendirilmelidir.

Bu sonuçlar literatürde girdap akışı oluşturan insertlerin ısı transferini geliştirdiğini belirten çalışmalar ile uyum göstermektedir.

6.4 Debi ve Akış Davranışının Etkisi

Deneysel sistemde insert geometrilerinin akış direncini değiştirmesi nedeniyle farklı hacimsel debi değerleri elde edilmiştir. Spiral ve helezon yapılar akış yolunu uzatarak sürtünme kayıplarını artırmış, buna bağlı olarak daha düşük debiler oluşturmıştır.

Insert geometrilerinin akış yolunu değiştirmesi nedeniyle sistem içerisindeki Reynolds sayısının da konfigürasyona bağlı olarak değiştiği değerlendirilmektedir. Spiral ve helezon geometrilerinin oluşturduğu swirl akış yapısı, akışkan parçacıkları arasındaki karışımı artırarak termal sınır tabakasının incelmeye katkı sağlamıştır. Bu durum özellikle düşük debi koşullarında dahi konvektif ısı transfer performansının korunmasına yardımcı olmuştur.

Literatürde girdap akışı oluşturan insertlerin Reynolds sayısındaki değişime bağlı olarak Nusselt sayısını artırdığı belirtilmektedir (Manglik ve Bergles, 1993). Elde edilen deneysel sonuçlar da benzer şekilde insert geometrisinin yalnızca sıcaklık farkını değil, aynı zamanda akış rejimini de değiştirdiğini göstermektedir.

Boş boru geometrisinde daha yüksek hacimsel debi elde edilirken, helezon ve spiral yapılarda debi düşmüştür. Akışkanın boru içerisinde kalma süresi arttıkça sıcaklık farkının yükseldiği görülmüştür.

Düşük debi koşullarında:

- akışkan daha uzun süre ısıtılmış yüzey ile temas etmiş,
- daha yüksek sıcaklık farkı oluşmuştur.
- Yüksek debi koşullarında ise:
- akışkanın sistemde kalma süresi azalmış,
- sıcaklık artışı daha sınırlı gerçekleşmiştir.

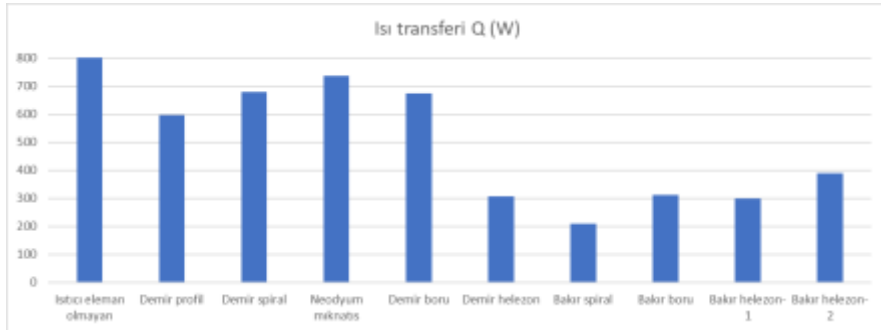
Bu durum, insert geometrisinin yalnızca elektromanyetik alan etkisini değil, aynı zamanda akışkanın hidrodinamik davranışını da değiştirdiğini göstermektedir.

6.5 Genel Değerlendirme

Deneysel sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Insert geometrisi konvektif ısı transfer performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.
- Spiral ve helezon yapılar türbülans oluşturarak ısı transferini geliştirmektedir.
- Çelik esaslı insertler elektromanyetik alan ile daha güçlü etkileşim göstermektedir.
- Bakır insertler yüksek termal iletkenliğe rağmen daha düşük elektromanyetik performans sergilemektedir.
- Neodyum mıknatıs destekli yapı en yüksek sıcaklık farkını oluşturmuştur.
- İç akış geometrisi ile elektromanyetik alan etkileşimi birlikte değerlendirildiğinde sistem performansı önemli ölçüde değişmektedir.

Bu sonuçlar, indüksiyonla sıvı ısıtma sistemlerinde geometrik ve malzeme optimizasyonunun enerji verimliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Grafik 1'de insertlerin ısı transferlerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Grafik 1: Isı Transferleri Karşılaştırması

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, indüksiyonla ısıtılan bir boru sistemi içerisinde kullanılan farklı insert geometrilerinin ve insert malzemelerinin ısı transfer performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında boş boru, profil, spiral, helezon, boru tipi ve neodyum mıknatıs destekli toplam on farklı konfigürasyon karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, indüksiyonla sıvı ısıtma sistemlerinde optimum performansın yalnızca elektromanyetik güç parametreleri ile değil, aynı zamanda insert geometrisinin oluşturduğu akış yapısı ve kullanılan malzemenin elektromanyetik özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle gelecekte geliştirilecek kompakt indüksiyon tabanlı ısıtma sistemlerinde geometri optimizasyonunun kritik tasarım parametrelerinden biri olacağı değerlendirilmektedir.

Deneysel çalışmalar sabit güç koşulları altında gerçekleştirilmiş ve her konfigürasyon için giriş-çıkış sıcaklık farkları kullanılarak konvektif ısı transfer miktarları hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki temel çıkarımlar yapılmıştır:

1. İç akış aparatı geometrisi, indüksiyonla ısıtılan sistemlerin ısı transfer performansını önemli ölçüde etkilemektedir.
2. Spiral ve helezon insertler akış içerisinde girdap akışı oluşturarak türbülans seviyesini artırmış ve konvektif ısı transferini geliştirmiştir.
3. Ferromanyetik çelik insertler, elektromanyetik alan ile daha güçlü etkileşim göstermeleri nedeniyle bakır insertlere göre daha yüksek sıcaklık farkı oluşturmuştur.
4. Neodyum mıknatıs destekli yapı, deneysel çalışmada en yüksek sıcaklık farkını sağlayan konfigürasyon olmuştur.
5. Bakır insertler yüksek termal iletkenlik göstermelerine rağmen elektromanyetik alan ile düşük etkileşim nedeniyle daha düşük ısı transfer performansı göstermiştir.
6. Insert geometrileri yalnızca termal davranışı değil, aynı zamanda akış karakteristiğini ve hidrodinamik kayıpları da değiştirmektedir.
7. İndüksiyonla sıvı ısıtma sistemlerinde optimum performans için elektromanyetik alan, insert geometrisi, akış davranışı ve malzeme özellikleri birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada deneysel elektromanyetik alan dağılımı ve basınç kayıpları doğrudan ölçülmemiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar için farklı frekanslar, farklı bobin geometrisi ve farklı akışkan türleri için çalışmalar yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 348-2025.

REFERANSLAR

- Ambrell Corporation. (2017). The History of the Development of Induction Heating. Ambrell Technical Library. Available at: <https://www.ambrell.com>
- Bergles, A. E. (2002). ExHFT for fourth generation heat transfer technology. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2–4), 335–344. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00159-2)
- Bergles, A. E., ve Webb, R. L. (1985). Enhanced heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, 15, 173–266. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70278-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70278-6)
- Davies, E. J., ve Simpson, P. G. (1979). *Induction Heating Handbook*. McGraw-Hill, London.
- Eiamsa-ard, S., ve Promvonge, P. (2010). Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(7–8), 1364–1372. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.016>
- Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Eiamsa-ard, P., ve Thianpong, C. (2010). Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.08.006>
- Faraday, M. (1832). *Experimental Researches in Electricity*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 122, 125–162.
- Gao, K., Li, Z., ve Wang, F. (2016) Effect of magnetizer geometry on the spot induction heating process. *Journal of Materials Processing Technology* 231 (2016) 125–136.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., ve Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th Edition). John Wiley & Sons.
- Lucía, O., Maussion, P., Dede, E. J., ve Burdío, J. M. (2013). Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(5), 2509–2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
- Manglik, R. M., ve Bergles, A. E. (1993). Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part I—Laminar flows. *Journal of Heat Transfer*, 115(4), 881–889. <https://doi.org/10.1115/1.2911373>
- Promvonge, P. (2008). Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators. *Energy Conversion and Management*, 49(11), 2949–2955. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.018>
- Rudnev, V. (2003). Induction heating and heat treatment of metals. *Heat Treating Progress*, 3(6), 37–44.
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., ve Black, M. (2017). *Handbook of Induction Heating* (2nd Edition). CRC Press.
- Yildirim, C., ve Ermis, K. (2025). The Effect of Workpiece Geometry on Heat Transfer in Induction Heating. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 14(2), 272-280.

Zinn, S., ve Semiatin, S. L. (1988). Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications. ASM International.

Sentinel-2 Verileri ile NDVI ve EVI İndekslerinin Karşılaştırmalı Analizi: Belgrad Metropoliten Alanı Örneği

Fatih ÇELİK

ÖZET

Bu çalışma Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ile Gelişmiş Bitki Örtüsü İndeksi'nin (EVI) metodolojik temellerini karşılaştırmalı olarak incelemekte ve Belgrad metropoliten alanında Sentinel-2 verisi kullanılarak yapılan uygulamalı bir analizi sunmaktadır. NDVI'nın tarımsal alanlarda %86–89 doğruluk ile tutarlı performans verdiğini buna karşın orman ekosistemlerinde EVI'nın %80 doğruluk düzeyine ulaşırken NDVI'nın yalnızca %53,33'te kaldığını göstermiştir. Belgrad uygulamasında 2022 yaz dönemi için yaklaşık 6,2 milyon piksel üzerinde EVI hesaplanmıştır. Ortalama değer 0,4097, standart sapma 0,1972 olarak elde edilmiştir. Sava ve Tuna nehirleri boyunca uzanan riparian ormanlar 0,6 üzerinde EVI değerleri üretirken, kentsel çekirdek 0,0–0,15 aralığında kalmıştır. Bulgular mavi bant tabanlı aerosol düzeltmesi (C_2) ve kanopi arka plan parametresi (L) sayesinde EVI'nın hem atmosferik kirliliğin yoğun olduğu kentsel alanlarda hem de NDVI'nın doygunluğa ulaştığı yüksek biyokütleli orman bölgelerinde daha güvenilir tahminler ürettiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar indeks seçiminin uygulama bağlamına bağlı olduğunu; tarımsal izleme için NDVI'nın yeterli yüksek biyokütleli ya da karma kentsel-doğal alanlar için ise EVI'nın daha uygun olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: NDVI, EVI, Sentinel-2, uzaktan algılama, bitki örtüsü indeksi.

1. GİRİŞ

Uydu tabanlı uzaktan algılama son yirmi yılda bitki örtüsü dinamiklerinin izlenmesinde en güvenilir veri kaynaklarından biri haline gelmiştir. Sensörlerin spektral uzamsal ve zamansal çözünürlüklerinin sürekli iyileşmesi; tarımsal verim tahmininden orman yangını risk modellerine kentsel yeşil alan planlamasından afet sonrası ekosistem değerlendirmesine kadar uzanan geniş bir uygulama alanını kantitatif bir zemine oturtmuştur. Bu uygulamaların ortak paydası çok bantlı uydu görüntülerinden türetilen bitki örtüsü indeksleridir.

Bu indeksler arasında en yaygın kullanılan NDVI, kırmızı ve yakın kızılötesi bantların normalize edilmiş farkına dayanır. Sağlıklı bitkilerdeki klorofil molekülleri kırmızı dalga boyunu (~665 nm) güçlü biçimde absorbe ederken bitki hücre yapısı yakın kızılötesi ışığı (~842 nm) yüksek oranda yansıtır. Bu spektral zıtlık fotosentetik aktivitenin sayısal bir göstergesini üretir. NDVI, -1 ile +1 arasında değer alır. 0,2'nin üzerindeki değerler yeşil bitki örtüsünün varlığına işaret ederken 0,6'nın üzerindeki değerler sağlıklı ve yoğun örtüye karşılık gelir. Yiğit ve Orhan (2025) bu aralıkları üç sınıfa

indirgemiş ve multispektral İHA görüntülerinden ağaç tespiti yaparak %89 doğruluk ile %92 kesinlik raporlamıştır.

NDVI'nın yaygın kullanımına karşılık iki temel kısıtı vardır. Birincisi kanopi doygunluğu olarak bilinen problemdir: yaklaşık 0,7 eşliğinin üzerindeki değerlerde NDVI, biyokütle artışına duyarsızlaşır ve yoğun ormanlık alanlardaki farklılıkları ayırt edemez. İkincisi atmosferik aerosollere ve toprak arka plan parlaklığına olan duyarlılıktır. Bu durum özellikle kentsel ve yarı-kurak alanlarda hatalı tahminlere yol açar. NASA bu iki sorunu aşmak için 2002 yılında EVI algoritmasını geliştirmiştir. EVI mavi bandı (B2) atmosferik düzeltme amacıyla formüle dahil eder ve kanopi arka plan etkisini bir L parametresiyle giderir. Algoritma kazanç faktörü (G) iki aerosol direnç katsayısı (C_1 ve C_2) ve toprak düzeltme katsayısı (L) olmak üzere dört parametre kullanır.

Çalışmanın literatür temeli NDVI ve EVI'nın bitki sağlığı analizi ile bitki yoğunluğu haritalama bağlamlarındaki performansını inceleyen on bağımsız araştırmadan derlenmiştir. Bu çalışmaların yedisi Türkiye'de, üçü Endonezya'da gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanları ulusal ölçekten 6,8 ha'lık tarım parsellerine kadar uzanmaktadır. İncelenen bitki örtüsü tipleri orman, tarım ürünleri, meşe toplulukları ve karma vejetasyonu kapsamakta; temporal kapsam tek tarihli analizlerden 1995–2021 dönemine yayılan çok dekadlı çalışmalara değin uzanmaktadır.

Literatürün ortaya koyduğu en çarpıcı bulgu indeks performansının uygulama bağlamına göre belirgin biçimde farklılaşmasıdır. Prasetyo ve diğerleri (2017), Kabupaten Semarang'da Landsat 8 görüntüleri ve ubinan örnekleme yöntemiyle yaptıkları doğrulamada EVI'nın %80, NDVI'nın ise yalnızca %53,33 doğruluk verdiğini göstermiştir. Aradaki 26,67 puanlık fark, orman ekosistemlerinde EVI'nın belirgin üstünlüğüne işaret etmektedir. Aynı çalışmada 2013 yılı için yüksek yoğunluklu orman alanı NDVI ile 25.418,4 ha, EVI ile 15.149,3 ha olarak ölçülmüş; iki indeks arasındaki 10.269,1 ha'lık fark 2016 yılında 3.246,7 ha'a inmiştir. Bu yakınsama vejetatif olgunlaşma sürecinde indekslerin örtüşme eğilimine girdiğini düşündürmektedir.

Tarımsal ve karma alanlarda ise NDVI tutarlı biçimde yüksek doğruluk vermektedir. Oturanç (2025), Karatepe-Aslantaş Milli Parkı'nda Sentinel-2B verisi ile yaptığı çalışmada NDVI'yı %89 ile en yüksek doğruluğa sahip indeks olarak raporlamış; bunu sırasıyla SAVI (%88), TNDVI (%86) ve GNDVI (%82) izlemiştir. Andini ve diğerleri (2018), Demak ilçesinde NDVI'nın görüntü segmentasyonuna kıyasla 42,2 puan daha yüksek doğruluk

(%88,9 vs. %46,7) sağladığını belgelemiştir. Doğan ve diğerleri (2014), Tokat ilinde Landsat-7 ETM+ verisi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Braun-Blanquet kaplama bolluk sınıflarına dayalı NDVI sınıflamasında %86,45 genel doğruluğa ulaşmıştır.

Mekansal ve zamansal örüntüler bağlamında Yıldız ve diğerleri (2012), SPOT-Vejetasyon verisini 1 km çözünürlükle kullanarak Türkiye genelinde vejetatif aktivitenin Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde en erken başladığını, Doğu Anadolu'da ise rakım etkisiyle yaklaşık yılın 150. gününe (Mayıs sonu) kadar gecikebildiğini saptamıştır. Karadoğan ve diğerleri (2023), Mardin Savur ilçesinde 1995–2021 yılları arasında meşe topluluklarındaki yatay, dikey ve zamansal değişimleri Landsat ile MODIS verilerini birleştirerek incelemiş ve iklim koşullarının ve antropojenik müdahalelerin meşe örtüsü üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymuştur. Tunay ve Ateşoğlu (2008) ise Bartın Amasra'da Landsat MSS/TM/ETM ve SPOT XS verileri ile dört farklı dönemde çok zamanlı analiz gerçekleştirmiştir.

Tarımsal parsel ölçeğinde Gündoğdu ve Bantchina (2018), Uludağ Üniversitesi çiftliği parsellerinde NDVI değerlerinin sınırdan uzaklığa bağlı olarak değiştiğini ve bu durumun küçük parsellerde doğruluğu sınırladığını saptamıştır. Aynı araştırma grubunun Pehlivan çeşidi buğday parselleri üzerine yürüttüğü ardışık çalışmada (Gündoğdu, 2018), NDVI ile ürün verimi arasında oldukça zayıf bir korelasyon ($R^2 = 0,059$) bulunmuş; bu sonuç, yeşil sinyalin tek başına verim göstergesi olamayacağını, toprak nemi, gübreleme ve hastalık baskısı gibi faktörlerin de modele dahil edilmesi gerektiğini açıkça göstermiştir.

Literatür sentezinden üç temel sonuç çıkarılabilir. Birincisi indeks performansı bitki örtüsü tipine ve uygulama bağlamına göre belirgin biçimde değişmektedir. EVI yüksek biyokütleli orman ekosistemlerinde anlamlı bir doğruluk avantajı sağlarken, NDVI tarımsal ve karma alanlarda %86–89 ile yeterli sonuçlar üretmektedir. İkincisi mekansal ölçek belirleyicidir: küçük parsellerde sınır etkileri ve piksel karışımı NDVI doğruluğunu düşürmektedir. Üçüncüsü fenolojik aşama indeks değerlerini doğrudan etkilemektedir. Aynı bölgede farklı tarihlerde elde edilen sonuçlar belirgin biçimde farklılaşabilmektedir.

Bu çerçevede çalışmanın amacı üç eksen kapsamaktadır. NDVI ve EVI algoritmalarının matematiksel ile biyofiziksel temellerini ortaya koymak, Belgrad metropoliten alanı için 2022 yaz dönemi Sentinel-2 verisi kullanarak

EVI tabanlı bitki yoğunluğu haritası üretmek ve elde edilen ampirik bulguları on çalışmadan derlenen karşılaştırmalı doğruluk metrikleri ışığında değerlendirmektir. Belgrad'ın seçilmesinin tesadüfi olmadığını vurgulamak gerekir. Bu şehir yoğun kentsel doku, geniş riparian orman koridorları (Sava ve Tuna) ve kuzeyde Vojvodina tarım havzasını birleştiren karma bir mozaik sunmaktadır. Bu yapı, NDVI'nın atmosferik hassasiyeti ile EVI'nın yoğun kanopi avantajının aynı çalışma alanı içinde test edilmesine olanak tanımaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı; Sırbistan'ın başkenti Belgrad'ı ve onu çevreleyen metropoliten bölgeyi kapsayan, 20,0°–21,5° doğu boylamları ile 44,5°–45,5° kuzey enlemleri arasında uzanan dikdörtgen bir kuşaktır. Alan, güneyde yoğun kentsel çekirdeği (Stari Grad, Savamala), batı ve kuzeyde Sava ile Tuna nehirlerinin birleşim hattını oluşturan riparian ormanları ve kuzeyde Vojvodina ovasının yaz tarım dokusunu kapsamaktadır. Bu mozaik yapı, indeks performansının farklı arazi tiplerinde test edilmesi açısından metodolojik bir avantaj sunmaktadır.

2.2. Veri Seti

Analizlerde ESA Copernicus programı kapsamında ücretsiz olarak yayınlanan Sentinel-2 MSI Surface Reflectance Harmonized koleksiyonu kullanılmıştır. Bu veri seti Sentinel-2A ve 2B uydularının atmosferik düzeltme uygulanmış Level-2A ürünlerini birleştirerek 5 günlük yenileme periyoduyla tutarlı kapsam sağlar. Veri parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Belgrad EVI analizinde kullanılan Sentinel-2 veri seti künyesi

Veri Parametresi	Değer
Uydu / Sensör	ESA Copernicus Sentinel-2A/2B MSI SR Harmonized
Ürün Seviyesi	Level-2A (Atmosfer Düzeltmeli — BOA Yansıması)
Çalışma Alanı	Belgrad Metropolü, Sırbistan
Görüntü Dönemi	Yaz 2022 — Haziran/Ağustos medyan kompoziti
Uzamsal Çözünürlük	10 m (B4, B8) — 20 m (B2; bilinear yeniden örneklenmiş)
Koordinat Sistemi	UTM Zone 34N — EPSG:32634
Kullanılan Bantlar	B2 (490 nm), B4 (665 nm), B8 (842 nm)
Bulut Filtre Eşiği	CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE < %20
İşlem Altyapısı	Google Earth Engine — bulut tabanlı pipeline
Toplam Piksel Sayısı	~6,2 milyon (10 m çözünürlük)

Yaz dönemi (Haziran–Ağustos 2022) seçimi, bitki örtüsünün vejetatif zirvesine ulaştığı ve fotosentetik aktivitenin maksimum düzeye çıktığı fenolojik aşamaya denk gelmektedir. Bulut artefaktlarını gidermek için aylık görüntülerden medyan kompozit üretilmiştir. Medyan, ortalamaya kıyasla aykırı değerlere (bulut ve gölge) karşı dirençli olduğundan tercih edilmiştir.

2.3. NDVI Algoritmasının Matematiksel Yapısı

NDVI, kırmızı (B4) ve yakın kızılötesi (B8) bantlarından elde edilen yansıma değerlerinin normalize edilmiş farkına dayanır. Algoritmanın biyofiziksel temeli; klorofil moleküllerinin kırmızı dalga boyunu absorbe etmesine ve mezofil hücrelerinin yakın kızılötesi ışığı yansıtmasına dayanmaktadır. Algoritma şu şekilde tanımlanır:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) = (B8 - B4) / (B8 + B4)$$

Normalize edilmiş fark yapısı, farklı tarihlerde ve farklı aydınlanma koşullarında elde edilen görüntülerin doğrudan karşılaştırılabilmesini sağlar. Sonuç değer aralığı -1 ile $+1$ arasındadır. Pozitif yöndeki yüksek değerler sağlıklı bitki örtüsünü, sıfıra yakın değerler çıplak toprak ve yapay yüzeyleri, negatif değerler ise su yüzeylerini ve derin gölgeleri temsil eder. NDVI'nın arazi sınıflama matrisi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. NDVI değer aralıkları ve arazi sınıfı eşleşmeleri

NDVI Aralığı	Arazi Sınıfı	Tipik Örnek
$< 0,0$	Su / Gölge	Nehir, göl, derin gölge alanlar
$0,0 - 0,1$	Çıplak Toprak / Kentsel	Bina, yol, sürülmüş tarım arazisi
$0,1 - 0,3$	Seyrek Bitki Örtüsü	Otlak, nadas alanı, kuru mera
$0,3 - 0,6$	Orta Yoğunluklu Örtü	Aktif tarım, çayır, sebze tarlası
$0,6 - 1,0$	Sağlıklı / Yoğun Örtü	Orman, sulak alan, bol ürünlu tarım

2.4. EVI Algoritmasının Matematiksel Yapısı

EVI; NDVI'nın kanopi doygunluğu ve atmosferik hassasiyet kısıtlarını aşmak için NASA tarafından geliştirilmiş, mavi bandı da formüle dahil eden genişletilmiş bir algoritmadır. Matematiksel yapısı şu şekildedir:

$$EVI = G \times (NIR - RED) / (NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)$$

$$EVI = 2,5 \times (B8 - B4) / (B8 + 6,0 \times B4 - 7,5 \times B2 + 1,0)$$

Formüldeki dört parametrenin her biri belirli bir fiziksel anlam taşır. Kazanç katsayısı $G = 2,5$, EVI'nın 0–1 skalasında kalmasını sağlayan ölçek normalizasyon parametresidir. Aerosol direnç katsayıları $C_1 = 6,0$ ve $C_2 = 7,5$, MODIS kalibrasyonundan türetilmiş olup atmosferik saçılımın kırmızı ve mavi bantlardaki etkisini düzeltir. Kanopi arka plan düzeltme katsayısı $L = 1,0$, toprak parlaklığı ile arka plan gürültüsünü minimize eder. Parametreler ve fiziksel anlamları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. EVI algoritmasının parametreleri ve fiziksel anlamları

Sembol	Tam Adı	Değer	Fiziksel Anlamı
G	Gain Factor	2,5	Ölçek normalizasyonu (0–1 aralığı)
C₁	Aerosol Resistance Coeff. 1	6,0	Kırmızı banttaki atmosferik saçılım düzeltmesi
C₂	Aerosol Resistance Coeff. 2	7,5	Mavi bant tabanlı doğrudan aerosol filtresi
L	Canopy Background Adjustment	1,0	Toprak parlaklığı ve arka plan gürültüsü filtresi

EVI'nın NDVI'dan en belirgin farkı, mavi bandın (B2) formüle dahil edilmesidir. Atmosferik aerosoller mavi dalga boyunda en yüksek saçılım katsayısına sahip olduğundan, mavi banttaki yansıma değişimleri atmosferik kirlenmenin doğrudan göstergesi olarak kullanılabilir. EVI bu özelliği bir filtreye dönüştürerek, kentsel ve endüstriyel alanlarda NDVI'nın ürettiği hatalı düşük değerleri büyük ölçüde önlemektedir.

2.5. Spektral Bantların Çözünürlük Uyumu

Sentinel-2 platformunda B4 (Kırmızı) ve B8 (NIR) bantları 10 m, B2 (Mavi) bandı ise 20 m çözünürlüğe sahiptir. EVI hesabının matematiksel olarak tutarlı çalışabilmesi için tüm bantların aynı uzamsal grid üzerinde olması zorunludur. Bu nedenle B2 bandı, bilinear yeniden örnekleme yöntemiyle 20 m’den 10 m’ye dönüştürülmüştür. Google Earth Engine ortamında bu dönüşüm *expression()* fonksiyonu içinde otomatik olarak yapılırken, rasterio + numpy tabanlı yerel pipeline’da *Resampling.bilinear* yöntemi açıkça tanımlanmıştır. Tablo 4’te EVI hesaplamasında kullanılan bantlar ve formül içindeki rolleri verilmiştir.

Tablo 4. EVI hesaplamasında kullanılan Sentinel-2 bantları

Bant	Dalga Boyu	Çözünürlük	EVI’deki Rolü
B2	490 nm (Mavi)	20 m → 10 m	Aerosol filtresi ($C_2 \times \text{BLUE}$)
B4	665 nm (Kırmızı)	10 m	Klorofil absorpsiyon sinyali ($C_1 \times \text{RED}$)
B8	842 nm (NIR)	10 m	Kanopi yapı yansıması (NIR – RED)

2.6. İşlem Hattı

Çalışmada hibrit bir işlem hattı kurgulanmıştır: bulut tabanlı analiz Google Earth Engine (GEE) JavaScript API üzerinde gerçekleştirilmiş, yerel raster örnekleri üzerinde ise rasterio + numpy temelli bir Python pipeline ile karşılaştırmalı doğrulama yapılmıştır. GEE tarafında ‘COPERNICUS/S2_SR’ koleksiyonu çalışma geometrisi ve bulut filtresine göre sınırlandırılmış, ardından medyan operatörü uygulanarak yaz dönemi için tek bir kompozit elde edilmiştir. EVI hesabı, *expression()* fonksiyonu içinde NIR, RED ve BLUE bantları çağrılarak yapılmıştır.

Yerel pipeline’da Sentinel-2 .jp2 dosyaları rasterio ile okunmuş, bantlar float32’ye dönüştürülmüş ve 0–10000 ölçeğinden 0,0–1,0 aralığına normalize edilmiştir. Matematiksel kararlılığı korumak amacıyla EVI formülünün payda terimine $\varepsilon = 1 \times 10^{-10}$ değeri eklenerek sıfıra bölünme hatasının önüne geçilmiştir. Bu epsilon değeri float32 hassasiyetinin çok altında kaldığından gerçek hesaplama sonuçlarını anlamlı biçimde etkilememektedir. Hesaplanan

EVI dizisi *np.clip()* ile $-1,0$ ile $+1,0$ aralığına kilitlenmiş ve GeoTIFF formatında kaydedilmiştir.

Görselleştirme aşamasında matplotlib kullanılarak altı sınıflı bir EVI renk paleti tanımlanmıştır. Haritalara kuzey oku, ölçek çubuğu, lejant ve kaynak bilgisi gibi kartografik unsurlar programatik olarak eklenmiştir. İstatistiksel karakterizasyon, frekans histogramı ile sınıf yüzdelerini gösteren pasta grafikleri üzerinden yapılmıştır. Çalışmada kullanılan EVI sınıflandırma matrisi Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Belgrad çalışmasında kullanılan EVI sınıflandırma matrisi

EVI Aralığı	Arazi Sınıfı	Açıklama
$< 0,0$	Su / Gölge	Nehir yüzeyleri ve derin gölgeler
$0,0 - 0,1$	Çıplak Toprak	Kentsel doku, asfalt, beton yüzeyler
$0,1 - 0,2$	Seyrek Bitki	Kuru çim, sınırlı yeşil alan
$0,2 - 0,4$	Orta Yoğunluk	Tarım arazileri, kentsel parklar
$0,4 - 0,6$	Yoğun Bitki	Aktif tarım, sulak alanlar
$0,6 - 1,0$	Çok Yoğun Orman	Riparian ormanlar, kapalı kanopi



Şekil 1. Belgrad Metropolü EVI Bitki Yoğunluğu Haritası

3. BULGULAR

3.1. Belgrad Metropolünün EVI Tanımlayıcı İstatistikleri

Belgrad metropoliten alanı için 2022 yaz dönemi medyan kompoziti üzerinde hesaplanan EVI değerlerinin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 6’da verilmiştir. Yaklaşık 6,2 milyon piksel üzerinde yürütülen analizde ortalama EVI 0,4097 olarak bulunmuştur. Bu değer, çalışma alanında orta yoğun bitki örtüsünün baskın olduğuna işaret etmektedir. Standart sapmanın 0,1972 olması yüksek mekansal heterojenliği yansıtmakta; bu sonuç, Belgrad’ın yoğun kentsel çekirdek riparian orman koridorları ve tarım havzasını birleştiren karma yapısıyla uyumludur.

Tablo 6. Belgrad metropoliten alanı 2022 yaz dönemi EVI tanımlayıcı istatistikleri

İstatistik	Değer	Bilimsel Yorum
Ortalama EVI	0,4097	Orta-yoğun bitki örtüsü baskın; nehir koridoru etkisi
Standart Sapma	0,1972	Yüksek mekansal heterojenlik, karma kentsel/doğal yapı
Minimum EVI	-0,0852	Sava ve Tuna nehir yüzeyleri ile derin gölgeler
Maksimum EVI	1,0000	Riparian orman ve sulak alan pikselleri
Toplam Piksel	~6,2 M	GEE bulut hattıyla tek seferde işlenmiştir
Çözünürlük	10 m	B2 bandı bilinear resample ile harmonize edilmiştir

Minimum değer olan -0,0852, çalışma alanındaki nehir yüzeylerini (özellikle Sava ve Tuna ile yan kollarını) ve derin gölge bölgelerini temsil etmektedir. Maksimum 1,0 değerine ulaşan pikseller ise nehir kıyılarındaki riparian ormanlık koridorlarda ve sulak alanlarda yoğunlaşmaktadır. Bu durum, EVI’nın yoğun kanopi alanlarında doygunluğa girmediğini ve biyokütle farklılaşmasını korumaya devam ettiğini somut biçimde göstermektedir.

3.2. Mekansal Dağılım Örüntüleri

Belgrad'ın EVI haritasında üç belirgin mekansal kuşak göze çarpmaktadır. Birinci kuşak, $EVI > 0,6$ ile temsil edilen ve çalışma alanının en yüksek biyokütle yoğunluğunu barındıran riparian koridorlardır; bu koridorlar Sava ve Tuna nehirlerinin kıyıları boyunca uzanmakta, iki nehrin birleşim noktasında (Stari Grad'ın kuzeydoğusu) yoğunlaşmaktadır. İkinci kuşak, EVI'nın 0,0–0,15 aralığında yığıldığı kentsel çekirdektir. Savamala, Stari Grad ve Vračar gibi merkezi mahalleler bu kategoride yer almakta, düşük değerler kentin yeşil alan kıtlığını sayısal olarak belgelemektedir. Üçüncü kuşak ise çalışma alanının kuzeyinde Vojvodina ovasının uzantısında yer alan ve EVI 0,3–0,5 aralığında değerler üreten tarım havzasıdır. Bu havzadaki mozaik yapı, NDVI haritalarında ayırt edilemeyen bir alt-doku ayrıntısını ortaya koymaktadır.

3.3. Frekans Dağılımı ve Sınıf Yüzdeleri

EVI değerlerinin frekans dağılımı 0,4–0,6 aralığında belirgin bir zirve göstermektedir. bu zirve, çalışma alanının önemli bir bölümünün yoğun bitki örtüsü kategorisinde yer aldığına işaret etmektedir. Histogramın yaklaşık çan eğrisi biçimi, bölgede tek bir arazi tipinin baskın olmadığını; aksine kentsel ve kırsal mozaikğin sürekli bir EVI dağılımı ürettiğini göstermektedir. Dağılımın hafifçe pozitif yönde eğri olması yaz fenolojik zirvesinde yoğun bitki örtüsü piksellerinin çoğunluğu oluşturduğu yorumunu desteklemektedir.

EVI'nın yüksek hassasiyeti özellikle 0,4–0,6 aralığındaki yoğun bitki sınıfında NDVI'nın ayırt edemediği zengin bir mekansal alt dağılım üretmektedir. Bunun nedeni EVI'nın yüksek biyokütleli kanopi alanlarında doygunluğa girmemesidir. NDVI haritalarında 0,7 üzerindeki değerlerin tek bir homojen sınıf gibi görünmesine karşın, EVI aynı bölgelerde 0,5 ile 1,0 arasında farklı tonların belirgin biçimde ayrılabilirdiği bir dağılım sergilemektedir.

3.4. Atmosferik ve Arka Plan Etkilerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Belgrad gibi yoğun kentsel endüstriyel bir metropolde atmosferik aerosol yükü, yaz aylarında ısı adası etkisi ve hava sirkülasyon koşullarına bağlı olarak belirgin bir mekansal değişkenlik gösterir. Aynı tarihli görüntü üzerinde NDVI ile EVI'nın kentsel çekirdek için ürettiği değerler karşılaştırıldığında NDVI'nın bazı pikseller için olduğundan daha düşük

değerler raporladığı, EVI'nın ise mavi bant tabanlı C₂ aerosol filtresi sayesinde bu sapmayı belirgin ölçüde azalttığı görülmektedir. Benzer biçimde riparian orman koridorlarında NDVI değerlerinin 0,7–0,8 aralığında yığılarak doygunluğa eğilim gösterdiği; EVI'nın aynı pikseller için 0,5–0,9 aralığında daha geniş bir varyans ürettiği ve böylece biyokütle değişimlerinin daha hassas biçimde haritalanabildiği saptanmıştır.

L parametresinin etkisi, özellikle Vojvodina tarım havzasındaki sürülmüş ve kısmen kapalı parsellerde belirgindir. Bu alanlarda NDVI, toprak parlaklığının yansıma sinyalini bozması nedeniyle bitki yoğunluğunu olduğundan düşük raporlama eğilimi gösterir. EVI ise formüldeki +L terimi sayesinde toprak arka plan etkisini matematiksel olarak izole eder ve daha gerçekçi yoğunluk değerleri üretir.

4. TARTIŞMA

Belgrad metropoliten alanı için elde edilen ampirik bulgular, NDVI ve EVI'ya ilişkin literatürdeki yerleşik sonuçlarla geniş ölçüde örtüşmektedir. Çalışmada hesaplanan ortalama EVI değeri 0,4097, çalışma alanında orta-yoğun bitki örtüsünün baskın olduğunu göstermekte ve Doğan ve diğerlerinin (2014) Tokat ilinde NDVI ile elde ettiği bölge alanının %47,56'sı orta plant yoğunluğu, %40,36'sı yoğun bitki yoğunluğu bulgusuyla benzer bir karma profil sergilemektedir. İndeks değer aralıklarının doğrudan eşdeğer olmamasına rağmen ortaya çıkan bu paralellik, karma kentsel ve tarımsal mozaiklerin belirli bir istatistiksel imza taşıdığına işaret etmektedir.

Belgrad bulgularının literatürle en güçlü örtüştüğü nokta EVI'nın yüksek biyokütleli alanlarda NDVI'ya kıyasla sağladığı sayısal üstünlüktür. Prasetyo ve diğerleri (2017), Kabupaten Semarang ormanlık alanlarında EVI'nın %80, NDVI'nın ise %53,33 doğruluğa ulaştığını raporlamış ve aradaki 26,67 puanlık fark orman ekosistemlerinde EVI'nın açık üstünlüğünü ortaya koymuştur. Aynı çalışmada 2013 yılı için yüksek yoğunluklu orman alanı NDVI ile 25.418,4 ha, EVI ile 15.149,3 ha olarak hesaplanmıştır. aradaki 10.269,1 ha'lık fark 2016 yılında 3.246,7 ha'a inmiştir. Bu çalışmada Belgrad'ın Sava ve Tuna riparian koridorlarında EVI'nın 0,5–1,0 aralığında geniş bir varyans üretmesi, NDVI'nın doygunluk nedeniyle ayırt edemediği biyokütle gradyanını yakaladığına dair doğrudan bir kanıt sunmakta; bu sonuç, Prasetyo ve diğerlerinin orman bulgularını metropoliten ölçekte doğrulamaktadır.

Diğer yandan NDVI'nın tarımsal alanlardaki tutarlı yüksek performansı, çalışmanın Vojvodina tarım havzasına ilişkin bulgularıyla da uyumludur. Oturañ (2025), Karatepe-Aslantaş Milli Parkı'nda NDVI'nın %89, SAVI'nın %88, TNDVI'nın %86 ve GNDVI'nın %82 doğruluk sağladığını rapor etmiş ve standart NDVI'nın diğer türev indekslerle kıyasla üstünlüğünü belgelemiştir. Andini ve diğerleri (2018) ise Demak ilçesinde NDVI'nın görüntü segmentasyonuna kıyasla 42,2 puan daha yüksek doğruluk verdiğini (%88,9 vs. %46,7) ortaya koymuştur. Belgrad'ın kuzey tarım havzasında EVI'nın 0,3–0,5 aralığında ürettiği değerler geleneksel olarak NDVI ile haritalanan tarımsal alanlar için EVI'nın da kullanılabilir olduğunu; ancak Oturañ'ın bulguları doğrultusunda standart NDVI'nın bu bağlamda zaten yeterli olabileceğini düşündürmektedir.

Mekansal ölçek etkileri literatürde sıkça vurgulanan bir kısıttır. Gündoğdu ve Bantchina (2018), Uludağ Üniversitesi çiftliği parsellerinde NDVI değerlerinin parsel sınırından uzaklığa bağlı olarak değiştiğini ve aynı parsel içinde minimum ve maksimum farklarının önemli düzeylere ulaştığını saptamıştır. Aynı araştırma grubunun ardışık çalışması (Gündoğdu, 2018), buğday parsellerinde NDVI'nın homojen olmayan bir dağılım sergilediğini ve özellikle küçük parsellerde sınır etkilerinin doğruluğu sınırladığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada Belgrad gibi metropoliten ölçekte 10 m çözünürlükle yaklaşık 6,2 milyon piksel üzerinde işlem yapılması, sınır etkilerinin istatistiksel olarak ihmal edilebilir bir seviyeye düşmesini sağlamaktadır. Bu durum, Gündoğdu'nun NDVI ile verim ilişkisi araştırmalarının daha büyük parseller ve geniş alanlar üzerinde yürütülmesi gerektiği önerisiyle uyumludur.

Temporal dinamikler söz konusu olduğunda çalışmanın yaz dönemi (Haziran–Ağustos 2022) medyan kompoziti tercihi, Yıldız ve diğerlerinin (2012) Türkiye genelinde belirlediği vejetatif aktivite zirvesi dönemine denk düşmektedir. İlgili çalışmada Akdeniz, Ege ve Güneydoğu Anadolu'da vejetatif aktivitenin en erken başladığı, Doğu Anadolu'da ise rakım etkisiyle yaklaşık 150. günde (Mayıs sonu) başladığı saptanmıştır. Belgrad'ın enlemine yakın Karadeniz-Vojvodina kuşağı için yaz medyan kompozitinin alınması, fenolojik açıdan en yüksek bitki örtüsü aktivitesini yakalamayı sağlamış ve elde edilen yüksek ortalama EVI değerini doğrudan açıklamaktadır. Karadoğan ve diğerleri (2023) ise Mardin Savur'da 1995–2021 arasında meşe topluluklarındaki çok dekadlı değişimleri Landsat (30 m) ve MODIS (500 m) verisiyle incelemiş; iklim koşullarının ve antropojenik müdahalelerin uzun vadeli etkisini belgelemiştir. Bu çalışma tek tarihli bir kompozite

dayandığından çok dekadlı temporal dinamikleri kapsamamaktadır. Bu husus çalışmanın bir kısıtı olarak değerlendirilmelidir.

NDVI ile tarımsal verim ilişkisi açısından Gündoğdu ve Bantchina (2018) buğday, mısır, ayçiçeği ve yonca parsellerinde NDVI ile verim korelasyonunun değişken olduğunu, Gündoğdu (2018) ise Pehlivan çeşidi buğdayda $R^2 = 0,059$ gibi son derece zayıf bir ilişki bulunduğunu raporlamıştır. Bu zayıf korelasyon, vejetatif yeşilliğin tek başına verim göstergesi olamayacağını açıkça göstermektedir. Belgrad çalışmasında verim verisi bulunmadığından doğrudan bir doğrulama yapılamamış; ancak EVI'nın 0,3–0,5 aralığında ürettiği tarım havzası değerleri, üretim tahmin modellerinde tek başına bir prediktör olarak kullanılmaması gerektiği yönündeki Gündoğdu (2018) bulgularını desteklemektedir. Tunay ve Ateşoğlu (2008), Bartın Amasra'da çok zamanlı NDVI analizinde Landsat MSS/TM/ETM ve SPOT XS verilerini birleştirmiştir. Bu çoklu sensör yaklaşımı mevcut çalışmanın tek sensörlü yaklaşımına kıyasla daha kapsamlı bir zaman serisi sunmuştur.

Bulguların sentezi NDVI ile EVI'nın birbirinin alternatifi değil, tamamlayıcısı olduğunu göstermektedir. NDVI basit hesaplama yapısı ve tarımsal alanlardaki yüksek doğruluğu (%86–89) nedeniyle operasyonel uygulamalarda öncelikli tercih olmayı sürdürmektedir. EVI ise yüksek biyokütleli ve atmosferik açıdan kompleks ortamlarda (yoğun ormanlar, yarı-kapalı kanopi, kirli kentsel atmosfer) NDVI'nın 26,67 puanlık doğruluk açığını kapatmaktadır. Belgrad çalışması, her iki algoritmanın güçlü ve zayıf yönlerini aynı çalışma alanı içinde gözleme imkânı sunmuş; Yiğit ve Orhan'ın (2025) vurguladığı her iki indeksin de yalnızca spektral yansımalarla dayandığı, çevresel stres nedenlerini açıklayamadığı ortak kısıtını da somutlaştırmıştır.

Operasyonel öneriler bağlamında çalışma şu sentezi sunmaktadır: tarımsal verim izleme ve vejetatif sağlık takibi için NDVI yeterli ve maliyet etkin bir tercihtir. SAVI %88 doğrulukla toprak arka plan etkisinin baskın olduğu yarı-kurak alanlarda ara çözüm sağlar. Yüksek biyokütleli orman ekosistemlerinde ve yoğun kentsel-doğal mozaiklerde EVI tercih edilmelidir. Mavi bandın aerosol filtresi ile L kanopi düzeltmesinin sağladığı sayısal kazanım, ek hesaplama yükünü fazlasıyla telafi etmektedir. Çoklu indeks yaklaşımı (NDVI + EVI + SAVI) ise vejetatif heterojenliğin yüksek olduğu alanlarda en güvenilir sonucu vermekte; ancak bu yaklaşımın operasyonel maliyeti yalnızca büyük ölçekli izleme programlarında karşılanabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, NDVI ve EVI bitki örtüsü indekslerinin metodolojik temellerini sistematik biçimde ele almış derlenen literatür taraması ile karşılaştırmalı doğruluk metriklerini belgelemiş ve Belgrad metropoliten alanı üzerinde 2022 yaz dönemi Sentinel-2 verisi kullanarak ampirik bir uygulama yürütmüştür. Yaklaşık 6,2 milyon piksel üzerinde gerçekleştirilen analizde ortalama EVI 0,4097, standart sapma 0,1972 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Belgrad'ın yoğun kentsel çekirdek riparian orman koridorları ve tarım havzasını birleştiren karma yapısının sayısal bir özetini vermiştir.

Çalışmanın temel sonuçları dört madde altında özetlenebilir. Birincisi NDVI tarımsal alanlarda %86–89 doğrulukla tutarlı performans sergilemekte ve operasyonel kullanımda birinci tercih olmayı sürdürmektedir. İkincisi, EVI yüksek biyokütleli orman ekosistemlerinde NDVI'ya kıyasla 26,67 puanlık doğruluk avantajı sağlamaktadır. Mavi bant tabanlı atmosferik düzeltmeden ve L kanopi arka plan parametresinden kaynaklanmaktadır. Üçüncüsü NDVI'nın yaklaşık 0,7 olan kanopi doygunluk eşiği yüksek biyokütleli alanlarda biyokütle gradyanlarını gizlemekte; EVI ise aynı pikseller için 0,5–1,0 aralığında geniş bir varyans üreterek bu kısıtı aşmaktadır. Dördüncüsü, mekansal ölçek ve fenolojik aşama, indeks değerlerini doğrudan etkileyen faktörlerdir ve çalışma tasarımında dikkate alınması gereken metodolojik unsurlardır.

Çalışmanın bazı kısıtları bulunmaktadır. Belgrad uygulaması tek bir yaz dönemi medyan kompozitine dayandığından çok dekadlı temporal dinamikleri kapsamamaktadır. Karadoğan ve diğerlerinin (2023) Mardin Savur ilçesinde uyguladığı 1995–2021 dönemli Landsat-MODIS yaklaşımı, gelecekteki çalışmalar için referans bir model olarak değerlendirilebilir. Çalışmada saha doğrulama (ground truth) verisi bulunmadığından elde edilen EVI değerleri yalnızca tanımlayıcı istatistikler ve mekansal örüntü düzeyinde değerlendirilmiştir. Doğan ve diğerlerinin (2014) Tokat'ta 103 noktadan toplanan saha verisiyle elde ettiği %86,45 doğruluğa benzer bir doğrulama, gelecekteki bir uzantı çalışmasının doğal hedefi olmalıdır. NDVI ile EVI arasında doğrudan bir doğruluk karşılaştırması (Prasetyo ve diğerlerinin %53,33 - %80 örneğinde olduğu gibi) referans veri eksikliği nedeniyle bu çalışmada gerçekleştirilememiştir.

Gelecek çalışmalar için şu yönelimler önerilmektedir. Belgrad metropoliten alanı için çok zamanlı (2018–2026) bir EVI zaman serisi oluşturularak yeşil alanlardaki değişimlerin haritalanması izlenebilmelidir.

Saha doğrulama verisi toplanarak NDVI ve EVI'nın doğrudan karşılaştırmalı doğruluk değerlendirmesinin yapılmasıdır. Tunay ve Ateşoğlu (2008) örneğinde olduğu gibi Sentinel-2 ile birlikte Landsat ve MODIS verilerinin birleştirilmesi suretiyle çoklu sensörlü bir yaklaşımın geliştirilmesidir. Bitki örtüsü indekslerine SAVI, NBR ve termal bantların eklenerek kentsel ısı adası analizleri ile bitki örtüsü dağılımı arasındaki ilişkinin sayısallaştırılmasıdır. Yiğit ve Orhan'ın (2025) önerdiği makine öğrenmesi tabanlı ağaç tespiti yaklaşımının metropoliten ölçeğe genişletilmesi. Bu öneriler çalışmanın bulgularını operasyonel kentsel planlama ve çevre yönetimi uygulamalarına dönüştürmek için atılabilecek somut adımları temsil etmektedir.

Sonuç olarak NDVI ve EVI vazgeçilmez ancak farklılaşmış araçlardır. Yiğit ve Orhan'ın (2025) vurguladığı gibi her iki indeks de yalnızca spektral yansımalara dayanmakta, çevresel stres nedenlerini açıklayamamaktadır. Bu nedenle bitki örtüsü indekslerinin tek başına değil yanında meteorolojik veriler, toprak nemi ölçümleri ve fenolojik gözlemlerle birlikte bütünsel bir bitki sağlığı izleme sisteminin parçası olarak kullanılması önerilmektedir. Belgrad örneği böyle bir bütünsel yaklaşımın metropoliten ölçekte uygulanabilirliğini ve değerini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Andini, S. W., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2018). Analisis sebaran vegetasi dengan citra satelit Sentinel menggunakan metode NDVI dan segmentasi (Studi Kasus: Kabupaten Demak). *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1), 109–117.
- Doğan, H., Kılıç, O., & Yılmaz, D. (2014). Tokat ili bitki yoğunluk sınıflarının LANDSAT-7 ETM+ uydu görüntüleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile araştırılması. *Journal of the Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 31(1), 1–10.
- Gündoğdu, K. S. (2018). Buğday ekili parsellerde NDVI değerlerinin konumsal ve zamana bağlı değişiminin belirlenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(1), 51–62.
- Gündoğdu, K. S., & Bantchina, B. B. (2018). Landsat uydu görüntülerinden NDVI değer dağılımının parsel bazlı değerlendirilmesi: Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi çiftlik arazisi örneği. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 32(2), 1–14.
- Karadoğan, S., Kavak, M., & Al, A. (2023). Investigation of horizontal, vertical and temporal changes of vegetation with NDVI and DEM data: Example of Mardin

Savur District. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2), 145–162.

Oturanç, S. Y. (2025). Bitki örtüsü indeksleri kullanılarak bitki örtüsü yoğunluklarının araştırılması: Karatepe-Aslantaş Milli Parkı örneği. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(1), 92–108.

Prasetyo, N., Sasmito, B., & Prasetyo, Y. (2017). Analisis perubahan kerapatan hutan menggunakan metode NDVI dan EVI pada citra satelit Landsat 8 tahun 2013 dan 2016 (Area Studi: Kabupaten Semarang). Jurnal Geodesi Undip, 6(4), 41–50.

Tunay, M., & Ateşoğlu, A. (2008). Çok zamanlı uydu görüntüleri ile Amasra ve yakın çevresine ait bitki örtüsü değişim analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 10(13), 51–60.

Yıldız, H., Mermer, A., Ünal, E., & Akbaş, F. (2012). Türkiye bitki örtüsünün NDVI verileri ile zamansal ve mekansal analizi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 21(2), 50–56.

Yiğit, A. Y., & Orhan, O. (2025). Multispektral İHA görüntüleri kullanılarak nesne tabanlı görüntü analizi ile ağaç tespiti ve NDVI tabanlı bitki sağlığı analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 27(1), 1–18.

Şekil bellekli alaşımlar ve uygulamaları

Fehim FINDIK^{1,2,c}

- 1- Prof. Dr. Metallurgy and Materials Engineering Department, Faculty of Technology, Sakarya Applied Sciences University, Sakarya, Turkey. ORCID No: 0000-0003-2537-1951
- 2- Prof. Dr. Istanbul Aydın University, Mechanical Eng Dept, Engineering Faculty, Florya Halit Aydın Campus, Istanbul, Turkey C: Corresponding author; e-mail: findik@subu.edu.tr

ÖZET

Şekil bellekli alaşımlar (ŞBA), belirli bir sıcaklığın altında plastik şekilde deforme edildiklerinde, ısıtıldıklarında orijinal şekillerine geri dönebilen akıllı malzemelerdir. Bu benzersiz özellik, martensitik faz dönüşümü adı verilen tersinir bir kristal yapı değişimine dayanır. En yaygın ŞBA'lar arasında nikel-titanyum (NiTi), bakır bazlı alaşımlar (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al) ve demir bazlı alaşımlar (Fe-Mn-Si) bulunur. NiTi alaşımları, yüksek geri dönüşüm gerilimi, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluk sayesinde en çok tercih edilen türdür. ŞBA'ların iki temel yeteneği vardır: tek yönlü şekil belleği (soğukta şekillendirilip ısıda eski haline dönme) ve iki yönlü şekil belleği (ısıtma-soğutma döngüsüyle iki farklı şekil arasında gidip gelme). Ayrıca süperelastiklik özelliği sayesinde yüksek elastik deformasyon (%8'e kadar) gösterebilirler. Uygulama alanları oldukça geniştir: Bunlar arasında biyomedikal, havacılık ve uzay, otomotiv, robotik ve sensörler ile günlük hayatta çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Biyomedikal alanda, stentler, ortodontik teller, damar filtreleri ve minimal invaziv cerrahi aletleri. NiTi'nin biyouyumluluğu bu alanda öne çıkar. Havacılık ve uzay alanında ise, kanatçık açılım mekanizmaları, akıllı bağlantı elemanları (örneğin Apollo görevlerinde kullanılan anten açma aparatları) kullanılmaktadır. Otomotiv sanayiinde ise, sıcaklığa duyarlı vanalar, yakıt enjektörleri, termostatlar ve çarpışma emici tampon sistemleri sayılabilir. Robotik ve sensörler alanında ise, yapay kas aktüatörler, mikrovalfler ve sıcaklık anahtarları kullanılmaktadır. Son olarak günlük hayatta kullanılan şekil bellekli malzemeler arasında, gözlük çerçeveleri (esneyip kırılmayan), süperelastik telefon kalem uçları ve akıllı tekstiller öne çıkmaktadır. Son yıllarda, ŞBA'ların manyetik veya ferromanyetik türleri (Ni-Mn-Ga gibi) manyetik alanla kontrol edilebilen daha hızlı tepkili aktüatörler geliştirilmesine olanak tanımıştır. Düşük maliyetli, yüksek dayanımlı ve uzun ömürlü yeni alaşımların geliştirilmesi, ŞBA'ların mikroeletromekanik sistemler (MEMS) ve akıllı yapılar gibi ileri teknolojilerde kullanımını daha da yaygınlaştıracaktır. Bu çalışmada, şekil bellek etkisinden bahsedildikten sonra, şekil bellekli alaşımların uygulama alanları kritik edilerek karşılaştırılmıştır: Ardından ŞBA'ların sürdürülebilirlikleri sorgulanmış ve yeni nesil akıllı malzemeler ve ŞBA'ların gelecek perspektifleri tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler - şekil bellekli alaşımlar, martensitik dönüşüm, NiTi, süperelastiklik, akıllı malzemeler, biyouyumluluk.

1. GİRİŞ

Şekil bellekli alaşımlar (Shape Memory Alloys - SMAs), belirli bir sıcaklıkta önceden tanımlanmış bir şekle dönebilen akıllı malzemelerdir. Bu alaşımlar, termomekanik işlemler sonucunda "şekil hafızası efekti" (SHE) ve "süperelastisite" gibi özellikler sergilerler. En yaygın kullanılan şekil bellekli

alaşım, Nitinol (Nikel-Titanyum alaşımı, örn. NiTi) olarak bilinir. Bu malzemeler, özellikle Nitinol (NiTi), Cu tabanlı alaşımlar (Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al) ve Fe-Mn-Si alaşımları ile yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu malzemeler, tıp, havacılık, enerji ve robotik gibi alanlardaki kullanımı giderek artarken, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri de önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, şekil bellekli alaşımların temel özellikleri, çalışma mekanizmaları ve uygulama alanları literatür referanslarıyla birlikte sunulacaktır.

2. ŞEKİL BELLEK ETKİSİNİN TEMELLERİ

Şekil bellekli alaşımlar, martenzitik ve ostenitik faz dönüşümleri sayesinde bu özelliği gösterir: Bunlardan ostenit fazı, yüksek sıcaklıkta kararlı olan, yüksek simetrikli (yüzey merkezli kübik) kristal yapıdır. Martenzitik fazı ise, düşük sıcaklıkta oluşan, düşük simetrikli (hacim merkezli tetragonal) martenzitik yapıdadır.

Malzeme soğutulduğunda yapı martenzit faza dönüşür ve deforme edilebilir. Isıtıldığında ise ostenit faza dönerek orijinal şeklini alır. Bu dönüşüm, “termoelastik martensitik transformasyon” olarak adlandırılır (Otsuka, & Wayman, 1998:1).

2.1. ŞEKİL HAFIZASI ETKİSİ (ONE-WAY VE TWO-WAY)

Tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki türlü şekil hafızası söz konusudur: Tek yönlü şekil hafızasında, malzeme sadece ısıtıldığında orijinal şekline döner. Çift yönlü şekil hafızasında ise, malzeme hem ısıtıldığında hem de soğutulduğunda farklı şekiller alabilir.

Süperelastik (pseudolelastic) alaşımlar ise, oda sıcaklığında yüksek deformasyonlara (%8’e kadar) maruz kaldıklarında kalıcı şekil değişikliği olmadan eski haline dönebilirler. Bu özellik, özellikle tıbbi stentlerde ve ortodontik tellerde kullanılır (Duerig, vd., 1999:149).

Şekil bellekli alaşımların çalışma mekanizmalarında SBA'lar, martensitik faz dönüşümü ile şekil hafızası ve süperelastisite özelliklerini gösterir: Termal şekil hafızasında, malzeme ısıtıldığında orijinal şekle dönme (One-Way veya Two-Way) söz konusudur. Süperelastisitede ise, oda sıcaklığında malzemenin yüksek deformasyona maruz kalmasına rağmen, kalıcı şekil değişikliği olmaz (Miyazaki, vd., 2009:1).

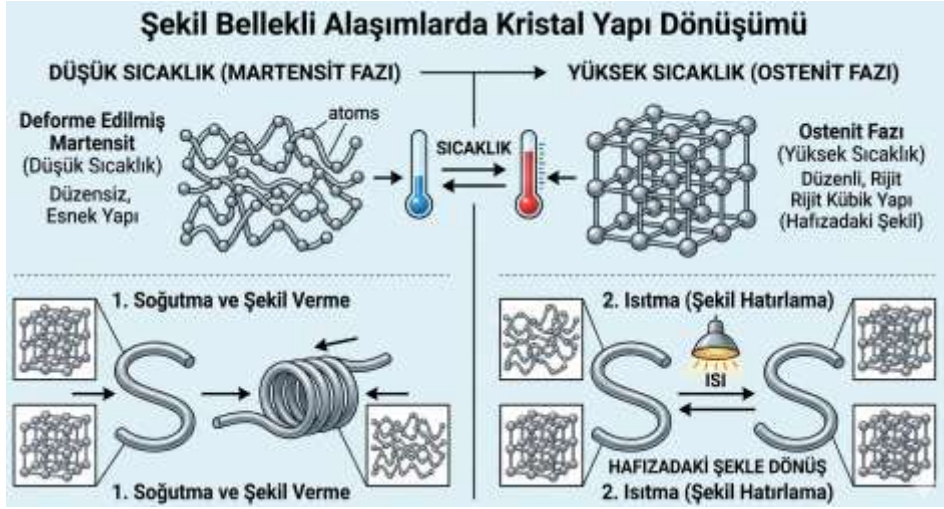
Faz dönüşüm sıcaklıkları olarak ostenitik ve martenzitik sıcaklıkları önemlidir. Ostenit bitiş sıcaklığında (A_f), tam olarak ostenitik faza dönüşüm

söz konusudur (Şekil 1). Martenzit bitiş sıcaklığında (M_f) ise, malzemenin yapısı tamamen martenzit fazına dönüşür (Şekil 2).

Tablo 1’de başlıca şekil bellekli alaşımlar ve özellikleri verilmiştir. Bu tabloda alaşım türleri, bunların bileşimleri,

Tablo 1: Başlıca şekil bellekli alaşımlar ve özellikleri (Duerig, vd., 1999:149), (Miyazaki, vd., 2009:1).

Alaşım Türü	Bileşim	Şekil Hafızası Etkisi	Süper elastisite	Faz Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	Avantajlar	Dezavantajlar
Nitinol (NiTi)	%50 Ni, %50 Ti	✓ (One-Way/Two-Way)	✓ (Yüksek)	-50 ile 100 arası	Biyo uyumlu, yüksek dayanım	Nikelin toksik etkisi, pahalı
Cu-Al-Ni	%14-18 Al, %3-5 Ni	✓	✗ (Düşük)	80-200	Düşük maliyet	Kırılgan, düşük biyo uyumluluk
Fe-Mn-Si	%28-32 Mn, %4-6 Si	✓	✗	-200 ile 200 arası	Çelik benzeri dayanım, ucuz	Düşük şekil hafıza performansı
Ti-Nb (Nikel içermeyen)	%20-30 Nb, Ti bazlı	✓ (Gelişmekte)	✓ (Orta)	-100 ile 50 arası	Biyouyumlu, hipoalerjenik	Mekanik özellikleri sınırlı



Şekil 1. Şekil bellekli alaşımlarda kristal yapı dönüşümü.



Şekil 2. Şekil bellek etkisi: Makroskopik süreç ve sıcaklık ilişkisi

3. UYGULAMA ALANLARI

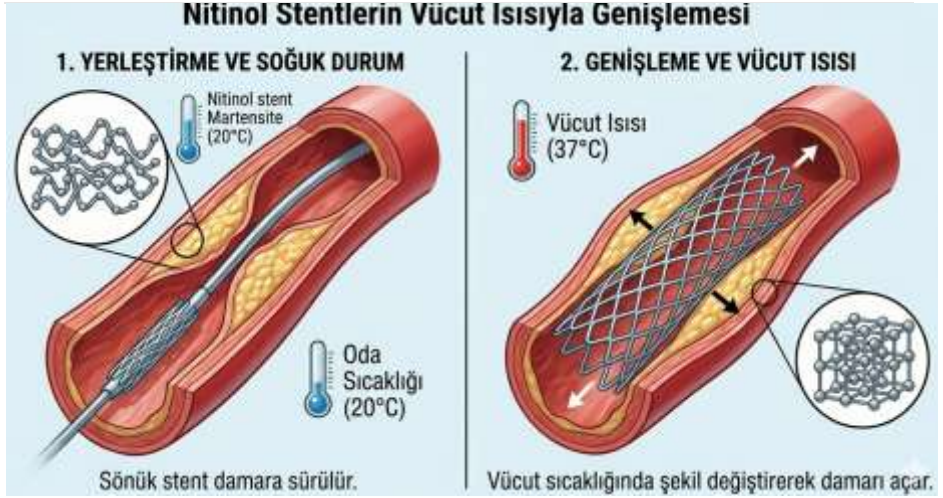
Şekil bellekli alaşımların pek çok uygulama alanları vardır. Bunlardan bazıları tıp ve biyomedikal alanlarda, havacılık ve uzayda, enerji ve sürdürülebilir uygulamalarda, inşaat ve deprem mühendisliğinde, robotik ve yapay kaslar gibi çok çeşitli sektörlerde kendine uygulama alanı bulurlar (Tablo 2).

Tıp ve biyomedikal alanda stentler ve ortodontik tellerin uygulaması buna bir örnek teşkil eder. Bunlardan kardiyovasküler stentler (Şekil 3), kendiliğinden genişleyen nitinol stentler, damar daralmalarında kullanılır (Petrini, vd., 2005:716). Ortopedik diş telleri ise, sürekli kuvvet uygulayarak diş hareketini optimize eder (Elahinia, vd., 2016:630). Minimal invaziv cerrahi aletler ise, katlanabilir laparoskopik cihazlarda kullanılır. Öte yandan havacılık ve uzay alanında da, kanat yüzeyleri ve uydu antenleri uygulama alanlarından bazılarıdır. Bunlardan morphing kanat yüzeyleri, uçuş sırasında kanat şeklini değiştirerek yakıt verimliliğini artırır (Barbarino, vd., 2014:1). Uydu antenleri ise, ısıtıldığında açılan kompakt antenlerdir ve uzaya gönderilen roketlerde daha az yer tutması için kullanılırlar. Enerji ve sürdürülebilir uygulamalarda ise, termal enerji geri kazanım sistemlerinden atık ısıyı mekanik enerjiye dönüştüren aktüatörler (Şekil 4) kullanılır (Lagoudas, 2008:1). Ayrıca, güneş enerjisinden faydalanmak için, güneş paneli açısı ayarlayıcıları, güneş takip sistemlerinde kullanılır. İlaveeten, inşaat ve deprem mühendisliği alanlarında da kendi kendini onaran malzemeler ve sismik izolatörler kullanılır. Bunlardan kendi kendini onaran malzemeler için, beton çatlaklarının ısı ile kapanmasını örnek olarak gösterebiliriz (Soroushian, vd.,2001:20). Sismik izolatörler içinde de deprem yüklerini absorbe eden SBA tabanlı sistemler (Dolce & Cardone, 2026:302) şekil bellekli uygulamalardan bir tanesidir. Son olarak robotik ve yapay kaslar içinde yumuşak robotik aktüatörler, örnek verilebilir. Bunlar, biyomimetik hareket sağlayan yapay kaslar olarak ifade edilebilir (Kohl, 2010:1).

Tablo 2: Şekil bellekli alaşımların uygulama alanları (Elahinia, vd., 2016:630), ((Lagoudas, 2008:1).

Endüstri	Uygulama Örnekleri	Kullanılan Alaşım	Avantajlar
Tıp	Kardiyak stentler, ortodontik teller	NiTi	Biyouyumluluk, süperelastisite
Havacılık	Morphing kanatlar, uydu antenleri	NiTi, Cu-Al-Ni	Hafiflik, yüksek deformasyon dayanımı
Enerji	Termal aktüatörler, güneş	NiTi, Fe-Mn-Si	Isıl verimlilik

Endüstri	Uygulama Örnekleri	Kullanılan Alaşım	Avantajlar
	paneli ayarlayıcılar		
İnşaat	Kendini onaran beton, sismik izolatörler	Fe-Mn-Si	Deprem direnci, uzun ömür
Robotik	Yapay kaslar, yumuşak robotik	NiTi, Ti-Nb	Hassas hareket kontrolü



Şekil 3. Nitinol stentlerin vücut ısı ile genişlemesi



Şekil 4. Havacılıkta şekil bellekli alaşım aktüatörleri

4. SÜRDÜREBİLİRLİK

Çevresel etkiler açısından şekil bellekli alaşımların avantajları ve dezavantajları, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik problemleri incelenecektir (Tablo 3, Tablo 4). Şekil bellekli alaşımların avantajları arasında uzun ömürlülük, enerji verimliliği ve atıkların azalması sayılabilir. Uzun ömürlülük özellikleri sayesinde, yüksek dayanıklılık özellikleri yüzünden ŞBA'lar tekrar tekrar kullanılabilir. Enerji verimliliği avantajı ise, şekil bellekli alaşımlarda, termal ve mekanik enerji dönüşümüyle enerji tasarrufu sağlar. Bu alaşımlarda atık azalması sayesinde, kendini onaran sistemlerle malzeme israfı önlenir.

Öte yandan, şekil bellekli alaşımların avantajlarının yanı sıra, dezavantajları da vardır. Bunları şöyle özetleyebiliriz: Nikel içeren alaşımların toksisitesi bir dezavantajdır. NiTi alaşımlarındaki nikel, bazı hastalarda alerjik reaksiyonlara neden olabilir (Shabalovskaya, vd., 2008:447). Bu dezavantajın çözümü ise, nikelsiz SBA'lar (ör. Ti-Nb tabanlı alaşımlar) geliştirilmektedir (Hosada, 2013:1535). Ancak alternatif ŞBA'lar yüksek üretim maliyetine sahiptir. Bu negatif özellik ise, toz metalurjisi ve lazer işleme gibi yöntemlerle maliyetler düşürülmeye çalışılıyor (Ungar vd., 2017:4433).

Geri dönüşüm ve sürdürülebilir üretim açısından düşünürsek, Nitinol geri kazanılabilir. Bu alaşımda, elektrokimyasal yöntemlerle nikel ve titanyum ayrıştırılabilir (Bansiddhi, vd., 2008:773). Ayrıca çevrenin korunması açısından da yeşil üretim yapılabilir, yani düşük karbon ayak izi için enerji verimli ergitme teknikleri kullanılabilir.

Tablo 3: Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik analizi (Shabalovskaya,, vd., 2008:447), (Ungar, vd., 2017:4433).

Kriter	Nitinol (NiTi)	Cu-Al-Ni	Fe-Mn-Si	Ti-Nb
Geri Dönüşüm	Zor (nikel ayrıştırma gerektirir)	Kolay (bakır bazlı)	Kolay (çelik prosesleri)	Araştırma aşamasında
Toksik Etki	Nikel alerjisi riski	Düşük	Yok	Yok
Enerji Verimliliği	Yüksek (aktüatörlerde)	Orta	Düşük	Yüksek (tıbbi uygulamalar)
Üretim Maliyeti	Yüksek	Düşük	Çok düşük	Yüksek

Tablo 4: Şekil bellek etkisi ile süperelastisite karşılaştırması Duerig, vd., 1999:149).

Özellik	Şekil Hafızası Etkisi	Süperelastisite
Tetikleyici	Isı (termal aktivasyon)	Mekanik yük (stres)
Deformasyon	%6-8 (geri dönüşlü)	%8-10 (geri dönüşlü)
Sıcaklık Aralığı	M~f~ ile A~f~ arası	Oda sıcaklığında (A~f~ üzerinde)
Uygulama Örneği	Isıl aktüatörler, kendiliğinden açılan stentler	Ortodontik teller, katlanabilir gözlük çerçeveleri

5. YENİ NESİL AKILLI MALZEMELER

Burada yeni nesil akıllı malzemelerden manyetik şekil bellekli alaşımlar ile şekil bellekli polimerler üzerinde durulacaktır.

Manyetik şekil bellekli alaşımlar (MSBA'lar) yeni nesil akıllı malzemeler içerisinde yer alır. MSBA'ların temel prensipleri ve çalışma mekanizmaları şöyledir:

Manyetik tetiklemeli faz dönüşümü MSBA'larda, dış manyetik alanla martensit-austenit dönüşümü geçirerek şekil değiştirir (Ulutaş, 2017:169) ve ilk şeklini hatırlar. MSBA'ların kritik özellikleri ise şöyle özetlenebilir: Bu sistemlerde manyeto-termoelastik etki söz konusudur. Yani, ısı ve manyetik alanın birlikte etkisi ile yüksek verimlilik elde edilir. Bu manyetik sistemlerde, hızlı tepki süresi çok kısadır (<1 ms) ve bu rakam geleneksel termal SBA'lara göre 100 kat hızlıdır (Xu, vd., 2022:35). MSBA'larda temel prensipler ve çalışma mekanizması şöyle özetlenebilir: Manyetik tetiklemeli faz dönüşümünde MSBA'lar, dış manyetik alanla martensit ve austenit dönüşümü geçirerek şekil değiştirir (Ulutaş, 2017:169). Bu sistemlerin kritik özelliklerinde ise, manyeto-termoelastik etki ile hızlı tepki süresi etki eder.

MSBA'ların başlıca alaşım sistemleri arasında Ni-Mn-Ga, Fe-Pd ve Co-Ni-Al yer alır. Bu alaşımların örnek bileşimleri, manyetik tepkileri ve uygulama alanları Tablo 5 de gösterilmiştir.

Tablo 5: MSBA'ların karşılaştırmalı özellikleri (Musienko, vd., 2018:173).

Alaşım Sistemi	Örnek Bileşim	Manyetik Tepki	Uygulama Alanı
Ni-Mn-Ga	$\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{25}$	Dev manyetik deformasyon (%6-12)	Mikroaktüatörler, sensörler
Fe-Pd	$\text{Fe}_{70}\text{Pd}_{30}$	Biyouyumlu	Tıbbi implantlar
Co-Ni-Al	$\text{Co}_{40}\text{Ni}_{33}\text{Al}_{27}$	Yüksek sıcaklık ($>100^{\circ}\text{C}$)	Uzay ve otomotiv

MSBA'ların yenilikçi uygulamaları arasında manyetik kateterler, enerji hasadı ve yumuşak robotik sayılabilir. Bunların içerisinde yer alan minimal invaziv cerrahide manyetik kateterler sayesinde, manyetik alanla yönlendirilebilen cerrahi aletler (Pancaldi, vd., 2021:025020) sayesinde büyük işler başarılmaktadır. Enerji hasadında ise, titreşimden elektrik üreten manyetoşekil bellekli jeneratörler, %85 verimlilikte kullanılabilir. Son olarak, yumuşak robotik sayesinde, manyetik alanla kontrol edilen kıvrılabilir robotik kollar kullanılmaktadır (Chung, vd., 2024:484).

Yeni nesil akıllı malzemeler içerisinde ikinci olarak şekil bellekli polimerler sayılabilir. Bu tür malzemeler 4D baskı kullanılarak üretilir. 4D baskı, 3D'nin geliştirilmiş şeklidir.

3D baskılı sistemlerde, bazı yeni nesil malzemeler zaman/uyarıcı (ısı, su, manyetik alan) ile şekil değiştirirler. Bu tür üretim sistemlerinde kullanılabilen malzemeler şunlardır: Şekil bellekli polimerler, hidrojeller ve manyetik kompozitler. Şekil bellekli polimerler (SBP), ısıyla aktive edilirler. Hidrojeller ise, su absorpsiyonuyla genleşirler. Manyetik kompozitlerde ise bir takım manyetik nanopartikül katkıları kullanılır.

Çığır açan yeni nesil malzemelerin uygulama alanları, kullanılan malzemeler, tetikleyici ve avantajları Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6: 4D baskı malzemelerinin performans kriterleri (Kwon, vd., 2023:76).

Uygulama	Malzeme	Tetikleyici	Avantaj
Kendi Kendine Katlanan Stentler	NiTi-SBP hibrit	Vücut ısısı	Hastane dışı implantasyon
Akıllı Ambalajlar	Poliüretan SBP	Nem/Isı	Gıda raf ömrü izleme
Uzay Habitatları	Karbon nanotüp kompozit	Güneş radyasyonu	Mars'ta kendiliğinden inşa

Şüphesiz bu yeni nesil malzemelerin sürdürülebilirlik boyutu tartışılır. Biyobozunur SBP'ler içerisinde, mısır nişastası bazlı malzemeler (CO₂ salınımı %70 az) yer almaktadır. Manyetik nanopartiküllerin mıknaatısla ayrıştırılması ile bunların geri dönüşümü sağlanabilir.

Manyetik ŞBA'ların gelecek perspektifleri ve zorlukları da şöyle özetlenebilir: Manyetik SBA'lar İçin zorluklar arasında, Ni-Mn-Ga'nın kırılabilirliği göze çarpmaktadır. Bu problem, tek kristal büyütme teknikleri ile çözülmektedir. Manyetik soğutma (geleneksel kompresörlere göre %40 enerji tasarrufu) elde edilmesi, bu alanda önemli bir fırsattır. Yine gelecekte, bu alanda 4D baskı kullanılması söz konusu olabilecektir. Bu alanda karşılaşılabilecek zorluklara, çoklu uyarıcılara tepki verebilen hibrit malzemelerin geliştirilmesi ile çözüm bulunabilir. Yapay kaslar için grafen-SBP kompozitler, elde edilebilecek fırsatlar arasında sayılabilir.

Yeni nesil akıllı malzemeler ile ilgili olarak önerilen 5 adımlı araştırma yolu şöyle özetlenebilir: malzeme seçimi, prototip baskı, karakterizasyon, performans testi ve sürdürülebilirlik analizi. Malzeme seçiminde, hedef uygulamaya göre Ni-Mn-Ga veya Fe-Pd alaşımları seçilebilir. İkinci olarak, prototip baskı için çok malzemeli 3D ve 4D yazıcılarla test yapılabilir. Üçüncü olarak ise, üretilen malzemelerin karakterizasyonları, sofistike yöntemlerden XRD ve SEM ile faz analizi yapılarak kontrol edilebilir. Dördüncü olarak da manyetik alan/ısı altında deformasyon ölçümü yapılarak hazırlanan yeni nesil alaşımların performans testleri gerçekleştirilebilir. Son olarak ise araştırma yolunda, sürdürülebilirlik analizi yapılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yapılabilir.

6. GELECEK PERSPEKTİF

SBA'lar, özellikle enerji verimliliği, tıbbi implantlar ve akıllı yapılar alanında büyük potansiyele sahiptir. Ancak, nikel toksisitesi ve yüksek maliyet gibi sınırlamaların aşılması için araştırmalar devam etmektedir. Biyouyumlu ve düşük maliyetli alternatifler (Fe-Mn-Si, Ti-Nb) gelecek vaat etmektedir.

Gelecek perspektiflerini birkaç kritik başlıkta inceleyebiliriz: Burada biyomedikal sektörde kişiye özel tedaviler, havacılıkta hafif kanatlar, enerji verimliliği ve giyilebilir teknoloji üzerinde kısaca durulacaktır:

Kişiye özel tedaviler, biyomedikal alanında devrim niteliğindedir. ŞBA'ların (özellikle Nitinol) halihazırda stentlerde kullanımı yaygındır. Ancak gelecek, mikro-cerrahi robotları ve vücut içinde genişleyebilen implantlarda olabilecektir. Yine vücutta kullanılan akıllı protezler, kas hareketlerini taklit eden, daha doğal ve hafif protez uzuvlar geliştirilmektedir. Ayrıca, ilaç salınım sistemleri, vücut sıcaklığındaki değişimlerle tetiklenen ve ilacı tam zamanında bırakan akıllı kapsüller olarak bilinmektedir.

Geleceğin uçaklarında büyük hidrolik sistemlerin yerini ŞBA aktüatörlerin (hareket ettiricilerin) alması bekleniyor. Bunlar arasında morfing kanatlar ve sessiz jet motorları sayılabilir. Morfing kanatları, uçuşun farklı aşamalarında (kalkış, seyir, iniş) aerodinamik yapısını değiştirebilen esnek kanatlardır. Sessiz jet motorları ise, motor çıkışındaki gürültüyü azaltmak için sıcaklığa göre şekil değiştiren nozüllerdir.

Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından, katı hal soğutmada, kompresör ve gaz gerektirmeyen, metali esnetip bırakarak soğutma sağlayan sistemlerdir. Bu teknoloji, bugün kullandığımız buzdolaplarından çok daha verimli ve çevre dostu olma potansiyeline sahiptir. Atık ısı geri kazanımı

hakkında, fabrikalardaki düşük sıcaklıklı atık ısıyı mekanik enerjiye, oradan da elektriğe dönüştüren ŞBA motorları üzerinde çalışmalar sürüyor.

Son olarak robotik ve giyilebilir teknoloji alanında, geleneksel motorlar ağır ve kabadır. ŞBA telleri ise yapay kas görevi görür. Yumuşak robotik alanında ise, insan dokusuna zarar vermeyen, dar alanlara sızabilen esnek robotlar kullanılır. Son olarak, akıllı tekstiller kullanılmaktadır. Bu giysiler, ortam sıcaklığına göre gözeneklerini açan veya kapatan, teri tahliye eden veya ısıyı hapseden giysiler.

7. SONUÇ

Bu çalışmada, şekil bellekli alaşımların (ŞBA) temel özellikleri, çalışma mekanizmaları ve geniş uygulama yelpazesi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. NiTi, Cu-Al-Ni ve Fe-Mn-Si gibi farklı alaşım sistemleri, martensitik faz dönüşümü sayesinde şekil hafızası etkisi ve süperelastiklik gibi benzersiz özellikler sergilemektedir. Bu malzemeler, biyomedikal (stentler, ortodontik teller), havacılık (morfining kanatlar, uydu antenleri), otomotiv, robotik ve inşaat gibi birçok sektörde başarıyla kullanılmaktadır.

ŞBA'ların sürdürülebilirlik açısından uzun ömür, enerji verimliliği ve atık azaltma gibi avantajları bulunmakla birlikte, nikel toksisitesi ve yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajları da mevcuttur. Nikelsiz alternatiflerin (Ti-Nb) geliştirilmesi ve toz metalurjisi gibi yöntemlerle maliyetlerin düşürülmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir.

Yeni nesil akıllı malzemeler arasında manyetik şekil bellekli alaşımlar (Ni-Mn-Ga, Fe-Pd) ve şekil bellekli polimerler öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, manyetik alanla kontrol edilebilme, hızlı tepki süresi ve 4D baskı ile üretilbilme gibi üstün özellikler sunmaktadır. Gelecek perspektifinde, kişiye özel tıbbi implantlar, sessiz jet motorları, katı hal soğutma sistemleri ve yumuşak robotik gibi alanlarda ŞBA'ların daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Düşük maliyetli, yüksek dayanımlı ve çevre dostu yeni alaşımların geliştirilmesi, bu akıllı malzemelerin mikroeletromekanik sistemler ve akıllı yapılar gibi ileri teknolojilerdeki kullanımını artıracaktır.

REFERANSLAR

- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (Eds.). (1998). *Shape memory materials*. Cambridge University Press.
- Duerig, A. Pelton, D. Stöckel. (1999). An overview of nitinol medical applications, *Materials Science and Engineering: A*, 273-275, 149-160.
- Miyazaki, S., Fu, Y. Q., & Huang, W. M. (Eds.). (2009). *Thin film shape memory alloys: fundamentals and device applications*. Cambridge University Press.

- Petrini, L., Migliavacca, F., P. Massarotti, S. Schievano, Gabriele Angelo Dubini, F. Auricchio. (2005). *Journal of Biomechanical Engineering*, 127 (4), 716-725.
- Elahinia, M., Narges Shayesteh Moghaddam, Mohsen Taheri Andani, Amirhesam Amerinatanzi, Beth A. Bimber, Reginald F. Hamilton. (2016). Fabrication of NiTi through additive manufacturing: A review, *Progress in Materials Science*, 83, 630-663.
- Barbarino, S., Flores, E. I., Ajaj, R., Dayyani, I., M., Friswell, I. (2014). A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft, *Smart Materials and Structures*, 23 (6), paper no: 063001, 1-9.
- Lagoudas, D. C. (Ed.). (2008). *Shape memory alloys: Modeling and engineering applications*. Springer.
- Soroushian, P., Ostowari, K., Nossoni, A., Chowdhury, H. (2001). Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective posttensioning forces with shape memory alloys, *Transportation Research Record*, 1770 (1), 20-26.
- Dolce, M., Cardone, D. (2006). Theoretical and Experimental Studies for the Application of Shape Memory Alloys in Civil Engineering”, *Journal of Engineering Materials and Technology (ASME)*, 128 (3), 302-311.
- Kohl, M. (2010). *Shape memory microactuators*. Springer.
- Shabalovskaya, S., Anderegg, J., Humbeeck, J. V. (2008). Critical overview of Nitinol surfaces and their modifications for medical applications, *Acta Biomaterialia*, 4 (3), 447-467.
- Hosoda, H. (2013). Magnetoelastic Anomalies Exhibited by Ni-Fe(Co)-Ga Polycrystalline Ferromagnetic Shape Memory Alloy, *Materials Transactions*, 54 (8), 1535-1538.
- Ungár, T., Frenzel, J., Gollerthan, S., Ribárik, G., Balogh, L., Eggeler, G., (2017). On the competition between the stress-induced formation of martensite and dislocation plasticity during crack propagation in pseudoelastic NiTi shape memory alloys, *Journal of Materials Research*, 32 (23), 4433-4442.
- Bansiddhi, A., Sargeant, T. D., Stupp, S. I., Dunand, D. C. (2008). Porous NiTi for bone implants: a review, *Acta Biomaterialia*, 4 (4), 773-782.
- Ulutaş, B. (2017). Optimal Cutting Conditions of Abrasive Waterjet Cutting for Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo Alpha-Beta Alloy Using EDAS and DFA Methods, *Journal of Business Research – Türk*, 9 (2), 169-183.
- Xu, X., Odaira, T., Xu, S., Hirata, K., Omori, T., Ueki, K., Ueda, K., Narushima, T., Nagasako, M., Kainuma, R. et al. (2022). Tough yet flexible superelastic alloys meet biomedical needs, *Advanced Materials & Processes*, 180 (7), 35-37.
- Musiienko, D., Straka, L., Klimša, L., Saren, A., Sozinov, A., Heczko, O., Ullakko, K.. (2018). Giant magnetic-field-induced strain in Ni-Mn-Ga micropillars, *Scripta Materialia*, 150, 173-176.

- Pancaldi, M., Savchenko, M., Kumar, P., vd. (2021). Critical bending and shape memory effect in magnetoactive elastomers", *Smart Materials and Structures*, vol. 30 (2), 025020.
- Chung, C., Hyeon, K., Jeong, J., Lee, D., Kyung, U. (2024). Origami-Inspired Wearable Robot for Shoulder Abduction Assistance: A Double-Petal Mechanism Utilizing Shape Memory Alloy Actuators, in *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9 (1), 484-491.
- Kwon, H., Soni, P., Saeedi, A., Shahverdi, M., & Dillenburger, B. (2023). 3D printing and shape memory alloys. In M. Akbarzadeh, D. Aviv, H. Jamelle, & R. Stuart-Smith (Eds.), *Hybrids and Haecceities: Proceedings of the 42nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA 2022)* (pp. 76–89). ACADIA

Tabakalı Zeminlerde Plastik Kazık Tasarımı: Rijit ve Esnek Bağlantı Durumları

Mustafa Gökhan SABUR¹

Mustafa VEKLİ²

- 1- İnş. Müh. ; Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Müh. Anabırdalı
mgokhansabur@gmail.com ORCID No: 0009-0006-8954-2464.
- 2- Doç. Dr.; Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
mustafavekli@gmail.com ORCID No: 0000-0002-5850-731X.

ÖZET

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, zayıf ve tabakalı zeminlerde inşa edilen yapılarda zemin-yapı etkileşiminin ve geoteknik mühendisliğinin hayati önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bu çalışmada, yüksek oturma potansiyeline sahip tabakalı zeminlerde (kum, kil, kaya geçişleri) temele bağlı ve bağlı olmayan kazıklı temel sistemleri incelenmiştir. Geleneksel rijit betonarme kazıkların sismik dalga geçişi sırasında maruz kaldığı aşırı moment ve kesme kuvveti yığılmalarına karşı, düşük elastisite modülüne sahip plastik betonun sünek davranışı rasyonel bir alternatif olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Çalışma kapsamında, kazıkların radye temele monolitik olarak bağlandığı sistemler ile granüler bir yastık tabakası aracılığıyla esnek bir etkileşimin sağlandığı temele bağlı olmayan sistemlerin statik ve dinamik davranışları karşılaştırılmalı olarak ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler – Deprem, Zemin İyileştirme, Plastik Kazık, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Pseudo-statik Analiz

GİRİŞ

Türkiye, tektonik konumu itibarıyla yüksek sismik aktiviteye sahip bir coğrafyada yer almakta olup, bu durum yapı güvenliği ve geoteknik mühendisliği disiplinlerinin stratejik önemini her geçen gün artırmaktadır. Özellikle 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler (Pazarcık Mw: 7.7 ve Elbistan Mw: 7.6), yalnızca üst yapı dayanımının değil, aynı zamanda zemin-yapı etkileşiminin ve zemin iyileştirme yöntemlerinin hayati rolünü trajik bir şekilde ortaya koymuştur. Bu depremler sırasında, özellikle alüvyon dolgulu zayıf zeminlerde meydana gelen zemin sıvılaşması, farklı oturmalar ve taşıma gücü yenilmeleri, yönetmeliklere uygun inşa edilen yapıların dahi ağır hasar almasına veya tamamen göçmesine neden olmuştur. Bu sismik olay sonrasında, mühendislik camiasında ve kamuoyunda yapı yüklerinin yalnızca güvenli bir şekilde aktarılması değil, zeminin dinamik davranışının da kontrol altına alınması gerekliliği kritik bir öncelik haline gelmiştir. Bu bağlamda, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) standartlarının uygulanması noktasında zemin iyileştirme projeleri, yeni yapılaşma sürecinin en kritik aşaması olmuştur. Kahramanmaraş depremleri sonrası kullanımı giderek artan temele bağlı olmayan kazıklı zemin iyileştirme sisteminin, sismik enerjiyi sönmüleme ve yapısal bütünlüğü koruma kapasitesinin daha derinlemesine araştırılması gerekmektedir.

Geleneksel derin temel uygulamalarında kullanılan yüksek dayanımlı betonarme kazıklar, taşıma gücü açısından yüksek performans sunmalarına rağmen, rijit davranışları nedeniyle deprem sırasında zeminle olan rijitlik farkından ötürü aşırı tesir kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu noktada Temele

Bağı olmayan Kazık kavramı, özellikle deformasyon kontrolünün kritik olduğu tabakalı zeminlerde rasyonel bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Bu esnek yapı, kazığın çevre zeminle daha uyumlu hareket ederek, sismik yükler altında kazık gövdesinde oluşabilecek gevrek kırılma risklerini minimize etmektedir.

Bu bölümün temel amacı, tabakalı zemin koşullarında inşa edilen yapılarda temele bağlı olmayan kazıkların zemin iyileştirme ve temel destek elemanı olarak kullanımını bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektir. Çalışma kapsamında, kazıkların radye temele rijit olarak bağlandığı "Bağlantılı" sistemler ile yük aktarma platformu (LTP) aracılığıyla esnek bir etkileşimin sağlandığı "Bağlantısız" sistemlerin karşılaştırmalı analizi yapılacaktır. TBDY 2018 kriterleri ışığında; farklı sismik ivme değerleri, kazık geometrisi ve zemin tabakalanmasının sistem stabilitesi ve iç kuvvet dağılımları üzerindeki etkileri sayısal analiz yöntemleri ve teorik yaklaşımlarla irdelenecektir.

TABAKALI ZEMİNLERDE KAZIKLI TEMEL TASARIMI

Tabakalı zeminlerde kazıklı temel tasarımı, her bir tabakanın kayma mukavemeti ve rijitlik parametrelerinin birleşik etkisinin analiz edilmesini gerektirir (Das, 2010:198). Yük aktarım mekanizması, kazık boyunca çevreleyen zemin tabakalarının elastisite modülüne (E) ve drenaj koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir (Bowles, 1996:197). Özellikle yumuşak killi birimlerden geçerek kireçtaşı (limestone) gibi rijit bir tabakaya soketlenen kazıklarda, yükün büyük bir kısmının uç direnci ile karşılanması beklenir (Das, 2010:199). Ancak bu durum, sismik yüklemeler altında kazık ucunda ve tabaka geçiş bölgelerinde ciddi gerilme yığılmalarına yol açabilmektedir (Clough ve O'Rourke, 1990:202).

Dolgu tabakaları veya konsolide olmamış yumuşak kil birimleri içeren stratigrafik profillerde, çevre zeminin kazıktan daha fazla oturma yapması "Negatif Yüzey Sürtünmesi" olgusunu tetikler (Das, 2010:200). Bu durum, kazığa ilave bir sürşarj yükü bindirerek hem kazığın taşıma kapasitesini zorlamakta hem de beklenmedik oturmalara neden olmaktadır (Bowles, 1996:201). Yapısal hasarın büyüklüğü, mutlak oturmadan ziyade oturma gradyanı ve açısız sapma ile daha yakından ilişkilidir (Burland, 1995:200). Betonarme kazıklar, bu tür oturma uyumsuzluklarını sönmüleyerek kazık üzerindeki ek eksenel yükleri bir miktar stabilize edebilmektedir.

Kazıkların taşıyıcı bir kaya birimine soketlenmesi, statik yükler altında oturma performansını yaklaşık %30-50 oranında iyileştirebilmektedir (Das, 2010:203). Soket boyunun kazık çapına oranı, hem dönme stabilitesini hem de eksenel kapasiteyi belirleyen temel parametredir (Bowles, 1996:203). Ancak sismik bölgelerde gerçekleştirilen tasarımlarda, rijit tabaka girişindeki ani rijitlik değişimi, deprem ivmesi altında kazık kesitinde yüksek eğilme momentleri doğurarak gevrek kırılma riskini artırmaktadır (TBDY,

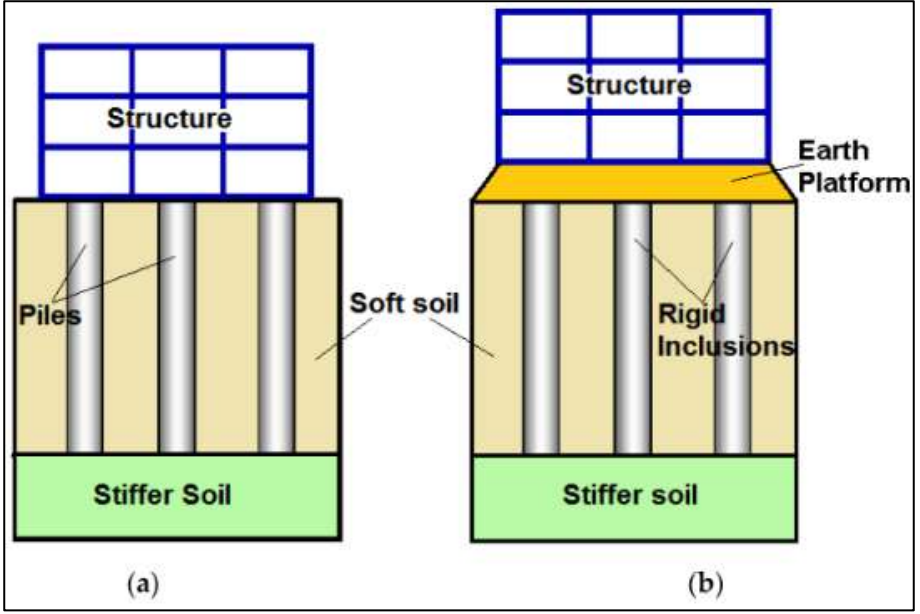
2018:206). Bu nedenle, tabakalı zeminlerde soket tasarımı yalnızca taşıma gücü odaklı değil, yönetmelikte belirtilen sismik performans kriterleri ve tesir kuvvetleri dikkate alınarak optimize edilmelidir (TBDY, 2018:207).

KAZIKLI TEMELLERDE YAPI-TEMEL-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Geleneksel kazıklı temel tasarımında, kazık başlarının radye temele monolitik olarak bağlandığı "bağlı" sistemler, yapı yüklerinin doğrudan kazık gövdesine aktarılmasını sağlar. Bu sistemlerde, yapı ile temel elemanları arasında tam bir süreklilik söz konusu olduğundan, kazıklar hem eksenel yükleri hem de eğilme momentlerini karşılamak üzere boyutlandırılır. Ancak rijit bağlantı, deprem sırasında zemin ile temel arasındaki deformasyon uyumsuzluğu nedeniyle kazık başlıklarında aşırı kesme kuvveti ve moment yığılmalarına yol açmaktadır (Wong ve ark., 2000:512). Özellikle tabakalı zeminlerde, rijit bağlantılı kazıkların sismik dalga geçişi sırasında gevrek kırılma riski taşıdığı ve bu durumun üst yapı güvenliğini tehlikeye attığı rapor edilmiştir.

Buna karşılık, kazıkların radye temele fiziksel olarak bağlanmadığı "bağlantısız" sistemler, bir deprem anında yapı ve zemin arasında bir sismik izolasyon mekanizması işlevi görür (Ghazavi ve Ravanshenas, 2008:412). Bu sistemde, temel ile kazık başları arasına yerleştirilen granüler yastık tabakası (Load Transfer Platform - LTP), sismik dalgaların üst yapıya geçişini sönmölemek ve kazık başlıklarında oluşabilecek yapısal hasar riskini minimize etmektedir (Cao ve ark., 2004:35). Temele bağlı olmayan kazıkların bu sistemde kullanımı, sadece uygulama avantajı sağlamakla kalmayıp, kazığın zeminle uyumlu bir süneklik sergilemesine ve yapı yükünün zemin ile kazıklar arasında daha dengeli paylaşılmasına olanak tanımaktadır (Wong ve ark., 2000:512).

Bağlantısız kazıklı sistemlerde yük aktarımı, granüler yastık tabakası içerisinde meydana gelen "Kemerleme Etkisi" (Arching Effect) aracılığıyla gerçekleşir. Yastık tabakasındaki dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısına ve kalınlığına bağlı olarak, radye temelden gelen düşey yüklerin bir kısmı kazık başlarına transfer edilirken, bir kısmı doğrudan zemin tarafından taşınır (Ghazavi ve Ravanshenas, 2008:415). Bu mekanizma, kazıklar üzerindeki efektif gerilme dağılımını optimize ederek sistemin toplam oturma performansını iyileştirir. Literatürde, kemerleme etkisinin verimliliğinin yastık tabakası rijitliği ve kazıklar arası aks mesafesi ile doğrudan ilişkili olduğu ve bu parametrelerin doğru seçilmesinin sistem genel stabilitesi için kritik önem taşıdığı vurgulanmaktadır.



Şekil 1: (a) Zemin-Kazık-Yapı etkileşimi (Bağlı sistem); (b) Zemin-İyileştirme Elemanı-Yastık Tabakası-Yapı etkileşimi (Bağlı olmayan sistem) (López Jiménez ve Dias, 2022'den uyarlanmıştır).

STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA PERFORMANS KRİTERLERİ (TBDY 2018)

Yapısal hasar riski değerlendirilirken, mutlak oturma değerlerinden ziyade oturma gradyanı ve açıl sapma parametreleri esas alınmaktadır. Burland (1995:200) tarafından önerilen ve literatürde yaygın kabul gören kriterlere göre, 1/500 değerinden küçük açıl sapmalar genellikle "ihmal edilebilir" hasar seviyesi olarak nitelendirilirken, 1/150 değerinin aşılması durumunda taşıyıcı sistemde ciddi yapısal hasar riski ortaya çıkmaktadır. Temele bağlı olmayan kazıkların esnek yapısı, bu oturma gradyanlarını sönümleyerek yapının hedeflenen performans düzeyinde (Sınırlı Hasar veya Kontrollü Hasar) kalmasına hizmet etmektedir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) uyarınca, derin temel sistemlerinin deprem etkileri altındaki stabilitesi, yerel zemin sınıfı ve tasarım deprem yer hareketi düzeylerine göre analiz edilmelidir. Yapılan sayısal analizlerde, deprem ivmesinin 0.10g seviyesinden 0.20g seviyesine çıkarılması, sistemin Güvenlik Katsayıları (FS) üzerinde doğrudan ve doğrusal olmayan bir azalmaya yol açmaktadır. Özellikle rijit bağlı kazık sistemlerinde, artan ivme değerleri ile birlikte kazık başlarında oluşan atalet kuvvetleri, zemin pasif direncini zorlamakta ve sistemin global stabilitesini kritik seviyelere ($FS < 1.10$) yaklaştırmaktadır.

Sismik yükleme altında sistem stabilitesinin değerlendirilmesinde, statik durum için öngörülen güvenlik katsayılarının deprem etkisiyle birleşik olarak ele alınması esastır. Literatürde, deprem anında zemin tabakalarında meydana gelen efektif gerilme azalmaları ve boşluk suyu basıncı artışları nedeniyle pasif zemin direncinin tamamının mobilize edilemeyeceği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, Eurocode 7 ve TBDY 2018 yaklaşımları doğrultusunda, kazı tabanı altındaki belirli bir zemin derinliğinin analiz dışı bırakılması veya azaltılmış pasif direnç katsayıları ile çalışılması, sismik güvenlik tahkiklerinde emniyetli tarafta kalmak açısından kritik önem arz etmektedir. Temele bağlı olmayan kazıklı sistemlerde, bağlantısız tasarım stratejisinin tercih edilmesi, sismik talepleri yastık tabakası içerisinde sönümleyerek sistemin sismik FS değerlerinin statik değerlere daha yakın kalmasına olanak tanımaktadır.

SİSMİK İVME ALTINDA İÇ KUVVET DAĞILIMLARI

Sismik yükleme altında kazık gövdesi boyunca oluşan iç kuvvetlerin dağılımı, sistemin rijitliğine ve uygulanan ivme düzeyine bağlı olarak karakteristik değişimler sergilemektedir. Yapılan sayısal analizlerde, maksimum eğilme momentlerinin genellikle kazık başlığı ile ilk ankraj veya destek seviyesi arasındaki bölgelerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Rijit bağlı (sistemlerde, deprem ivmesinin 0.10g'den 0.20g'ye yükseltilmesi, kazık başlarındaki atalet kuvvetlerini artırarak moment piklerinin yaklaşık %25-40 mertebesinde büyümesine neden olmaktadır (Wong ve ark., 2000:514). Bu durum, betonarme kesitlerde donatı akma sınırlarının zorlanmasına ve dolayısıyla süneklik talebinin artmasına sebebiyet vermektedir.

Kazıkların taşıyıcı kaya tabakasına (kireçtaşı) soketlendiği bölgelerde, ani rijitlik değişimi nedeniyle "ankastre mesnet" benzeri bir davranış ortaya çıkmaktadır. Bu rijitlik diskontinitesi, sismik dalga geçişi sırasında kazık ucunda ikincil bir moment piki oluşturmaktadır (Ghazavi ve Ravanshenas, 2008:418). Literatürde, soket boyunun artırılmasının dönme stabilitesine katkı sağladığı ancak sismik ivme altında kazık ucundaki kesme kuvveti talebini de eş zamanlı olarak yükselttiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, donatısız kazıkların düşük elastisite modülü, bu rijitlik farkını sönümleyerek soket bölgesindeki gerilme konsantrasyonlarını geleneksel betonarme kazıklara oranla daha üniform dağıtmaktadır.

Bağlantı stratejisi, deprem yüklerinin kazık gövdesine transfer mekanizmasını doğrudan belirlemektedir. Rijit bağlı sistemlerde, üst yapıdan gelen atalet kuvvetleri doğrudan kazık başlığına iletilirken; temele bağlı olmayan sistemlerde, granüler yastık tabakası (LTP) bir sönümleyici görevi görerek bu kuvvetlerin kazıklara geçişini %30-60 oranında azaltabilmektedir (Cao ve ark., 2004:38). Sayısal analiz sonuçları, bağlantısız kazıklarda maksimum moment değerlerinin kazık gövdesinin daha derin kısımlarına ötelendiğini ve kazık başlıklarında yapısal hasar riskinin (shear failure) önemli

ölçüde minimize edildiğini teyit etmektedir (Ghazavi ve Ravanshenas, 2008:420). Bu sismik performans farkı, özellikle yüksek ivmeli (0.20g ve üzeri) yükleme senaryolarında sistemin global stabilitesinin korunmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.

KALİTE KONTROL DENEYLERİ

Tasarım aşamasında öngörülen taşıma kapasitesi ve oturma performansının sahada doğrulanması, kalite kontrol sürecinin en kritik aşamasını oluşturmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen statik yükleme deneyleri, kazıkların tabakalı zemin içerisindeki yük-deformasyon davranışını doğrudan gözlemlene imkânı sunar. Deney sonuçları, sayısal analizlerde kullanılan zemin-kazık arayüzey katsayılarının ve uç direnci varsayımlarının doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılır (Das, 2010:205). Dinamik yükleme deneyleri (PDA) ise, özellikle çok sayıda kazığın imal edildiği projelerde, süreklilik ve kapasite tayini için hızlı ve ekonomik bir alternatif olarak literatürde ve şartnamelerde yer almaktadır (FHWA, 2005:208).

Kazıklı temel sistemlerinde betonun dökümü ve sürekliliği, kazığın sismik yükler altındaki performansını doğrudan etkileyen bir parametredir. Fore kazık imalatı sonrasında, kazık gövdesinde meydana gelebilecek olası segregasyon, kesit daralması veya yabancı madde karışımı gibi kusurların tespiti için düşük deformasyonlu bütünlük testleri (PIT) uygulanmalıdır. TS EN 1536 standartları uyarınca, özellikle tabakalı zemin geçişlerinde ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu durumlarda, kazık sürekliliğinin tahribatsız yöntemlerle kontrol edilmesi zorunludur. Kazık bütünlüğündeki en ufak bir sapma, deprem anında plastik mafsalları oluşturarak sistemin sismik kapasitesini (ductility) olumsuz etkileyebilir.

İmalat sırasında her bir kazık grubu için alınan taze beton numuneleri üzerinde; kıvam, birim hacim ağırlık ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmalıdır. Özellikle bentonit ve çimento oranlarının, hedeflenen süneklik kriterlerini karşılayıp karşılamadığı, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen elastisite modülü tayini ile teyit edilmelidir. Malzeme özelliklerinin tasarım sınırları içerisinde kalması, sistemin sismik izolasyon kapasitesinin korunması açısından hayati önem taşımaktadır (FHWA, 2005:206).

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, tabakalı zemin profillerinde inşa edilen yapılarda kazıkların zemin iyileştirme performansı; yapıya bağlı ve bağılı olmayan sistemler özelinde, TBDY 2018 kriterleri ve sismik performans hedefleri çerçevesinde irdelenmiştir. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında değişen mühendislik perspektifi doğrultusunda elde edilen temel bulgular ve tasarım önerileri sunulmuştur.

Bağılantısız kazık sistemi bağlantılı kazık sistemine oranla zeminle daha uyumlu bir deformasyon sergilemekte ve deprem ivmesi altında kazık gövdesinde oluşan moment piklerini %20-30 mertebesinde sönümleyerek sismik izolasyon kapasitesini artırmaktadır.

Kazıkların radye temele fiziksel olarak bağlanmadığı sistemler, sismik dalgaların üst yapıya geçişini granüler yastık tabakası içerisinde sönümlemekte ve kazık başlıklarındaki gevrek kırılma riskini rijit bağlı sistemlere göre belirgin şekilde minimize etmektedir (Ghazavi ve Ravanshenas, 2008:420; Cao ve ark., 2004:38).

Tabakalı zeminlerde kazık kullanımı, özellikle yumuşak tabakalardan kaynaklanan diferansiyel oturmaları stabilize ederek, açısal sapma değerlerinin Burland (1995:200) tarafından önerilen 1/500 emniyet sınırları içerisinde kalmasını sağlamaktadır.

Kazıkların rijit bir tabakaya (kireçtaşı) soketlenmesi statik taşıma gücünü artırsa da, sismik bölgelerde soket bölgesindeki ani rijitlik farkının yaratacağı moment yığılmaları göz önünde bulundurulmalı ve tasarım sadece taşıma gücü esaslı değil, deformasyon temelli bir anlayışla optimize edilmelidir.

Belirsizliği yüksek tabakalı zeminlerde, sayısal analiz sonuçlarının sahada inklinometre ve yük hücreleri gibi enstrümantasyon yöntemleriyle doğrulanması, tasarımın dinamik olarak yenilenmesine olanak tanıyan "Gözlemsel Yöntem" felsefesine uygun olarak yürütülmelidir.

Sonuç olarak, zayıf ve tabakalı zeminlerde yapılacak kazıklı temel sistemlerinde bağlantısız kazık sistemi kurgusuyla uygulanması hem yapısal güvenliğin artırılması hem de ekonomik ve sünek bir tasarım elde edilmesi açısından rasyonel bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, farklı yastık tabakası rijitliklerinin sismik dalga sönümleme kapasitesi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

REFERANSLAR

- Bowles, J. E. (1996). Foundation analysis and design (5. Baskı). McGraw-Hill.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumaraswamy, S., & Swolfs, W. (2016). PLAXIS 2D reference manual. Plaxis bv.
- Burland, J. B. (1995). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Proceedings of the International Conference on Damage Assessment of Structures, 118-131.
- Cao, X. D., Wong, I. H., & Chang, M. F. (2004). Behavior of settlement-reducing piles subjected to negative skin friction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(1), 35-44.
- Clough, G. W., & O'Rourke, T. D. (1990). Construction induced movements of in situ walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Geotechnical Special Publication No. 25, 439-470.
- Das, B. M. (2010). Principles of foundation engineering (7. Baskı). Cengage Learning.

- European Committee for Standardization (CEN). (2004). Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules (EN 1997-1). CEN.
- FHWA. (2005). Ground anchors and anchored systems (Rapor No. FHWA-NHI-05-039). Federal Highway Administration.
- Ghazavi, M., & Ravanshenas, P. (2008). Kinematic soil-structure interaction of disconnected piled raft foundations under seismic loads. *Journal of Geotechnical Engineering*, 34(4), 412-425.
- López Jiménez, G. A., & Dias, D. (2022). Dynamic soil–structure interaction effects in buildings founded on vertical reinforcement elements. *CivilEng*, 3(3), 573-593.
- TBDY. (2018). Türkiye bina deprem yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).
- TS EN 1536. (2010). Özel temel kazıkları - fore kazıklar. Türk Standardları Enstitüsü (TSE).
- Wong, I. H., Chang, M. F., & Cao, X. D. (2000). Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering*, 512-519.

Endüstriyel Çelik Yapılarda Korozyonun Yapısal Güvenlik ve İş Sağlığına Etkisi

Özlem AYDIN¹

- 1- Dr. Öğr. Üyesi.; Gedik Üniversitesi Gedik Meslek Yüksek
Okulu. ozlem.aydin@gedik.edu.tr. ORCID No: 0000-0002-9889-4035

ÖZET

Endüstriyel çelik yapılar, maruz kaldıkları çevresel ve işletme koşulları nedeniyle zamanla korozyona uğramakta ve bu durum yapı elemanlarının mekanik özellikleri ile taşıma kapasitelerinde önemli azalmalara yol açmaktadır. Korozyon kaynaklı kesit kaybı, malzeme zayıflaması ve çatlak oluşumu, yapısal bütünlüğün bozulmasına ve ani göçme riskinin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, endüstriyel çelik yapılarda meydana gelen korozyonun yapısal güvenlik ve iş sağlığı üzerindeki etkilerinin derleme niteliğinde sistematik olarak değerlendirilmesidir. Bu kapsamda literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş, korozyon mekanizmaları, hasar türleri ve bu hasarların yapı davranışına etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca korozyon kaynaklı hasarların çalışanlar açısından oluşturduğu riskler; yapısal çökme, ekipman arızaları ve tehlikeli madde sızıntıları bağlamında ele alınmıştır. Bununla birlikte, korozyonun erken tespiti için kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri ve izleme sistemleri değerlendirilmiş, koruyucu kaplama ve katodik koruma gibi önleyici yaklaşımlar incelenmiştir. Elde edilen bulgular, korozyonun yalnızca malzeme performansını değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliğini de doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle, korozyon yönetimi ve düzenli bakım stratejilerinin birlikte uygulanması, endüstriyel tesislerde güvenli ve sürdürülebilir işletme açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yer alan çalışmalar, korozyonun yalnızca malzeme yüzeyinde meydana gelen bir bozunma süreci olmadığını; aynı zamanda yapısal performans, bakım yönetimi ve operasyonel güvenlik üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle endüstriyel tesislerde meydana gelen korozyon kaynaklı arızaların, ekonomik kayıpların yanı sıra çalışan sağlığı ve çevresel güvenlik açısından da önemli sonuçlar doğurduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, korozyonun bütüncül bir mühendislik ve iş sağlığı yaklaşımı ile değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çelik Yapılar, Korozyon, Koruyucu Kaplamalar, Yapısal Güvenlik, Tahribatsız Muayene

GİRİŞ

Çelik yapılar, yüksek dayanım, ekonomik üretim ve geniş uygulama alanları nedeniyle enerji, petrokimya, nükleer ve altyapı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yapılar, maruz kaldıkları çevresel ve işletme koşulları nedeniyle zamanla korozyon kaynaklı bozunmalara uğramaktadır. Korozyon, metalik malzemelerin çevre ile etkileşimi sonucunda gerçekleşen elektrokimyasal bir süreç olup, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli kayıplara yol açmaktadır (Newman, 2010; Stern ve Geary, 1957). Bu durum, endüstriyel sistemlerde korozyonun yalnızca malzeme performansını değil, aynı zamanda güvenli işletimi ve ekonomik sürdürülebilirliği de doğrudan etkileyen kritik bir mühendislik problemi olduğunu göstermektedir.

Endüstriyel ortamlarda korozyon süreci, çoğu zaman tek başına gerçekleşmeyip mekanik yükler, sıcaklık değişimleri ve kimyasal etkileşimlerle birlikte daha karmaşık hasar mekanizmalarına dönüşmektedir. Özellikle çukurcuk korozyonu, lokal hasar bölgeleri oluşturarak çatlak başlangıcını tetikleyen önemli bir mekanizma olarak bilinmektedir (Newman, 2010; Turnbull, 2014). Bu tür lokal hasarlar, korozyon–yorulma etkileşimi ile birleştiğinde çatlak ilerlemesini hızlandırmakta ve ani kırılma riskini artırmaktadır (Turnbull, 2014). Ayrıca hidrojen gevrekleşmesi, yüksek dayanımlı çeliklerde sünekliğin azalmasına ve kırılgan davranışın ortaya çıkmasına neden olan önemli bir hasar mekanizmasıdır (Abebe ve Altuncu, 2024). Bu tür mekanizmalar, korozyonun yalnızca yüzeysel bir problem olmadığını, aynı zamanda malzemenin mikro yapısal özelliklerini etkileyen çok boyutlu bir süreç olduğunu göstermektedir (Abebe ve Altuncu, 2024).

Korozyonun yapısal etkileri yalnızca kesit kaybı ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda taşıma kapasitesinin azalması ve güvenilirlik seviyesinin düşmesi ile sonuçlanmaktadır. Uzun süreli korozyon maruziyeti altında kalan çelik yapı elemanlarında dayanım kaybı meydana geldiği ve bu durumun yapıların kalan ömrünü önemli ölçüde etkilediği literatürde vurgulanmaktadır (Wan, Ma ve Wang, 2026).

Korozyon kaynaklı hasarlar, yalnızca yapısal güvenlik açısından değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği açısından da

ciddi riskler oluşturmaktadır. Endüstriyel tesislerde meydana gelen ekipman arızaları; kimyasal sızıntılar, yangın ve patlama gibi tehlikeli olaylara yol açabilmekte ve çalışanlar için hayati riskler doğurmaktadır (Ayomoh ve Ongwae, 2025). Ayrıca iş ortamında birden fazla risk faktörüne eş zamanlı maruziyetin çalışan sağlığı üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu ve bu maruziyetlerin önemli bir kısmının sağlık problemleriyle istatistiksel olarak ilişkili olduğu literatürde geniş şekilde rapor edilmiştir (Barbey, Bonvallot ve Clerc, 2024).

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel çelik yapılarda korozyon kaynaklı hasarın malzeme davranışı, yapısal güvenlik ve iş sağlığı üzerindeki etkilerini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektir. Bu kapsamda literatürde yer alan çalışmalar sistematik olarak incelenmiş; korozyon mekanizmaları, hasar türleri ve bu hasarların yapı performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca korozyonun neden olduğu riskler iş sağlığı ve güvenliği perspektifinden ele alınmış, koruma ve izleme stratejileri birlikte değerlendirilmiştir.

1. KOROZYON MEKANİZMALARI

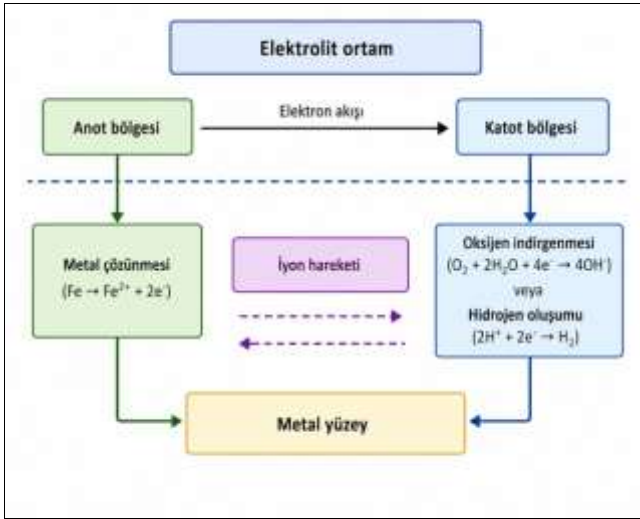
Korozyon, metalik malzemelerin çevre ile etkileşimi sonucu gelişen ve temelde elektrokimyasal reaksiyonlara dayanan bir bozunma sürecidir. Ancak bu süreç, malzeme yüzeyinde dağılım biçimi ve diğer mekanik etkilerle etkileşimi bakımından farklı hasar türleri şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle korozyonun değerlendirilmesinde, sürecin elektrokimyasal temeli ile homojen, lokal ve korozyon–mekanik etkileşimli hasar biçimlerinin birlikte ele alınması gerekmektedir (Newman, 2010; Stern ve Geary, 1957; Turnbull, 2014; Abebe ve Altuncu, 2024).

1.1. Korozyonun Elektrokimyasal Temeli

Korozyon, metalik malzemelerin çevre ile etkileşimi sonucu meydana gelen elektrokimyasal bir bozunma sürecidir. Bu süreç, metal yüzeyinde oluşan anot ve katot bölgeleri arasında gerçekleşen redoks reaksiyonlarına dayanmaktadır. Anodik bölgede metal çözünmesi gerçekleşirken, katodik bölgede genellikle oksijen

indirgenmesi veya hidrojen oluşumu gibi reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar, özellikle elektrolit içeren ortamlarda hızlanarak malzemenin zamanla kütle ve dayanım kaybına uğramasına neden olmaktadır (Newman, 2010; Stern ve Geary, 1957).

Elektron akışı metal içerisinde, iyon hareketi ise elektrolit ortamda gerçekleşmektedir (Newman, 2010; Stern ve Geary, 1957). Elektrokimyasal korozyon mekanizması Şekil 1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1: Elektrokimyasal korozyon mekanizmasının şematik gösterimi

Korozyon sürecinin temelini oluşturan elektrokimyasal davranış, malzemenin polarizasyon karakteristikleri ile açıklanabilmektedir. Stern ve Geary tarafından geliştirilen yaklaşım, korozyon hızının elektrokimyasal ölçümler aracılığıyla belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle akım–potansiyel ilişkisine dayalı olarak korozyon hızının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan temel yöntemlerden biridir (Stern ve Geary, 1957).

Endüstriyel ortamlarda korozyon süreci, yalnızca elektrokimyasal reaksiyonlarla sınırlı kalmayıp; sıcaklık, nem, pH ve agresif iyonların

(özellikle klorür iyonları) varlığı gibi çevresel faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle klorür içeren ortamlarda pasif film tabakasının bozulması, lokal korozyon mekanizmalarının başlamasına neden olabilmektedir (Newman, 2010). Bu durum, korozyon sürecinin homojen olmaktan çıkıp lokal hasar bölgeleri oluşturmaya yol açmaktadır.

Elektrokimyasal korozyon mekanizması, malzemenin mikro yapısı, alaşım bileşimi ve yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Tane sınırları, inklüzyonlar ve yüzey kusurları gibi heterojen yapılar, anod ve katod bölgelerinin oluşumunu kolaylaştırmakta ve korozyonun belirli bölgelerde yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu tür mikroyapısal heterojenlikler, korozyon davranışının öngörülmesini zorlaştıran başlıca faktörler arasında yer almaktadır (Qiu vd., 2022; Xiao vd., 2022; Xiao, Zhou, Liu ve Cao, 2022).

Sonuç olarak, elektrokimyasal korozyon mekanizması, malzeme özellikleri ve çevresel koşulların birlikte etkilediği karmaşık bir süreçtir. Bu mekanizmanın doğru şekilde anlaşılması, korozyon hasarının önlenmesi, uygun malzeme seçimi ve etkili koruma yöntemlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2. Dağılım Biçimine Göre Korozyon Türleri

Elektrokimyasal temelli korozyon, malzeme yüzeyinde her zaman aynı dağılımla gelişmemektedir. Hasarın yüzey boyunca yayılım biçimine göre korozyon, genel olarak homojen ve lokal korozyon şeklinde sınıflandırılmaktadır (Newman, 2010; Costa vd., 2023; Daniel vd., 2023; Machuca vd., 2013).

1.2.1. Homojen Korozyon

Homojen korozyon, malzeme yüzeyinde nispeten eşit dağılımlı malzeme kaybı ile karakterize edilen bir bozunma türüdür. Bu tür korozyonda kesit kaybı yüzey boyunca daha düzenli gelişmekte, bu nedenle ilerleme biçimi lokal korozyona göre daha öngörülebilir olmaktadır. Bununla birlikte uzun süreli maruziyet altında önemli dayanım ve rijitlik kayıplarına yol açabilmektedir (Newman, 2010; Wan, Ma ve Wang, 2026).

1.2.2. Lokal Korozyon Mekanizmaları

Elektrokimyasal korozyon çoğu zaman yüzey boyunca homojen dağılmamakta, belirli bölgelerde yoğunlaşarak lokal hasar mekanizmalarına dönüşmektedir. Bu tür korozyon mekanizmaları, özellikle pasif film tabakasının bozulduğu ortamlarda ortaya çıkmakta ve yapısal bütünlük açısından daha kritik sonuçlara yol açmaktadır.

Çukurcuk korozyonu, metal yüzeyinde küçük ancak derin boşlukların oluşumu ile karakterize edilen bir lokal korozyon türüdür. Bu mekanizma genellikle klorür iyonlarının varlığında pasif film tabakasının lokal olarak bozulması sonucu başlamakta ve kısa sürede ilerleyerek malzeme içinde yüksek gerilme yoğunluklarına neden olmaktadır. Çukurcukların ilerlemesi, çatlak başlangıcı için uygun bir zemin oluşturarak yapısal hasar riskini artırmaktadır (Newman, 2010; Turnbull, 2014).

Yarık korozyonu ise bağlantı elemanları, conta bölgeleri ve dar boşluklar gibi oksijen difüzyonunun sınırlı olduğu alanlarda meydana gelmektedir. Bu bölgelerde oluşan kimyasal dengesizlikler, lokal anot–katot bölgelerinin oluşmasına neden olmakta ve korozyon sürecini hızlandırmaktadır. Bu tür korozyon, özellikle endüstriyel ekipmanlarda gözle görülmesi zor olması nedeniyle önemli bir risk faktörüdür (Costa vd., 2023; Daniel vd., 2023; Machuca vd., 2013).

Tanelerarası korozyon, malzemenin tane sınırlarında meydana gelen ve çoğu zaman mikro yapısal heterojenliklerle ilişkili olan bir korozyon türüdür. Tane sınırlarında oluşan çökelti ve bileşim farklılıkları, bu bölgelerin elektrokimyasal olarak daha aktif hale gelmesine neden olmakta ve korozyonun bu bölgelerde yoğunlaşmasına yol açmaktadır (Qiu vd., 2022; Xiao vd., 2022; Xiao, Zhou, Liu ve Cao, 2022). Bu durum, malzemenin makro ölçekte sağlam görünmesine rağmen iç yapısında ciddi dayanım kayıplarına neden olabilmektedir.

1.2.3. Korozyon – mekanik etkileşimli hasar mekanizmaları

Endüstriyel ortamlarda korozyon genellikle mekanik yükler ile birlikte etkisini göstererek çevre destekli kırılma ve korozyon–yorulma gibi birleşik hasar mekanizmalarına yol açmaktadır. Bu

mekanizmalar, malzeme davranışını daha karmaşık hale getirerek ani ve öngörülemeyen kırılma risklerini artırmaktadır.

Korozyon–yorulma, tekrarlı yükler altında çalışan yapı elemanlarında korozyonun çatlak başlatma ve ilerleme sürecini hızlandırması ile ortaya çıkmaktadır. Korozyon ortamı, yüzeyde mikro çatlakların oluşumunu kolaylaştırmakta ve bu çatlakların daha düşük gerilme seviyelerinde ilerlemesine neden olmaktadır (Turnbull, 2014).

Gerilme korozyonu çatlaması (SCC), çevre destekli çatlama mekanizmaları kapsamında çekme gerilmeleri ile korozyon ortamının birlikte etkisi sonucu meydana gelen ve genellikle ani kırılma ile sonuçlanan tehlikeli bir hasar mekanizmasıdır. Bu mekanizma, özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde ve agresif kimyasal ortamlarda daha yaygın olarak görülmektedir.

Hidrojen gevrekleşmesi, metal içerisine difüze olan hidrojen atomlarının malzemenin sünekliğini azaltarak kırılma davranışına neden olması ile ortaya çıkmaktadır. Bu süreç, mikro yapıda çatlak oluşumunu kolaylaştırmakta ve çatlak ilerleme hızını artırmaktadır (Abebe ve Altuncu, 2024). Özellikle kaynaklı birleşimler ve yüksek dayanımlı alaşımlar bu tür hasarlara karşı daha hassastır.

Bu tür korozyon mekanizmalarının doğru şekilde anlaşılması, yalnızca hasarın tanımlanması açısından değil, aynı zamanda uygun malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve bakım stratejilerinin geliştirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Farklı korozyon türlerinin çoğu zaman birlikte etkili olduğu göz önüne alındığında, korozyon davranışının bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir.

Çelik yapılarda korozyon, temelde elektrokimyasal bir süreç olarak gelişmekte; hasarın yüzeyde dağılım biçimine göre homojen ve lokal korozyon türleri ile korozyon–mekanik etkileşimli hasar mekanizmaları şeklinde sınıflandırılabilir (Newman, 2010; Turnbull, 2014; Abebe ve Altuncu, 2024; Qiu vd., 2022; Xiao vd., 2022; Xiao, Zhou, Liu ve Cao, 2022; Costa vd., 2023; Daniel vd., 2023; Machuca vd., 2013). Bu sınıflandırma Şekil 2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2: Çelik yapılarda korozyonun elektrokimyasal temeli ile homojen, lokal ve korozyon-mekanik etkileşimli hasar biçimlerinin şematik sınıflandırılması

Şekil 2’de verilen sınıflandırma, korozyonun farklı oluşum mekanizmalarına rağmen yapısal güvenlik ve iş sağlığı açısından birbiriyle ilişkili sonuçlar doğurabildiğini göstermektedir.

Bu sınıflandırma, korozyonun yalnızca malzeme yüzeyinde meydana gelen bir bozunma süreci olmadığını, aynı zamanda farklı fiziksel ve mekanik etkilerle etkileşerek çok yönlü bir hasar mekanizmasına dönüştüğünü göstermektedir. Özellikle lokal korozyon türlerinin, yapısal elemanlarda gerilme yoğunlaşmalarını artırarak çatlak oluşumunu tetiklemesi, bu hasarların mühendislik açısından daha kritik hale gelmesine neden olmaktadır (Newman, 2010; Turnbull, 2014). Bunun yanı sıra, korozyon-mekanik etkileşimli hasar mekanizmalarının varlığı, malzemenin davranışını daha karmaşık hale getirmekte ve yapı elemanlarının servis ömrünün öngörülmesini zorlaştırmaktadır (Abebe ve Altuncu, 2024). Bu nedenle, korozyonun değerlendirilmesinde yalnızca hasarın türü değil, aynı zamanda oluşum mekanizmaları ve yapısal etkilerinin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Çelik yapılarda yaygın olarak karşılaşılan korozyon türleri ve bu türlerin yapısal etkileri literatürde kapsamlı şekilde incelenmiştir

(Newman, 2010; Turnbull, 2014; Abebe ve Altuncu, 2024; Qiu vd., 2022; Xiao vd., 2022; Xiao, Zhou, Liu ve Cao, 2022; Costa vd., 2023; Daniel vd., 2023; Machuca vd., 2013). Bu kapsamda, yaygın korozyon türleri ve etkileri Tablo 1’de özetlenmiştir.

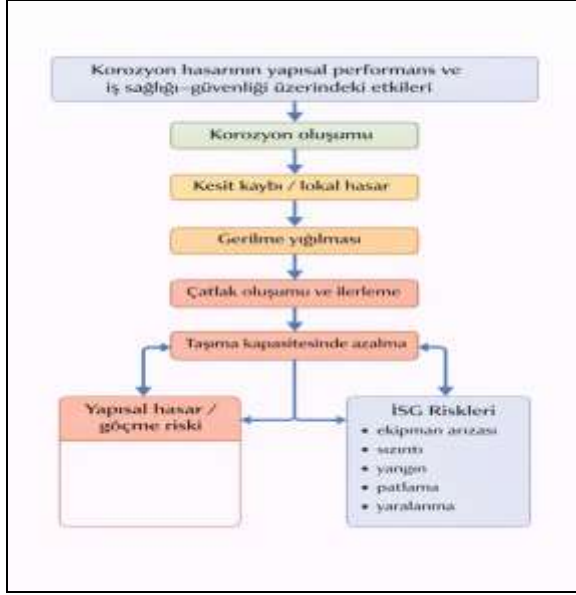
Tablo 1. Çelik yapılarda yaygın korozyon türleri ve etkileri

Korozyon Türü	Mekanizma	Yapısal Etki	Risk Düzeyi
Çukurcuk korozyonu	Pasif film tabakasının lokal bozulması ve klorür iyonlarının etkisi ile derin çukur oluşumu	Lokal kesit kaybı ve gerilme yığılması	Yüksek
Yarık korozyonu	Oksijen difüzyonunun sınırlı olduğu dar bölgelerde elektrokimyasal dengesizlik	Bağlantı bölgelerinde gizli hasar	Yüksek
Tanelerarası korozyon	Tane sınırlarında kimyasal heterojenlik ve çökelti oluşumu	İç yapı zayıflaması ve dayanım kaybı	Orta–yüksek
Gerilme korozyonu çatlaması (SCC)	Çekme gerilmesi ve korozif ortamın birlikte etkisi	Ani ve gevrek kırılma	Çok yüksek

Korozyon– yorulma	Tekrarlı yükler ile korozyonun birlikte etkisi	Çatlak başlatma ve hızlı ilerleme	Yüksek
----------------------	--	--------------------------------------	--------

Tablo 1’de özetlenen korozyon türleri, çelik yapılarda karşılaşılan başlıca hasar mekanizmalarını ve bu mekanizmaların yapısal etkilerini sistematik bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu türlerin çoğu, tek başına etkili olabildiği gibi, gerçek endüstriyel ortamlarda çoğunlukla birlikte meydana gelmekte ve hasarın şiddetini artırmaktadır. Özellikle lokal korozyon türlerinin çatlak oluşumu ile birleşmesi, yapı elemanlarında ani ve öngörülemeyen hasarlara yol açabilmektedir (Newman, 2010; Turnbull, 2014). Bu nedenle, korozyon türlerinin birlikte değerlendirilmesi, yapısal güvenliğin doğru analiz edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Korozyon süreci sonucunda meydana gelen malzeme bozunması, yalnızca yüzeysel bir etki ile sınırlı kalmayıp, zamanla kesit kaybı, gerilme yığılması ve çatlak oluşumu gibi mekanizmalar aracılığıyla yapı elemanlarının taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır (Newman, 2010; Turnbull, 2014; Gocál ve Odrobiňák, 2020). Bu sürecin yapısal performans ve iş sağlığı–güvenliği üzerindeki etkileri Şekil 3’te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3: Korozyon hasarının kesit kaybı, gerilme yığılması ve çatlak oluşumu üzerinden taşıma kapasitesine ve İSG risklerine etkisinin şematik gösterimi

2. KOROZYONUN YAPISAL GÜVENLİĞE ETKİLERİ

Korozyon, çelik yapı elemanlarında yalnızca yüzeysel bir bozunma oluşturmakla kalmayıp, aynı zamanda taşıyıcı sistemin bütünlüğünü doğrudan etkileyen önemli bir hasar mekanizmasıdır. Korozyon süreci sonucunda meydana gelen kesit kaybı, yapı elemanlarının taşıma kapasitesinde azalmaya neden olmakta ve bu durum yapıların güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Wan, Ma ve Wang, 2026; Gocál ve Odrobiňák, 2020). Özellikle uzun süreli korozyon maruziyeti altında kalan elemanlarda, dayanım kaybının zamanla arttığı ve bu durumun yapıların kalan ömrünü belirgin şekilde azalttığı literatürde vurgulanmaktadır (Di Sarno, Majidian ve Karagiannakis, 2021).

Korozyon hasarının yapısal etkileri yalnızca kesit kaybı ile sınırlı değildir. Lokal korozyon türleri (çukurcuk ve yarık korozyonu gibi), malzeme yüzeyinde gerilme yoğunlaşmalarına neden olarak

çatlak oluşumunu tetikleyebilmektedir (Newman, 2010; Turnbull, 2014). Bu tür hasarlar, özellikle dinamik yükler altında çalışan yapılarda daha kritik hale gelmekte ve ani kırılma riskini artırmaktadır. Çukurcuk korozyonunun küçük fakat derin hasar bölgeleri oluşturması, bu bölgelerin çatlak başlangıç noktaları haline gelmesine neden olmakta ve yapısal bütünlük açısından önemli bir zafiyet oluşturmaktadır (Newman, 2010; Turnbull, 2014).

Buna ek olarak, korozyon-mekanik etkileşimli hasar mekanizmaları, yapı elemanlarının davranışını daha da karmaşık hale getirmektedir. Korozyon-yorulma ve gerilme korozyonu çatlaması gibi mekanizmalar, malzemenin beklenenden daha düşük gerilme seviyelerinde çatlak başlatabilmekte ve servis ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır (Turnbull, 2014; Abebe ve Altuncu, 2024).

Korozyonun ilerlemesi ile birlikte yapı elemanlarında rijitlik ve mekanik özelliklerde önemli değişimler meydana gelmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar, korozyon oranı arttıkça akma dayanımı, çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerin belirgin şekilde azaldığını göstermektedir. Bu durum, yapı elemanlarının yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda deformasyon kapasitesini de olumsuz yönde etkilemektedir (Zhao ve Zhang, 2023).

Özellikle ince kesitli elemanlarda meydana gelen malzeme kaybı, burkulma dayanımını azaltmakta ve stabilite problemlerine yol açabilmektedir. Korozyon nedeniyle oluşan kesit kayıplarının, yapı elemanlarının stabilitesini düşürdüğü ve bazı durumlarda göçmeye kadar ilerleyen hasarlara neden olduğu gösterilmiştir (Alemdar ve Alemdar, 2023). Ayrıca korozyonun düzensiz ve lokal karakterde olması, hasarın homojen dağılmamasına ve yapısal davranışın öngörülmesini zorlaştırmasına neden olmaktadır (Fan vd., 2023).

Sonuç olarak, korozyonun yapısal güvenlik üzerindeki etkileri çok boyutlu olup, yalnızca malzeme kaybı ile sınırlı olmayan karmaşık bir süreci kapsamaktadır. Bu nedenle, korozyon hasarının doğru şekilde değerlendirilmesi, izlenmesi ve önlenmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi, yapıların güvenli ve sürdürülebilir işletimi açısından büyük önem taşımaktadır (Huang vd., 2025).

3. KOROZYONUN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİNE ETKİLERİ

Korozyon kaynaklı hasarlar, yalnızca yapısal performans açısından değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği açısından da önemli riskler oluşturmaktadır. Endüstriyel tesislerde kullanılan boru hatları, basınçlı kaplar ve taşıyıcı sistemlerde meydana gelen korozyon hasarları; sızıntı, ekipman arızası ve yapısal bütünlük kaybı gibi sonuçlara yol açabilmektedir. Bu tür hasarlar, özellikle kimyasal madde içeren sistemlerde ciddi kazalara neden olabilmekte ve çalışanlar için hayati tehlikeler oluşturabilmektedir (Ayomoh ve Ongwae, 2025; Chen vd., 2024; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013).

Korozyonun neden olduğu ekipman arızaları, çoğu zaman hızlı gelişen ve kontrol edilmesi güç olaylar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle basınçlı sistemlerde meydana gelen malzeme zayıflamaları, patlama ve yangın gibi büyük endüstriyel kazaların tetikleyicisi olabilmektedir (Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013; Carson, 2015). Bu tür olaylar, yalnızca çalışan sağlığını değil, aynı zamanda çevresel güvenliği ve tesis bütünlüğünü de tehdit etmektedir. Bu nedenle korozyon, endüstriyel risk değerlendirme süreçlerinde kritik bir tehlike kaynağı olarak ele alınmaktadır (Ayomoh ve Ongwae, 2025; Chen vd., 2024; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013).

Buna ek olarak, korozyon süreçleri sonucunda ortaya çıkan sızıntılar ve malzeme bozunmaları, çalışma ortamında kimyasal maruziyet risklerini artırmaktadır. Özellikle birden fazla kimyasalın bulunduğu ortamlarda, eş zamanlı maruziyet durumları çalışan sağlığı üzerinde daha karmaşık ve ciddi etkiler oluşturabilmektedir. Literatürde, kimyasal maruziyetleri de içeren çoklu mesleki maruziyetlerin çeşitli sağlık problemleri ile istatistiksel olarak ilişkili olduğu ve bu durumun mesleki riskleri artırdığı belirtilmektedir (Barbey, Bonvallot ve Clerc, 2024; Palmer, Odesola ve Ekpenkhio, 2024).

Korozyon hasarının erken aşamalarda tespit edilememesi, risklerin zamanla büyümesine ve daha ciddi sonuçlar doğurmasına neden olmaktadır. Bu nedenle tahribatsız muayene yöntemleri ve yapısal sağlık izleme sistemleri, iş sağlığı ve güvenliği açısından önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır. Ultrasonik kalınlık ölçümü,

eddy akım testleri ve sensör tabanlı izleme sistemleri sayesinde korozyon hasarları erken aşamada tespit edilebilmekte ve gerekli önleyici bakım faaliyetleri zamanında gerçekleştirilebilmektedir (Nugroho vd., 2023; Salgueiro vd., 2024; Huang vd., 2025).

Tahribatsız muayene yöntemleri, korozyon hasarının erken aşamada belirlenmesine olanak sağlayarak bakım ve onarım süreçlerinin daha etkin planlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu yöntemler, malzemeye zarar vermeden iç ve dış yapı hakkında bilgi elde edilmesini mümkün kılmakta ve özellikle kritik altyapı sistemlerinde güvenliğin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır (Nugroho vd., 2023; Salgueiro vd., 2024; Huang vd., 2025). Farklı yöntemlerin sahip olduğu avantaj ve sınırlamalar, kullanım alanına bağlı olarak değişmekte olup, uygun yöntemin seçimi doğru değerlendirme açısından büyük önem taşımaktadır.

Korozyon hasarının erken tespitinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri farklı avantaj ve sınırlamalara sahiptir ve bu yöntemler literatürde kapsamlı şekilde ele alınmıştır (Nugroho vd., 2023; Salgueiro vd., 2024; Huang vd., 2025). Bu yöntemlerin karşılaştırılması Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Korozyon tespitinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanı
Ultrasonik kalınlık ölçümü	Yüksek doğruluk, kalınlık ölçümünde etkin	Yüzey hazırlığı gerektirir	Boru hatları, tanklar
Eddy akım testleri	Yüzey ve yüzeye yakın hatalara duyarlı	Derin hatalarda sınırlı	Kaplamalı yüzeyler

Radyografik test	İç yapı kusurlarını gösterir	Yüksek maliyet, güvenlik gereksinimi	Kaynaklı bağlantılar
Manyetik parçacık testi	Yüzey çatlaklarını hızlı tespit	Sadece ferromanyetik malzemeler	Çelik yapı elemanları
Fiber optik sensörler	Gerçek zamanlı izleme	Yüksek kurulum maliyeti	Kritik altyapı sistemleri

Sonuç olarak, korozyon yalnızca teknik bir malzeme problemi değil, aynı zamanda yapısal bütünlüğü ve operasyonel güvenliği doğrudan etkileyen kritik bir risk faktörüdür. Bu nedenle, korozyon kontrolü ve izleme faaliyetlerinin etkin şekilde yürütülmesi, güvenli çalışma ortamlarının sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır (Chen vd., 2024).

4. KOROZYONUN KONTROLÜ VE ÖNLENMESİ

Korozyonun neden olduğu yapısal hasarların ve iş sağlığı risklerinin azaltılabilmesi için, etkin korozyon kontrol ve önleme stratejilerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, yüksek kaliteli malzeme seçimi, korozyona dayanıklı tasarım yaklaşımları, koruyucu kaplama sistemleri ve katodik koruma yöntemleri gibi mühendislik çözümleri ön plana çıkmaktadır (Chen vd., 2024; Saikia vd., 2025; Guo vd., 2024).

Uygun malzeme seçimi, korozyon direncinin artırılmasında en temel yaklaşımlardan biridir. Özellikle paslanmaz çelikler, alaşımlı çelikler ve korozif ortamlara dayanıklı malzemelerin tercih edilmesi, yapı elemanlarının servis ömrünü önemli ölçüde uzatabilmektedir (Qiu vd., 2022; Guo vd., 2024; Ren vd., 2023). Bununla birlikte, malzeme seçiminde yalnızca mekanik özellikler değil, aynı zamanda

çalışma ortamının kimyasal ve fiziksel koşulları da dikkate alınmalıdır (Guo vd., 2024).

Tasarım aşamasında alınacak önlemler de korozyonun önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Su birikmesine neden olabilecek geometrik detayların önlenmesi, drenaj sistemlerinin doğru şekilde tasarlanması ve galvanik korozyona yol açabilecek farklı metallerin temasının sınırlandırılması, korozyon riskini azaltan önemli tasarım yaklaşımları arasında yer almaktadır (Saikia vd., 2025; He, 2025; Krolkowska ve Bonora, 2023; Stormtech, 2024).

Koruyucu kaplama sistemleri, çelik yüzeylerin çevresel etkilerden izole edilmesini sağlayarak korozyonun önlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, metal yüzey ile korozif ortam arasında fiziksel bir bariyer oluşturarak korozyon sürecini geciktirmekte ve yapı elemanlarının servis ömrünü artırmaktadır (Shevtsov vd., 2022; Popova, Montemor ve Prošek, 2024).

Bununla birlikte, fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve termal sprey kaplama teknikleri gibi ileri yüzey mühendisliği yöntemleri, geleneksel kaplama sistemlerine kıyasla daha gelişmiş koruyucu özellikler sunmaktadır. Bu teknikler ile elde edilen kaplamalar, yüzey üzerinde daha homojen ve yoğun bir yapı oluşturarak korozif türlerin malzeme yüzeyine ulaşmasını zorlaştırmakta ve böylece korozyon direncini önemli ölçüde artırmaktadır (D'Avico vd., 2019; Chicet vd., 2025).

Katodik koruma yöntemleri, özellikle boru hatları, deniz yapıları ve gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal yüzeyin katot haline getirilmesi prensibine dayanmakta olup, galvanik anotlar veya dış akım kaynakları kullanılarak uygulanabilmektedir. Katodik koruma, özellikle elektrolit içeren ortamlarda oldukça etkili bir korozyon önleme yöntemidir (Guo vd., 2024; Su vd., 2025).

Bunun yanı sıra, düzenli bakım ve periyodik denetim faaliyetleri, korozyon hasarının erken aşamada tespit edilmesini sağlayarak daha büyük hasarların önüne geçilmesine katkı sağlamaktadır. Tahribatsız muayene yöntemleri ve yapısal sağlık izleme sistemleri ile desteklenen bakım stratejileri, korozyon yönetiminin etkinliğini artırmaktadır (Nugroho vd., 2023; Salgueiro vd., 2024; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013).

Bu kapsamda, korozyonun önlenmesi tek bir yönteme bağlı olmayıp, malzeme, tasarım, koruma ve bakım süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirmektedir. Bu yaklaşım, hem yapısal güvenliğin sağlanması hem de iş sağlığı ve güvenliği risklerinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir (Ma vd., 2025; Proşek, Keil ve Popova, 2025).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel  elik yapılarda meydana gelen korozyonun yapısal güvenlik ve iş sağlığı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, korozyonun yalnızca malzeme yüzeyinde meydana gelen bir bozunma süreci olmadığını, aynı zamanda yapı elemanlarının mekanik özelliklerini, taşıma kapasitesini ve stabilitesini doğrudan etkileyen kritik bir hasar mekanizması olduğunu ortaya koymaktadır.

Korozyonun özellikle lokal hasar mekanizmaları, korozyon-yorulma etkileşimi ve gerilme korozyonu çatlaması gibi süreçlerle birleşmesi, yapı elemanlarında ani ve öngörülemeyen kırılma risklerini artırmaktadır. Bu durum, yapıların güvenilirliğinin azalmasına ve servis ömrünün önemli ölçüde kısalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, korozyon hasarının değerlendirilmesinde yalnızca yüzeysel malzeme kayıplarının değil, aynı zamanda bu hasarların tetiklediği mekanik etkilerin de dikkate alınması gerekmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirildiğinde, korozyon kaynaklı hasarların ekipman arızaları, kimyasal sızıntılar, yangın ve patlama gibi ciddi endüstriyel kazalara yol açabildiği görülmektedir. Bu tür riskler, korozyonun yalnızca mühendislik problemi değil, aynı zamanda çok disiplinli bir güvenlik sorunu olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Korozyonun kontrolü ve önlenmesi kapsamında, uygun malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu, koruyucu kaplama sistemleri, katodik koruma yöntemleri ve düzenli bakım stratejilerinin birlikte uygulanmasının etkin bir yaklaşım s nd ğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, tahribatsız muayene yöntemleri ve yapısal sağlık izleme sistemleri, korozyon hasarının erken tespiti ve risklerin azaltılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, korozyonun etkilerinin azaltılabilmesi için malzeme, tasarım, koruma ve bakım süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. Bu yaklaşım, hem yapısal güvenliğin sağlanması hem de iş sağlığı ve güvenliği risklerinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, veri temelli izleme sistemleri ile risk temelli bakım yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesi ve farklı endüstriyel ortamlar için özelleştirilmiş korozyon yönetim stratejilerinin geliştirilmesi, gelecekteki çalışmalar açısından önem taşımaktadır.

REFERANSLAR

- Abebe, B. A., & Altuncu, E. (2024). A review on hydrogen embrittlement behavior of steel structures and measurement methods. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 8(2), 91–101. <https://doi.org/10.35860/iarej.1414085>
- Alemdar, Z. F., & Alemdar, F. (2023). Investigation of corrosion effects on collapse of truss structures. *Buildings*, 13(3), 826. <https://doi.org/10.3390/buildings13030826>
- Ayomoh, M., & Ongwae, B. (2025). A systematic review of asset integrity and process safety management sustainability for onshore petrochemical installations. *Sustainability*, 17, 286. <https://doi.org/10.3390/su17010286>
- Barbey, C., Bonvallot, N., & Clerc, F. (2024). Health outcomes related to multiple exposures in occupational settings: A review. *Safety and Health at Work*, 15, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.10.004>
- Carson, P. (2015). Methanol tank explosion and fire — the role of corrosion. *Loss Prevention Bulletin*, 246, 24–27.
- Chen, J., Zhou, L., Liu, Y., & Wang, Y. (2024). A safety risk analysis of a steel-structure building using an improved controlled interval and memory model. *Buildings*, 14(6), 1553. <https://doi.org/10.3390/buildings14061553>
- Chicet, D. L., Juhasz, J., Cotrut, C. M., Istrate, B., & Munteanu, C. (2025). Assessment of the corrosion resistance of thermal barrier coatings on internal combustion engine components. *Materials*, 18, 1227. <https://doi.org/10.3390/ma18061227>

- Costa, E. M., Dedavid, B. A., Santos, C. A., Lopes, N. F., Fraccaro, C., Pagartanidis, T., & Lovatto, L. P. (2023). Crevice corrosion on stainless steels in oil and gas industry: A review of techniques for evaluation, critical environmental factors and dissolved oxygen. *Engineering Failure Analysis*, 144, 106955. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106955>
- Daniel, E. F., Wang, C., Li, C., Dong, J., Zhang, D., Zhong, W., Zhong, S., Udoh, I. I., & Okafor, P. C. (2023). Synergistic effect of crevice corrosion and galvanic coupling on 304SS fasteners degradation in chloride environments. *npj Materials Degradation*, 7(1), 11. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00327-8>
- Di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The effect of atmospheric corrosion on steel structures: A state-of-the-art and case-study. *Buildings*, 11(12), 571. <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>
- D'Avico, L., Beltrami, R., Lecis, N., & Trasatti, S. P. (2019). Corrosion behavior and surface properties of PVD coatings for mold technology applications. *Coatings*, 9(1), 7. <https://doi.org/10.3390/coatings9010007>
- Fan, Y., Pan, J., Wu, Z., Li, B., & Wang, Z. (2023). A method for predicting the corrosion behavior of structural steel under atmosphere. *Buildings*, 13(1), 253. <https://doi.org/10.3390/buildings13010253>
- Gocál, J., & Odrobiňák, J. (2020). On the influence of corrosion on the load-carrying capacity of old riveted bridges. *Materials*, 13(3), 717. <https://doi.org/10.3390/ma13030717>
- Guo, Z., Xiao, Z., Chen, H., Zhou, X., Wang, P., Luo, J., Gao, Y., & Shang, H. (2024). Review of cathodic protection technology for steel rebars in concrete structures in marine environments. *Applied Sciences*, 14, 9062. <https://doi.org/10.3390/app14199062>
- He, D. (2025). Review of corrosion evaluation methods for steel reinforcement in concrete. *Corrosion and Materials Degradation*, 6, 37. <https://doi.org/10.3390/cmd6030037>
- Huang, X., Duan, Z., Hao, S., Hou, J., Chen, W., & Cai, L. (2025). A deep learning framework for corrosion assessment of steel structures using inception v3 model. *Buildings*, 15, 512. <https://doi.org/10.3390/buildings15040512>

- Krolikowska, A., & Bonora, P. L. (2023). Corrosion hazards in urban infrastructure structures using the example of the Al Bayt Stadium in Qatar. *Coatings*, 13, 1443. <https://doi.org/10.3390/coatings13081443>
- Ma, J., Yang, Q., Peng, X., & Xia, K. (2025). Review on durability deterioration and mitigation of concrete structures. *Coatings*, 15(9), 982. <https://doi.org/10.3390/coatings15090982>
- Machuca, L. L., Bailey, S. I., Gubner, R., Watkin, E. L. J., Ginige, M. P., Kaksonen, A. H., & Heidersbach, K. (2013). Effect of oxygen and biofilms on crevice corrosion of UNS S31803 and UNS N08825 in natural seawater. *Corrosion Science*, 67, 242–255. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.023>
- Newman, R. (2010). Pitting corrosion of metals. *Electrochemical Society Interface*, 33–38.
- Nugroho, A. C. P. T., Sasmito, C., Fuadi, A. P., Hendrik, D., Rahadi, C. W. K., Permana, R. D., & Fuadi, N. M. R. (2023). Corrosion rate analysis and prediction of the remaining life of the research vessel to improve ship safety aspects. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 22(2), 68–75. <https://doi.org/10.20961/mekanika.v22i2.75062>
- Palmer, I. I., Odesola, A. S., & Ekpenkhio, J. E. (2024). Chemical exposure in workplace environments: Assessing health risks and developing safety measures. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 9(11), 229–238. <https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2024.911020>
- Popova, K., Montemor, M. F., & Prošek, T. (2024). Application of resistometric sensors for real-time corrosion monitoring of coated materials. *Corrosion and Materials Degradation*, 5, 573–592. <https://doi.org/10.3390/cmd5040026>
- Prošek, T., Keil, P., & Popova, K. (2025). Corrosion protection and sustainability: Why are the two concepts inherently intertwined. *Corrosion and Materials Degradation*, 6, 38. <https://doi.org/10.3390/cmd6030038>
- Qiu, Y., Liu, R., Zou, L., Chi, H., Wang, C., Wang, B., & Chen, J. (2022). Influence of grain boundary precipitates on intergranular corrosion behavior of 7050 Al alloys. *Coatings*, 12, 249. <https://doi.org/10.3390/coatings12020249>

- Ren, Z., Fang, L., Wang, H., Ding, P., & Zeng, X. (2023). Seawater corrosion resistance of duplex stainless steel and the axial compressive stiffness of its reinforced concrete columns. *Materials*, 16, 7249. <https://doi.org/10.3390/ma16237249>
- Salgueiro, F., Ribeiro, M., Carvalho, A., Covas, G., Baltzersen, Ø., & Proença, C. S. (2024). Monitoring of wall thickness to predict corrosion in marine environments using ultrasonic transducers. *NDT*, 2, 255–269. <https://doi.org/10.3390/ndt2030016>
- Saikia, M., Dutta, T., Jadhav, N., & Kalita, D. J. (2025). Insights into the development of corrosion protection coatings. *Polymers*, 17, 1548. <https://doi.org/10.3390/polym17111548>
- Shevtsov, D., Cao, N. L., Nguyen, V. C., Nong, Q. Q., Le, H. Q., Nguyen, D. A., Zartsyn, I., & Kozaderov, O. (2022). Progress in sensors for monitoring reinforcement corrosion in reinforced concrete structures—A review. *Sensors*, 22, 3421. <https://doi.org/10.3390/s22093421>
- Stern, M., & Geary, A. L. (1957). Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of The Electrochemical Society*, 104(1), 56–63. <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
- Stormtech. (2024). Preventing corrosion in construction: Strategies for material compatibility and maintenance. Stormtech Pty Ltd. <https://www.stormtech.com.au>
- Su, Y., Majdabadi Farahani, E., Huang, Q., & Zhou, Q. (2025). AC-induced corrosion of cathodically protected pipelines: Experimental study and probabilistic modeling. *Corrosion and Materials Degradation*, 6, 26. <https://doi.org/10.3390/cmd6020026>
- Turnbull, A. (2014). Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. *Proceedings of the Royal Society A*, 470, 20140254. <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0254>
- Wan, Y., Ma, J., & Wang, C. (2026). Research on the remaining life assessment method of corrosive steel pipe structures in substations based on thickness measurement and testing. *Journal of Measurements in Engineering*. <https://doi.org/10.21595/jme.2026.25092>
- Wood, M. H., Vetere Arellano, A. L., & Van Wijk, L. (2013). Corrosion-related accidents in petroleum refineries: Lessons learned from

- accidents in EU and OECD countries (EUR 26331 EN). European Commission, Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2788/37909>
- Xiao, X., Zhou, Z., Liu, C., & Cao, L. (2022). Microstructure and its effect on the intergranular corrosion properties of 2024-T3 aluminum alloy. *Crystals*, 12, 395. <https://doi.org/10.3390/cryst12030395>
- Xiao, Z., Huang, Y., Liu, Z., Hu, W., Wang, Q., & Hu, C. (2022). The role of grain boundaries in the corrosion process of Fe surface: Insights from ReaxFF molecular dynamic simulations. *Metals*, 12, 876. <https://doi.org/10.3390/met12050876>
- Zhao, N., & Zhang, C. (2023). Experimental investigation of the mechanical behavior of corroded Q345 and Q420 structural steels. *Buildings*, 13(2), 475. <https://doi.org/10.3390/buildings13020475>

Betonarme Kolonların Çarpma Yükleri Altındaki Davranışı ve Güçlendirme Yöntemleri

Ayça AKBAŞ¹

Özlem ÇALIŞKAN²

- 1- Yüksek İnşaat Mühendisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD. aycakbas26@gmail.com ORCID No: 0000-0003-4810-4952
- 2- Doç. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-5272-9552

ÖZET

Yapılar, servis ömürleri boyunca yalnızca statik yükler altında değil, aynı zamanda deprem, patlama ve çarpma gibi dinamik etkiler altında da kalabilmektedir. Bu tür yüklemeler, kısa sürede yüksek enerji transferi oluşturmaları nedeniyle yapı elemanlarında ani hasarlara yol açabilmektedir. Betonarme kolonlar, taşıyıcı sistemin en kritik elemanları arasında yer aldığından, bu tür etkiler altında yapının genel güvenliği açısından belirleyici rol oynamaktadır. Çarpma yükleri; araç çarpması, gemi çarpması, düşen cisimler ve patlama etkileri gibi çeşitli senaryolar sonucu ortaya çıkabilmektedir. Bu yükler altında kolon davranışı, yüksek hız, ani kuvvet artışı ve karmaşık gerilme dağılımları ile karakterize edilmekte olup, statik yükleme durumlarından önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, betonarme kolonların çarpma etkileri altındaki performansını artırmak amacıyla çeşitli güçlendirme yöntemlerinin geliştirildiğini göstermektedir. Özellikle lif takviyeli polimerler ve gelişmiş kompozit sistemler, kolonların enerji yutma kapasitesini artırarak çarpma direncini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu çalışmada, betonarme kolonların çarpma davranışı ve bu davranışın iyileştirilmesine yönelik güçlendirme teknikleri literatür kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler – Çarpma Yüğü, Betonarme Kolon, Dinamik Davranış, Güçlendirme, Enerji Yutma Kapasitesi

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünya genelinde mevcut yapı stokunun büyük bir bölümünü betonarme yapılar oluşturmaktadır. Bu yapıların tasarım ve inşası sırasında güvenilirlik, ekonomiklik ve estetiklik gibi temel mühendislik ilkeleri dikkate alınmaktadır. Ancak betonarme yapıların yalnızca tasarım ve yapım aşamaları değil, aynı zamanda servis ömürleri boyunca güvenli bir şekilde hizmet verebilmeleri de büyük önem taşımaktadır. Buna karşın, çeşitli statik ve dinamik etkiler, yapıların performansını olumsuz yönde etkileyebilmekte ve bu durum, yapı elemanlarının güçlendirilmesini gerekli kılabilir.

Geleneksel betonarme yapı tasarımında, sabit ve hareketli yüklerin yanı sıra deprem ve rüzgâr gibi yatay dinamik etkiler dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, yapılar kullanım ömürleri boyunca bu yüklerin ötesinde, ani ve impulsif karaktere sahip çarpma ve patlama gibi kısa süreli ancak yüksek enerjili yüklemelere de maruz kalabilmektedir. Özellikle araç çarpması gibi senaryolar, taşıyıcı sistemin kritik elemanları olan kolonlarda ciddi yapısal hasarlara ve hatta göçmelere neden olabilmektedir. Bu nedenle,

kolonların çarpma yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi ve bu etkilerin tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır (Yılmaz, 2018:2). Son yıllarda, beton ve betonarme yapı elemanlarının çarpma yükleri altındaki dinamik tepkileri ve göçme mekanizmalarını inceleyen analitik, sayısal ve deneysel çalışmaların sayısında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton kolonlar, prefabrik segmental kolonlar, lif takviyeli polimer kompozitlerle güçlendirilmiş kolonlar ve çelik boru ile güçlendirilmiş beton kolonlar gibi farklı sistemlerin çarpma ve patlama etkileri altındaki davranışları çeşitli araştırmalarda ele alınmıştır (Yılmaz vd., 2019:1359).

Taşıyıcı sistemin sürekliliğini sağlayan en kritik yapı elemanlarından biri olan kolonların, darbe etkilerine karşı yeterli performansı göstermesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yapı bütünlüğünün korunabilmesi amacıyla betonarme kolonların çarpma yükleri altındaki dayanımını artırmaya yönelik çeşitli güçlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Özellikle sürdürülebilir, yangına dayanıklı ve çevresel etkileri sınırlı malzeme sistemleri ile gerçekleştirilen güçlendirme uygulamaları dikkat çekmektedir. Son yıllarda araştırmacılar, bu doğrultuda kompozit malzemelere yönelmiş; elyaf takviyeli polimerler (FRP), tekstil takviyeli harç sistemleri (TRM) ve mühendislik çimentolu kompozitler (ECC) ile güçlendirme yöntemleri yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır (Mercimek vd., 2024:2).

Bu çalışmada, betonarme kolonların çarpma yükleri altındaki davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmekte ve bu tür yüklemeler altında oluşan hasar mekanizmaları detaylı olarak ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında, çarpma yüklerinin kolonlar üzerindeki etkileri; çarpma enerjisi, hız, yükleme noktası ve eksenel yük seviyesi gibi parametreler açısından değerlendirilmekte, bu parametrelerin kolon davranışı üzerindeki rolü literatürde yer alan çalışmaların desteği ile ortaya konulmaktadır. Bununla birlikte, betonarme kolonların çarpma performansını artırmaya yönelik güçlendirme yöntemleri de bu çalışmanın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu kapsamda, özellikle FRP, TRM ve ECC gibi yöntemlerin etkinliği incelenmekte; bu tekniklerin kolonların dayanım, süneklik ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Mevcut literatür ışığında elde edilen bulgular sistematik bir şekilde değerlendirilerek, betonarme kolonların çarpma yükleri altındaki davranışına ilişkin genel eğilimler ortaya konulmakta ve bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

KOLONLARIN ÇARPMA DAVRANIŞI

Modern mühendislik yapılarının tasarımında, statik yüklerin yanı sıra yapı güvenliğini tehdit eden ekstrem dinamik etkiler de giderek önem kazanmaktadır. Bu etkilerin başında gelen çarpma yükleri; araç çarpmaları, gemi çarpmaları veya beklenmedik kaza ve patlamalar sonucunda meydana gelebilmektedir. Yapı sisteminin ana taşıyıcı unsuru olan kolonlar, bu tür ani yüklemelere maruz kaldığında sergiledikleri davranış, yapının toplam stabilitesini ve aşamalı göçme riskini doğrudan belirlemektedir. Geleneksel tasarım yaklaşımları genellikle yavaş uygulanan yükler üzerine kurulu olsa da çarpma olayını anlamak için hareketin zamana bağlı değişimini ve enerji transfer mekanizmalarını derinlemesine incelemek gerekmektedir.

Çarpma Yükünün Dinamik Parametreleri ve Statik Yükten Farkları

Çarpma, iki cisim arasındaki çarpışmayı ifade etmekte ve çok kısa bir zaman aralığında etki eden, nispeten büyük temas kuvvetlerinin oluşmasıyla karakterize edilmektedir. Bir çarpmanın; malzeme deformasyonu ve geri toplanmasını, ısı ve ses oluşumunu içeren oldukça karmaşık bir olay olduğunun farkına varmak önemlidir. Çarpma koşullarındaki küçük değişiklikler, çarpma sürecinde ve dolayısıyla çarpmayı hemen takip eden durumlarda büyük değişikliklere neden olabilmektedir. Çarpma sırasında gerçekleşen ilk temasın ardından, cisimler arasındaki temas alanı artışı durana kadar kısa bir artan deformasyon periyodu gerçekleşmektedir. Temasın geri kalan kısmında ise temas alanının sıfıra indiği bir restorasyon (geri toplama) periyodu meydana gelmektedir (Meriam & Kraige, 2012:218). Çarpma olayları, çarpışma hızı ve gerilme hızı parametrelerine bağlı olarak birbirinden tamamen farklı fiziksel rejimlerde gerçekleşmektedir. Bu süreçler, hız arttıkça yapısal bir tepkiden ziyade malzemenin mikroskobik düzeydeki davranışıyla şekillenen bir dönüşüm sergilemektedir. (Zukas, 1980:7-11). Çarpma yükü ile statik yük birbirinden oldukça farklı yükleme türleridir. Tablo 1’de bu iki yüke ilişkin temel farklar verilmiştir.

Tablo 1: Çarpma Yüğü ve Statik Yüğü Arasındaki Temel Farklar

Özellik	Statik Yüğü	Çarpma Yüğü
Zaman Ölçeğı	Uzun süreli veya zaman bağımsızdır.	Çok kısa sürelerde gerçekleşmektedir.
Analiz Yöntemi	Konvansiyonel yapısal analiz teknikleri kullanılmaktadır.	Dalga yayılımı açıklaması gereklidir.
Malzeme Davranışı	Genellikle sabit akma gerilmesi kabul edilmektedir.	Gerilme hızı etkileri, uygulanan kuvvetin artması ve termal yumuşama kritiktir.
Atalet Etkileri	İhmal edilebilmektedir.	Malzeme yoğunluğu ve atalet kuvvetleri baskın bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.
Hasar Modları	Sünek veya gevrek kırılma görülmektedir.	Hasar modları eğilmeden göçmeye doğru değişim göstermektedir.

Kaynak: Zukas, 1980:7-11; Meriam & Kraige, 2012:218.

Çarpma Yüğü Altında Kolonların Hasar Mekanizmaları

Betonarme kolonlar çarpma yükleri altında, statik yükleme durumundan farklı olarak yüksek deformasyon hızları ve ani gerilme dağılımları nedeniyle karmaşık hasar mekanizmaları sergilemektedir. Bu yükleme türünde, atalet etkileri ve gerilme dalgalarının yayılımı, eleman davranışını önemli ölçüde etkilemekte ve hasarın hem lokal hem de global ölçekte gelişmesine neden olmaktadır. Literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, çarpma etkisi altındaki betonarme kolonlarda başlıca hasar mekanizmalarının eğilme hasarı, kesme kırılması, yerel ezilme ve donatı burkulması şeklinde sınıflandırılabilceğini göstermektedir (Şekil 1). Düşük hızlı çarpma etkilerinde betonarme kolon davranışı genellikle eğilme kontrollü olmaktadır. Bu durumda çarpma yüğü, kolon boyunca yayılmakta ve özellikle çekme bölgesinde çatlak oluşumu ile birlikte donatı akması gözlenmektedir. Yılmaz (2018) ve Yılmaz vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, düşük hızlı darbe etkisi altında kolonlarda belirgin eğilme çatlaklarının oluştuğı ve sünek davranışın ön

plana çıktığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Zhang vd. (2016) segmental kolonlar üzerinde yaptıkları deneylerde, eğilme kontrollü davranışın enerji yutma kapasitesini artırdığını ortaya koymuştur. Yüksek hızlı çarpma durumlarında ise kolonlarda kesme kuvvetleri baskın hale gelmektedir. Bu durumda, özellikle yetersiz etriye donatısına sahip kolonlarda ani ve gevrek kesme kırılması meydana gelmektedir. Xiang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda, darbe hızının artmasıyla birlikte kesme hasarının belirgin şekilde arttığı ve diyagonal çatlakların hızlı bir şekilde göçmeye dönüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, Tantrapongsaton vd. (2022) çoklu darbe etkisi altında kolonların rijitliğinin hızla azaldığını ve kesme hasarının ilerleyici bir şekilde geliştiğini göstermiştir. Çarpma yükünün uygulandığı bölgede temas alanının sınırlı olması, yüksek gerilme yığılmalarına neden olmakta ve bu durum betonun yerel olarak ezilmesi ile sonuçlanmaktadır. Yerel ezilme genellikle çarpma noktasında betonun parçalanması ve malzeme kaybı şeklinde ortaya çıkmaktadır. Liu vd. (2022) ve Luo & Wang (2022) tarafından yapılan çalışmalar, özellikle yüksek enerji seviyelerinde çarpma noktasında ciddi lokal hasarların oluştuğunu ve bu hasarın elemanın genel davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çarpma sonrası oluşan büyük deformasyonlar ve beton örtüsünün hasar görmesi, boyuna donatıların yanıl desteğini kaybetmesine yol açmaktadır. Bu durum, basınç bölgesindeki donatıların burkulmasına ve taşıma kapasitesinin ani şekilde azalmasına neden olmaktadır. Özellikle ileri hasar seviyelerinde gözlenen bu mekanizma, göçme sürecinin kritik aşamalarından biridir. Deneysel gözlemler, donatı burkulmasının çoğunlukla yerel ezilme ve kesme hasarı ile birlikte geliştiğini göstermektedir.



Şekil 1: Kolonların hasar mekanizmaları örneği

Kaynak: Erbaş vd., 2025:13

Çarpma Parametrelerinin Kolonlara Etkisi

Betonarme kolonların çarpma yükleri altındaki davranışı, yalnızca yükün büyüklüğüne değil, aynı zamanda çarpma ile ilişkili parametrelere de önemli ölçüde bağlıdır. Literatürde yapılan çalışmalar; çarpma hızı, çarpan kütle, darbe enerjisi, çarpma noktası ve eksenel yük oranı gibi parametrelerin kolon davranışı üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu parametreler hem hasar mekanizmasını hem de göçme modunu doğrudan etkilemektedir.

Çarpma hızı, darbe etkisinin en belirleyici parametrelerinden biridir. Düşük hızlı çarpmalarda kolonlar daha çok eğilme kontrollü davranış sergilerken, yüksek hızlı çarpmalarda kesme kırılması ve lokal hasar mekanizmaları baskın hale gelmektedir. Xiang vd. (2020) çalışmalarında, darbe hızındaki artışın kolonlarda gevrek davranışı artırdığını ve kesme hasarını tetiklediğini göstermiştir. Benzer şekilde Tantrapongsaton vd. (2022), yüksek hız etkisi altında rijitlik kaybının daha hızlı gerçekleştiğini belirtmiştir.

Çarpan kütle ve hızın birleşimi olan darbe enerjisi, kolon üzerindeki toplam hasar seviyesini belirleyen temel parametredir. Enerji seviyesinin artmasıyla birlikte hem global deformasyonlar hem de lokal hasar bölgeleri büyümektedir. Liu vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, yüksek enerji seviyelerinde çarpma noktasında ciddi ezilme ve parçalanma gözlenmiştir. Luo ve Wang (2022) ise enerji artışının kolon davranışını elastik sınırdan plastik bölgeye hızla taşıdığını ifade etmiştir.

Çarpmanın kolondaki konumu, hasar dağılımını ve göçme modunu doğrudan etkilemektedir. Orta noktaya yakın çarpmalarda eğilme etkileri baskın olurken, uç bölgelere yakın çarpmalarda kesme etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Zhang vd. (2016) çalışmalarında, çarpma noktasının değişmesiyle kolonun deformasyon şeklinin önemli ölçüde farklılaştığını ortaya koymuştur.

Kolon üzerindeki mevcut eksenel yük, çarpma davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Yüksek eksenel yük seviyeleri, kolonun sünekliğini azaltmakta ve gevrek göçme olasılığını artırmaktadır. Yılmaz vd. (2019) ve Luo & Wang (2022) çalışmalarında, eksenel yük oranının artmasıyla birlikte kesme kırılması ve ani göçme riskinin arttığını göstermişlerdir.

Literatür birlikte değerlendirildiğinde (Tablo 2.), çarpma parametrelerinin birbirinden bağımsız olmadığı, aksine birleşik etkiler oluşturarak kolon davranışını belirlediği anlaşılmaktadır. Özellikle yüksek hız ve yüksek enerji kombinasyonu, kolonlarda gevrek hasar mekanizmalarını ön plana

çıkarırken; düşük hız ve düşük enerji seviyelerinde daha sünek davranış gözlemlenmektedir. Bu nedenle, betonarme kolonların çarpma performansının doğru şekilde değerlendirilebilmesi için bu parametrelerin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Tablo 2: Çarpma Parametrelerinin Kolonlara Etkisi

Çarpma Parametreleri	Kaynak	Gözlemlenen Davranış	Temel Bulgular
Çarpma hızı	Xiang vd. (2020), Tantrapongsaton vd. (2022)	Hız arttıkça kesme hasarı artar. Yüksek hızda rijitlik hızlı azalır.	Gevrek davranış artar. Hasar ilerlemesi hızlanır.
Darbe enerjisi	Liu vd. (2022), Luo & Wang (2022)	Lokal ezilme ve parçalanma gerçekleşir. Plastik deformasyon artar.	Hasar seviyesi artar. Taşıma kapasitesi düşer.
Çarpma noktası	Zhang vd. (2016)	Hasar dağılımı değişir.	Göçme modu değişir.
Eksenel yük	Yılmaz vd. (2019), Luo & Wang (2022)	Sünek davranış azalır, Kesme hasarı artar.	Gevrek göçme artar. Stabilite azalır

Kolonlarda Çarpma Etkisinde Meydana Gelen Göçme Modları

Betonarme kolonlar çarpma yükleri altında, yükleme hızına, eksenel yük seviyesine ve darbe enerjisine bağlı olarak farklı göçme modları sergilemektedir. Literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, bu göçme modlarının genel olarak eğilme kontrollü, kesme kontrollü ve kombine göçme olmak üzere üç ana başlık altında incelenebileceğini göstermektedir. Göçme modu, yalnızca hasarın türünü değil, aynı zamanda elemanın enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini de doğrudan etkilemektedir.

Eğilme kontrollü göçme, genellikle düşük hızlı ve düşük enerji seviyesindeki çarpma durumlarında gözlenmektedir. Bu durumda kolon boyunca yayılı deformasyonlar oluşmakta, çekme bölgesinde çatlaklar gelişmekte ve boyuna donatılar akma seviyesine ulaşmaktadır. Yılmaz

(2018) ve Yılmaz vd. (2019) çalışmalarında, düşük hızlı darbe etkisi altında kolonların eğilme davranışı sergilediği ve sünek bir göçme mekanizmasının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Zhang vd. (2016), segmental kolonlarda eğilme kontrollü davranışın enerji yutma kapasitesini artırdığını göstermiştir.

Kesme kontrollü göçme, özellikle yüksek hızlı çarpma ve yüksek darbe enerjisi durumlarında ortaya çıkmaktadır. Bu göçme türü, ani ve gevrek bir karaktere sahip olup genellikle diyagonal çatlakların hızla ilerlemesiyle oluşmaktadır. Xiang vd. (2020) çalışmalarında, darbe hızının artmasıyla birlikte kolon davranışının eğilmeden kesmeye doğru değiştiğini ve gevrek göçmenin baskın hale geldiğini belirtmiştir. Tantrapongsaton vd. (2022) ise tekrarlı darbe etkisi altında kesme hasarının ilerleyerek ani göçmeye neden olduğunu göstermiştir.

Gerçek yapı davranışında en sık karşılaşılan göçme türü, eğilme ve kesme etkilerinin birlikte geliştiği kombine göçmedir. Bu durumda, elemanda hem global eğilme deformasyonları hem de lokal kesme hasarları eş zamanlı olarak oluşmaktadır. Liu vd. (2022) ve Luo & Wang (2022) çalışmalarında, özellikle orta seviyeli darbe enerjilerinde kolonların hem eğilme hem de kesme etkileri altında hasar gördüğü ve bu durumun göçme davranışını karmaşık hale getirdiğini ifade etmişlerdir. Bu tür göçme mekanizması, tasarım açısından en kritik durum olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar, betonarme kolonların çarpma etkisi altındaki göçme modlarının büyük ölçüde çarpma parametrelerine bağlı olduğunu göstermektedir (Tablo 3). Düşük hız ve düşük enerji seviyelerinde eğilme kontrollü, yüksek hız ve yüksek enerji seviyelerinde ise kesme kontrollü göçme ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, gerçekçi yükleme koşullarında çoğunlukla kombine göçme davranışı gözlenmektedir. Eksenel yük oranının artması da göçme modunu eğilmeden kesmeye doğru değiştiren önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, çarpma etkisi altındaki kolon davranışının doğru değerlendirilmesi için farklı göçme modlarının birlikte ele alınması gerekmektedir.

Tablo 3: Kolonlarda Çarpma Etkisinde Meydana Gelen Göçme Modları

Göçme Modları	Kaynak	Koşullar	Davranış Özellikleri	Temel Bulgular
Eğilme Kontrollü	Yılmaz (2018); Yılmaz vd. (2019); Zhang vd. (2016)	Düşük hız, düşük enerji, segmental kolonlar	Yayıllı çatlaklar, donatı akması ve yüksek deformasyon kapasitesi	Sünek davranış, enerji yutma kapasitesi yüksektir.
Kesme Kontrollü	Xiang vd. (2020), Tantrapongsaton vd. (2022)	Yüksek hız, tekrarlı darbe	Diagonal çatlaklar ve rijitlik kaybı	Gevrek göçme ve ani göçme gözlemlenmiştir.
Kombine Göçme	Liu vd. (2022); Luo & Wang (2022)	Orta enerji – eksenel yük etkisi	Eğilme+ Kesme ve çoklu hasar	Karmaşık davranış ve kritik göçme modu gözlemlenmiştir.

KOLONLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ

Betonarme kolonlar, çarpma yükleri altında ani ve yüksek enerjili zorlanmalara maruz kalmakta ve bu durum çoğunlukla gevrek hasar mekanizmaları ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, kolonların çarpma dayanımının artırılması amacıyla çeşitli güçlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Literatürde bu tekniklerin temel amacı; enerji yutma kapasitesini artırmak, çatlak gelişimini kontrol altına almak, kesme ve eğilme hasarlarını sınırlandırmak ve göçme modunu daha sünek hale dönüştürmektir. Literatürde incelenen çalışmalar doğrultusunda, çarpma etkisine karşı kolon güçlendirme yöntemleri başlıca FRP sargılama, TRM sistemleri, yüksek performanslı betonlar (UHPC ve ECC) ve hibrit sistemler olarak sınıflandırılmaktadır (Tablo 4).

Kolonların FRP ile Güçlendirilmesi

FRP sistemleri, betonarme kolonların çarpma performansını artırmada en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) sargılama, kolonlarda çevresel basınç oluşturarak betonun basınç dayanımını ve sünekliğini artırmaktadır (Şekil 2). Literatürde yer alan deneysel çalışmalar, FRP ile güçlendirilmiş kolonların çarpma yükleri altında daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ve hasarın

daha kontrollü geliştiğini göstermektedir. Swesi vd. (2022), CFRP ile sarılmış kolonların darbe etkisi altında daha düşük hasar seviyeleri sergilediğini ve göçmenin geciktiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Liu vd. (2023), FRP katman sayısının artmasının kolonların darbe dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur.

Tablo 4: Kolonlarda Güçlendirme Yöntemleri ve Davranış Üzerindeki Etkileri

Güçlendirme Yöntemi	Kaynak	Etki Mekanizması	Sağladığı Avantaj	Temel Bulgular
FRP - CFRP	Swesi vd. (2022); Liu vd. (2023)	Sargılama, Rijitlik artışı	Sünek davranış artışı ve uygulama kolaylığı	Enerji yutma kapasitesi artar, hasar azalır.
TRM	Şengel vd. (2022)	Çatlak kontrolü	Yangın dayanımı, sürdürülebilirlik	Daha kontrollü hasar gözlemlenmiştir.
UHPC ve ECC	Kadhim vd. (2022), Xia vd. (2024)	Yüksek dayanım, Lokal koruma	Dayanıklılık ve uzun ömürlülük	Hasar seviyesinin düştüğü ve darbe direncinin arttığı gözlemlenmiştir.
Hibrit Sistem	Fuhaid vd. (2022), Wang vd. (2024)	Kombine etki ve biyoesinlenmiş yapı	Optimize performans ve yenilikçi yaklaşım	İyi sonuçlar alınmış, çarpma etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2: Kolonların CFRP ile güçlendirilmesi

Kaynak: Xu vd., 2026:4

Kolonların TRM ile Güçlendirilmesi

Tekstil donatılı harç (TRM) sistemleri, FRP'ye alternatif olarak geliştirilen ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve çevresel uyumluluk açısından avantaj sağlayan güçlendirme yöntemleridir. Bu sistemlerde lif donatılar, polimer yerine çimento esaslı bir matris içerisinde yer almaktadır (Şekil 3). Şengel vd. (2022) tarafından yapılan çalışma, TRM ile güçlendirilen elemanların çarpma etkisi altında daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi sergilediğini ve çatlakların yayılımının sınırlandırıldığını göstermektedir. TRM sistemlerinin özellikle yüzeysel hasarların ilerlemesini geciktirdiği ve daha homojen bir gerilme dağılımı sağladığı ifade edilmektedir. Bu bağlamda TRM, yangın dayanımı gerektiren veya sürdürülebilirlik öncelikli projelerde uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

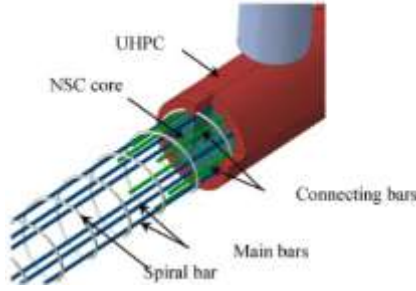


Şekil 3: Kolonların TRM ile güçlendirilmesi

Kaynak: Erbaş vd., 2025:9

ECC ve UHPC Kullanımı

Yüksek performanslı beton türleri, çarpma yükleri altındaki davranışı iyileştirmek amacıyla kullanılan ileri malzeme çözümleridir (Şekil 4). Ultra yüksek performanslı beton (UHPC), yüksek basınç dayanımı ve düşük porozitesi sayesinde kolonların çarpma etkisi altında daha düşük hasar seviyeleri göstermesini sağlamaktadır. Kadhim vd. (2022), UHPC kullanılan kolonların darbe yükleri altında daha yüksek dayanım ve daha sınırlı deformasyon sergilediğini ortaya koymuştur. Xia vd. (2024) ise UHPC kaplamaların lokal hasarları önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir. ECC ise mikro çatlak kontrolü sayesinde yüksek süneklik sunmakta ve enerji yutma kapasitesini artırmaktadır. Bu özellik, özellikle tekrarlı veya ani darbe yükleri altında avantaj sağlamaktadır. Bu malzemeler, klasik betonlara kıyasla hasar toleransı yüksek ve enerji sönümleme kapasitesi gelişmiş sistemler sunmaktadır.



Şekil 4: Kolonlarda UHPC kullanımı

Kaynak: Kadhim vd., 2022:4

Hibrit Güçlendirme Yöntemleri

Son yıllarda yapılan çalışmalar, farklı güçlendirme tekniklerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlere odaklanmaktadır. Bu sistemler, farklı malzemelerin avantajlarını bir araya getirerek daha yüksek performans elde edilmesini sağlamaktadır. Fuhaid vd. (2022), farklı güçlendirme yöntemlerini karşılaştırdığı çalışmada hibrit sistemlerin tekil uygulamalara göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Wang vd. (2024) ise biyomimetik yaklaşımlar ile geliştirilen sistemlerin darbe etkisini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu yaklaşımlar, özellikle yüksek riskli yapı elemanlarında optimize edilmiş güçlendirme stratejileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

LİTERATÜRDE YER ALAN ÇALIŞMALAR

Yapı sistemlerinin düşey yük taşıyıcı ana elemanları olan kolonlar; araç çarpması, patlama olayları veya doğal afetler kaynaklı ani dinamik yüklemelere maruz kalabilmektedir. Bu tür ekstrem yükleme durumları, statik yükleme koşullarından farklı olarak yapıda yüksek gerilme hızları ve ani enerji transferleri meydana getirmekte, bu da çoğu zaman gevrek kesme göçmesi gibi kritik hasar modlarını tetiklemektedir. Literatürde, kolonların bu tür dinamik etkiler altındaki performansını anlamak, hasar seviyelerini tahmin etmek ve yapısal güvenliği artırmak amacıyla gerçekleştirilen pek çok deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir bölümü, gelişmiş sonlu elemanlar analiz yazılımları (LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN vb.) kullanarak dinamik tepkileri simüle etmeye ve düşen ağırlık ya da sarkaç sistemleri gibi deneysel yöntemlerle bu modelleri doğrulamaya odaklanmıştır. Araştırmalar; eksenel yük oranı, çarpma hızı, çarpma enerjisi ve donatı düzenlemesi gibi parametrelerin kolonun dinamik

davranışı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Son yıllarda ise literatür, yalnızca mevcut davranışın tespiti ile sınırlı kalmayıp; CFRP, çelik plakalar, UHPC ve biyo-esinlenmiş yenilikçi koruma yapıları gibi çeşitli güçlendirme stratejilerinin kolon dayanımı üzerindeki etkinliğini araştırmaya yönelmiştir. Bu bağlamda Tablo 5'te betonarme ve kompozit kolonların çarpma ve patlama yükleri altındaki davranışlarını ele alan güncel çalışmalar, kronolojik ve tematik bir yaklaşımla özetlenmiştir.

Shi vd., (2008) patlama yüklerine maruz kalan betonarme (RC) kolonların hasarını tahmin etmek amacıyla basınç-impuls (P-I) diyagramlarının sayısal olarak türetilmesini amaçlamışlardır. Bu kapsamda, geleneksel tek serbestlik dereceli (SDOF) modellerin aksine, patlama yükleri altında yapıların yerel modlarda tepki vermesi ve kırılğan kesme göçmesi gibi durumları daha doğru temsil etmek için detaylı bir sayısal yaklaşım kullanmışlardır. Çalışmada, sonlu elemanlar analizi (FEA) yazılımı (AUTODYN) kullanılarak RC kolonların dinamik tepkilerini simüle etmişler ve farklı patlama yükü senaryoları altında hasar kriterleri, deformasyon ve iç kuvvet değişimlerini analiz etmişlerdir. P-I diyagramlarının oluşturulmasında kullanılan SDOF modellerinin sınırlamalarını vurgulamışlar ve daha gelişmiş sayısal modellerin, özellikle kesme hasarının dikkate alınması gereken durumlarda, daha doğru hasar tahminleri sağlayabileceği sonucuna varmışlardır.

Zhang vd., (2016) prefabrik betonarme segmental kolonların çarpma yükleri altında gösterdiği davranışın incelenerek, geleneksel monolitik betonarme kolonlarla karşılaştırılmasını amaçlamışlardır. Çalışmalarında, prefabrik betonarme segmental kolonlar ve geleneksel monolitik betonarme kolonlar kullanmışlar, bu kolonları, çarpma yükleri altında davranışlarını incelemek amacıyla sarkaç çarpma sistemi kullanılarak test etmişlerdir. Test sonuçlarıyla, prefabrik betonarme segmental kolonların geleneksel monolitik betonarme kolonlara göre daha esnek olduğunu ve daha küçük çarpma yükleri altında daha uzun süreli davranış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Prefabrik betonarme segmental kolonların geleneksel monolitik betonarme kolonlara göre daha iyi merkezleme kabiliyetine ve daha küçük kalıcı deformasyonlara sahip olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Anıl vd., (2018) RC kolonların çarpma yükleri altındaki davranışını incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmayı, düşen ağırlık testi kurulumunu kullanarak, 1/3 ölçekli sekiz RC kolon test örneği ile gerçekleştirmişlerdir. Deneysel değişkenler arasında çarpma yükünün uygulama noktası, etriye aralığı ve betonun basınç dayanımına yer vermişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar ışığında, RC kolonların düşük

hızda çarpma davranışlarını belirlemiş ve yorumlamışlardır. Bunun yanı sıra, RC kolonların dinamik tepkilerini değerlendirmek amacıyla ABAQUS yazılımı kullanarak sonlu eleman modelleri oluşturmuşlar, önerdikleri sonlu eleman modelinin düşük hızda çarpma yüklerine maruz kalan RC kolonların dinamik tepkilerini değerlendirmek için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Tablo 5: Literatürde yer alan çalışmaların gruplandırılması

Kullanılan Yöntem/Materyal	İncelenen Parametreler	Kaynak	Temel Bulgular
Geleneksel ve Prefabrik RC Kolonlar	Dinamik tepki, hasar modları, sarkaç ve düşen ağırlık testleri, monolitik vs. segmental karşılaştırması.	Shi vd. (2008), Zhang vd. (2016), Anıl vd. (2018), Yılmaz (2018), Luo ve Wang (2022), Tantrapongsaton vd. (2022), Cengiz vd. (2023), Luan vd. (2023)	Çarpma enerjisi arttıkça hasar modu eğilmeden kesmeye dönüşür. Prefabrik segmental kolonlar monolitik olanlara göre daha esnek ve daha iyi merkezleme kabiliyetine sahiptir. Eksenel yük kalıcı yer değiştirmeyi azaltırken yerel hasar şiddetini artırabilir. Çerçeve kolonlar serbest kolonlara göre daha yüksek yanal rijitliğe sahiptir.
Güçlendirme ve Koruma Yöntemleri	CFRP sargı, çelik plaka, TRM şeritler, biyo-esinlenmiş petek yapılar (BHTS) ve UHPC kaplamalar.	Abay (2022), Fuhaid vd. (2022), Swesi vd. (2022), Liu vd. (2023), Wang vd. (2024), Xia vd. (2024)	CFRP sargısı ve çelik plakalar enerji yutma kapasitesini ve hasar direncini önemli ölçüde artırır. Biyo-esinlenmiş altıgen petek yapılar en iyi enerji emilim kapasitesini sunar. Petek yapıları UHPC kaplamalar çarpma etkisini dağıtarak üstün koruma sağlar.
Kompozit ve Özel Beton Tipleri	Çelik tüp dolgulu (MECFST), hibrit UHPC, çelik elyaf takviyeli hafif beton, FRP tüp (CFFT) ve T-kesitli çelik takviyeli kolonlar.	Xiang vd. (2020), Kadhim vd. (2022), Liu vd. (2022), Li vd. (2023), Wang vd. (2023), Abdallah vd. (2024)	Hibrit UHPC kolonlar çarpma direnci ve ekonomik verimlilik sağlar. MECFST güçlendirmesi sünekliği ve çarpma enerjisi emilimini artırır. Çelik elyaf takviyesi hafif beton kolonların tokluğunu ve çarpma direncini iyileştirir. Kompozit kolonlar RC kolonlara göre enerjiyi daha etkin dağıtır.
Analiz ve Modelleme Yaklaşımları	P-I diyagramları, lif tabanlı modeller, kesit analizi, LS-DYNA ve ABAQUS doğrulamaları.	Shi vd. (2008), Liu vd. (2020), Hu vd. (2021)	Geleneksel SDOF modelleri yerine detaylı sayısal modeller kesme hasarını daha doğru tahmin eder. Lif tabanlı modeller ve kesit analizleri dairesel kolon davranışını başarıyla simüle eder. Statik yük taşıma kapasitesi oranı cinsinden hasar durumu nicel olarak belirlenebilir.
Patlama Yükü Çalışmaları	Şok dalgaları, C4 patlayıcı kullanımı ve sayısal hasar	Shi vd. (2008), Rhouma vd. (2024)	P-I diyagramları patlama yükü altındaki hasar seviyelerini belirlemede etkilidir. Sayısal modeller

Yılmaz (2018) doktora tez çalışmasında, RC kolonların çarpma davranışını deneysel olarak incelemeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda, çarpma etkisine maruz kalan RC kolonların dinamik tepkileri, hasar mekanizmaları ve enerji yutma kapasiteleri üzerine odaklanmıştır. Çalışmasında, düşen ağırlık sistemi kullanarak ölçekli RC kolon numuneleri üzerinde bir dizi çarpma deneyi gerçekleştirmiştir. Deneyler sırasında, çarpma kuvveti, ivme ve yer değiştirme gibi parametreleri ölçerek kolonların dinamik performansını ayrıntılı olarak analiz etmiştir. Elde ettiği bulgularla, kolonların hasar modlarının çarpma enerjisine bağlı olarak değiştiğini, artan çarpma enerjisi ile hasarın şiddetlendiğini ve özellikle kesme hasarının önemini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, donatı düzenlemesinin ve beton mukavemetinin çarpma direnci üzerindeki etkilerini de incelemiştir.

Liu vd., (2020) dairesel RC kolonların çarpma yükleri altında davranışlarını modellemek için basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Dairesel RC kolonlarının çarpma yükleri altında davranışlarını modellemek için kesit analizi ve lif tabanlı eleman modeli olmak üzere iki farklı yaklaşım sunmuşlardır. Kesit analizinde, sütunların çarpma yükleri altında davranışlarını modellemek için bir dizi denklem kullanırken, lif tabanlı eleman modelinde, sütunların davranışlarını modellemek için lif tabanlı elemanları kullanmışlardır. Dairesel RC kolonların çarpma yükleri altında davranışlarını modellemek için geliştirdikleri yöntemin doğruluğunu test etmek için çeşitli çarpma yükleme senaryolarında deneyleri gerçekleştirmişler, geliştirdikleri yöntemin dairesel RC kolonlarının çarpma yükleri altında davranışlarını doğru bir şekilde modelleyebildiği sonucuna varmışlardır.

Xiang vd., (2020) eksenel yük altında etki yüklerine maruz kalan T-şeklinde çelik takviyeli beton (SRC) kolonların dinamik davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, yedi adet SRC kolonu, bir düşme çekiş sistemi kullanarak test etmişlerdir. Deneysel değişkenler arasında etki yüksekliği, etriye aralığı ve eksenel sıkıştırma oranı kullanmışlardır. Deneylerde, etki kuvveti zaman tarihleri ve kolonların orta ve çeyrek açıklıklarındaki yanal kaymaları kaydetmiş ve analiz etmişlerdir. Etriye aralığının azalmasının daha küçük yanal sapmalara yol açtığını ve eksenel yükün, etki yüklemesine maruz kalan kolonların kalıcı sapmaları üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlar, deneysel

sonuçları simüle etmek için sonlu eleman analizi (FEA) modelleri geliştirmişler ve bu modellerin sonuçları deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Hu vd., (2021) RC kolonların yatay çarpma yükü altındaki dinamik tepkisini ve eğilme hasarını sayısal simülasyonlar aracılığıyla araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, çarpma kinetik enerjisinin betonarme kolonların dinamik davranışına etkilerini incelemişler, çarpma sırasındaki deformasyon ve iç kuvvet değişimlerini analiz etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak LS-DYNA yazılımı ile modelledikleri ve deneysel verilerle doğruladıkları bir sayısal modelden yararlanmışlardır. Elde ettikleri bulgularla, çarpma kinetik enerjisinin artmasıyla kolonların dinamik hasar/göçme modunun eğilmeden kesmeye doğru değiştiği sonucuna varmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, çarpma altındaki RC kolon numunelerinin eğilme göçmesini nitel olarak değerlendiren ve hasar durumunu eşdeğer statik yük ile nihai statik yük taşıma kapasitesi oranı cinsinden nicel olarak belirleyen bir yöntem sunmuşlardır.

Abay (2022) CFRP ile sarılmış demet donatılı betonarme (BRC) kolonların tekrarlayan çarpma yükü altındaki davranışını sayısal olarak incelemeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda, Abaqus/Explicit tabanlı doğrusal olmayan sonlu elemanlar (FE) modelleri geliştirmiş ve bu modeli önceden yapılmış deneysel çalışmalarla doğrulamıştır. Geliştirdiği FE analizini temel alarak, CFRP sargısının, eksantrik aksel yükün, demet donatı düzenlemesinin ve kolon yüksekliğinin RC kolonların tekrarlayan çarpma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak üzere parametrik bir çalışma yürütmüştür. CFRP sargısının, BRC kolonların tekrarlayan çarpma yüklerine karşı direncini ve enerji emilim kapasitesini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmış, aksel yükün eksantrikliğinin ve kolon yüksekliğinin çarpma performansı üzerindeki etkileri de analiz etmiştir.

Fuhaid vd., (2022) araç çarpması yükleri altında RC kolonların performansını ve çeşitli güçlendirme yöntemlerinin bu performans üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, araç çarpması etkilerini simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemi (LS-DYNA yazılımı ile) kullanarak detaylı sayısal modeller geliştirmişlerdir. Çalışmada, mevcut RC kolonlar, CFRP sargı ile güçlendirilmiş kolonlar ve çelik plaka ile güçlendirilmiş kolonlar gibi farklı güçlendirme senaryoları analiz etmişlerdir. Elde edilen bulgularla, araç çarpması altında RC kolonlarda meydana gelen hasar modlarını, enerji emilim kapasitesini ve maksimum yer değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Hem CFRP sargısının hem de çelik plaka güçlendirmesinin, çarpma enerjisi emilimini ve

hasar direncini önemli ölçüde artırarak kolonların dinamik performansını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Kadhim vd., (2022) düşük hızlı çarpma yüküne maruz kalan eksenel yüklü hibrit UHPC kolonların dinamik performansını kapsamlı sayısal ve parametrik çalışmalarla araştırmayı amaçlamışlardır. Abaqus kullanarak doğrulanmış bir sonlu elemanlar (FE) modeli geliştirmişler ve farklı çarpma senaryoları altında hibrit kolonların dinamik tepkileri, hasar modları ve enerji emilimini detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Elde ettikleri bulgularla, hibrit UHPC kolonların, çarpma direnci ve enerji sönümleme kapasitesi açısından önemli avantajlar sunduğunu ve aynı zamanda ekonomik verimlilik sağlayabileceği sonucuna varmışlardır.

Liu vd., (2022) mikro genleşmeli beton dolgulu çelik tüp (MECFST) ile güçlendirilmiş RC kolonların yanal düşük hızlı çarpma altındaki dinamik davranışını deneysel ve sayısal olarak araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, bir dizi çarpma deneyi gerçekleştirmişler ve eş zamanlı olarak ABAQUS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak detaylı sayısal modeller geliştirmişlerdir. Çalışmalarının deneysel aşamasında, çarpma yükünün kolonlar üzerindeki etkileri, hasar modları, yer değiştirmeler ve iç kuvvetler gibi parametreleri incelemişlerdir. Sayısal modellerini, deneysel sonuçlarla karşılaştırarak doğrulamışlar ve ardından farklı çarpma senaryoları ve güçlendirme konfigürasyonları altında parametrik analizler yapmışlardır. MECFST güçlendirmesinin, RC kolonların çarpma enerjisi emilim kapasitesini, sünekliğini ve genel çarpma direncini önemli ölçüde artırdığı sonucuna varmışlardır.

Luo ve Wang (2022) farklı eksenel basınç oranları ve donatı oranlarının, RC kolonların çarpma dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, bir betonarme çerçeve kolonu ile dört serbest duran RC kolon numunesi üzerinde sarkaç çarpma testleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, kolonların dinamik davranışları, çerçeve bağlantısının varlığı ve eksenel yükleme durumlarını dikkate alarak karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri dinamik zaman-tarih eğrileri aracılığıyla, çerçeveli ve serbest duran kolonların çarpma altındaki tepkilerini analiz etmişler, eksenel yüklerin etkisi detaylı olarak değerlendirmişlerdir. Deneysel bulgularıyla, aynı çarpma yükü altında eksenel yüklerin artık yer değiştirmeyi azaltarak yapının genel davranışına olumlu katkı sağladığını, ancak buna karşılık yerel hasar düzeyini artırabileceğini ortaya koymuşlardır. Çerçeve kolonların serbest duran kolonlara kıyasla daha yüksek yanal rijitliğe ve çarpma dayanımına sahip olduğunu görmüşler, bu nedenle çerçeve sistemlerin çarpma etkilerine karşı

koruyucu bir yapı elemanı olarak değerlendirilebileceği sonucuna varmışlardır. Çalışma kapsamında geliştirdikleri sonlu eleman modelleri aracılığıyla, eksenel yüklerin çarpma etkisi altındaki kesit kuvveti dağılımı ve hasar oluşumu üzerindeki etkileri sayısal olarak da incelemişler; moment ve kesme kuvveti dağılımının eksenel yük varlığından önemli ölçüde etkilendiğini belirlemişlerdir.

Swesi vd., (2022) CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş RC kolonların statik ve çarpma yükleme koşullarındaki davranışlarını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmaları kapsamında, 20 adet RC kolon örneği hazırlamışlar ve bu örneklerin 14 tanesini 6 farklı CFRP katman konfigürasyonu kullanarak güçlendirmişlerdir. Hazırladıkları numuneleri, statik ve çarpma yükleme koşullarında test etmişler ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. CFRP takviyesinin RC kolonların statik ve çarpma yükleme koşullarındaki davranışlarına etkilerini inceleyerek, CFRP ile güçlendirdikleri RC kolonların çarpma yükleme koşullarındaki davranışlarının önemli ölçüde iyileştiği sonucuna varmışlardır.

Tantrapongsaton vd., (2022) RC kolonların çarpma momentumu ve eksenel yükün etkisi altında davranışlarını analiz etmek ve çarpma yüklemelerine karşı dayanıklılıklarını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda çalışmalarında, 16 adet RC kolon numunesi kullanmışlar ve bu numunelere iki kez çarpma yüklemesi uygulamışlardır. Çarpma yüklemelerini, aynı kinetik enerji seviyesinde ancak farklı momentum seviyelerinde gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin eksenel yük oranlarını 0,0, 0,1, 0,2 ve 0,3 olarak değiştirmişlerdir. LS-DYNA programı kullanılarak Explicit finite element analizi gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarıyla, çarpma momentumunun RC kolonların davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir. Yüksek momentumlu çarpmaların, daha fazla fleksürel hasara ve daha büyük orta açıklık deformasyonlarına neden olurken, düşük momentumlu çarpmaların daha yerel hasara ve daha küçük orta açıklık deformasyonlarına neden olduğu, eksenel yükün RC kolonların çarpma davranışını kontrol etmede önemli bir rol oynadığı ve eksenel yük oranının artmasıyla birlikte kolonların çarpma dayanıklılığının arttığı sonuçlarına varmışlardır.

Cengiz vd., (2023) çarpma yüklerinin kolonların davranışına etkisini ve kolonların çarpma sonrası kalıcı hasarlarını belirlemek amacıyla; farklı çarpma enerjileri altında kare kesitli, tam ölçekli eğilme kritik eksenel yüklü betonarme kolonların düşük kot çarpma davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında, eksenel yüklenen, tam ölçekli (30x30x320 cm) kolonlara düşük kotlu çarpma uygulamak için

farklı yüksekliklerden bir kütle düşürmüşlerdir. Kolonların çeşitli çarpma yüklemeleri altındaki performansları değerlendirdikten sonra, statik yükleme ile kolonların artık yük taşıma kapasitelerini de elde etmişlerdir. Düşürme ağırlığı deney sonuçlarını kullanarak üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirmiş ve doğrulamışlardır. Uyguladıkları çarpma enerjisi arttıkça dinamik hasar/hata modunun eğilmeden kesmeye doğru değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bir kolona toplam çarpma enerjisi kapasitesinin %75,8'i vurulduğunda, önceki çarpmasız durumuna göre sertliğinde %38,1, yük taşıma kapasitesinde ise %49,7 oranında azalma olduğunu belirlemişlerdir. Geliştirdikleri sonlu elemanlar modelinin, taşıt çarpışması tipi düşük kotlu çarpmalar altında kolonların dinamik performansını ve hasar modlarını belirlemek için de kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Li vd., (2023) RC kolonların ve kompozit kolonların yanal çarpma tepkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, LS-DYNA yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak detaylı sayısal modeller oluşturmuş ve farklı çarpma senaryoları altında kolonların dinamik davranışları analiz etmişlerdir. Çalışmada, çarpma hızı, çarpma enerjisi ve kolon kesit tipi gibi parametrelerin yapısal tepki üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgularla, çarpma yükü altında kolonlarda meydana gelen hasar mekanizmalarını, yer değiştirmeleri ve iç kuvvet dağılımlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri veriler ışığında kompozit kolonların RC kolonlara göre çarpma enerjisini daha etkin bir şekilde dağıtarak ve daha yüksek deformasyon kapasitesi sergileyerek çarpma direncini artırdığı sonucuna varmışlardır.

Liu vd., (2023) CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş RC kolonların yanal çarpma yükleri altındaki dinamik yanıtlarını ve direnç mekanizmalarını incelemeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalarını, mevcut literatürdeki sekiz kolon modelinin laboratuvar deney programı çerçevesinde ele almışlardır. LS-DYNA yazılımı kullanarak sonlu eleman (FE) modelleri oluşturmuşlar ve bu modellerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında, CFRP ile güçlendirilmiş kolonların dinamik yanıtlarını etkileyen parametreler arasında; eksenel sıkıştırma oranı, kolon üstündeki sınır koşulu, CFRP katman sayısı, çarpma hızı ve çarpma yüksekliğine yer vermişlerdir. CFRP güçlendirme mekanizmasının, çarpma kuvvetinin ilk zirveye hızla ulaştığı ve ardından sıfıra düştüğü ilk aşamada aktif olmadığı, güçlendirmenin ise ikinci aşamada devreye girdiğini ifade etmişlerdir. Dinamik yanıtların, çarpma hızına diğer parametrelerden daha duyarlı olduğunu belirlemişler, eksenel sıkıştırma oranının kolonun hasar modunu etkileyebileceği, çarpma

yüksekliği ve kolon üstündeki sınır koşulunun ise güçlendirilmiş kolonların hasar modunu fazla etkilemediği sonuçlarına varmışlardır.

Luan vd., (2023) RC kolonların yanal çarpma yükü sonrası eksenel basınç performansını ve kalan taşıma kapasitesini araştırmayı hedeflemişlerdir. Yanal çarpma yüküne maruz kalmış RC kolonların dinamik tepkilerini, eksenel basınç performansını ve artakalan taşıma kapasitesini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmalarında, çarpma enerjisinin artmasının, kolonlarda artakalan yer değiştirmeyi ve çatlak genişliğini artırdığı ve çarpma hasarının şiddetlendiğini göstermişlerdir. Elde ettikleri bulgularla ön yükleme eksenel yükünün artırılmasıyla RC kolonların çarpma direncinin artırılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bununla beraber, çarpma sonrası RC kolonların artakalan taşıma kapasitesini tahmin etmek için bir model önermişler ve bu modelin deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Wang vd., (2023) çelik elyaf takviyeli ve çeşitli eksenel basınç oranlarına sahip tamamen hafif beton kolonların çarpma direncini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, hafif beton kolonların çarpma performansı deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada, çelik elyaf takviyesinin ve eksenel basınç oranının kolonların çarpma enerjisi emilim kapasitesi, hasar modları ve maksimum yer değiştirmeler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Elde ettikleri bulgularla, çelik elyaf takviyesinin hafif beton kolonların sünekliğini ve tokluğunu artırarak çarpma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği, eksenel basınç oranının artmasının, kolonların çarpma sonrası kalan taşıma kapasitesini etkilediği ve belirli bir orana kadar çarpma performansını olumlu yönde etkileyebileceği sonucuna varmışlardır.

Abdallah vd., (2024) araç çarpışmasının neden olduğu çarpma yükü altındaki Beton Dolgulu FRP Tüp (CFFT) köprü kolonlarının ve RC kolonların dinamik tepkisini sayısal olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, deneysel test verileriyle doğrulanmış bir sayısal model kullanarak, RC, donatısız CFFT ve çelik donatılı CFFT kolonların yanal çarpma yükü altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Üç boyutlu bir sonlu elemanlar (FE) modeli geliştirmişler ve bu modeli, test ettikleri kolonların çarpma davranışını simüle etmek için kullanmışlardır. Sayısal sonuçlar ile test sonuçları arasındaki karşılaştırmalarıyla; oluşturdukları sayısal modelin, kolonların genel davranışını makul bir doğrulukla yakaladığı sonucuna varmışlardır. Doğruladıkları FE modelini, ağır bir 45 fitlik çekici-treyler çarpması altındaki CFFT köprü kolonlarının tepkisini incelemek için kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, kolon çapı, donatı

detaylandırması ve çarpma hızı gibi parametrelerin yapısal tepki üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiş olup, bu parametrelerin kolonların çarpma direnci ve hasar mekanizmaları üzerindeki önemli etkilerini ortaya koymuşlardır.

Rhouma vd., (2024) RC kolonların patlama yükü altındaki davranışını ve performansını deneysel olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalarını, 1500 mm uzunluğunda ve 100 mm dış çapında, 6 mm çapında uzunlamasına donatı çubukları ve 2 mm çapında çelik bağlarla güçlendirilmiş kolonlar üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Patlama yüklemesini, ortada bulunan kolonların ortasına yerleştirilen bir patlayıcıdan (C4) elde edilen 30 g ve 50 g'lık yüklerle, patlayıcıdan kaynaklanan şok dalgalarını kullanarak oluşturmuşlardır. Deneysel verilerin toplanmasında yüksek hızlı stereoskopik dijital görüntü korelasyonu (DIC) ve lineer değişken yer değiştirme transdüserleri (LVDT) kullanmışlardır. Elde ettikleri veriler doğrultusunda LS-DYNA R10.0 yazılımı ile bir sonlu eleman modeli geliştirmişler ve deneysel verilerle bu modeli doğrulamışlardır. Önerdikleri sonlu eleman yaklaşımının uyguladıkları patlama yüklemesini ve kolonların hasar özelliklerini başarılı bir şekilde yeniden ürettiği sonucuna varmışlardır.

Wang vd., (2024) RC kolonların çarpma yükü altındaki korunmasını, biyo-esinlenmiş petekli ince cidarlı yapılar (BHTS) kullanarak araştırmayı amaçlamışlardır. Bu bağlamda, çarpma enerjisi emilimini artırmak ve hasarı azaltmak için altıgen, kare ve daire kesitli BHTS'ler içeren sayısal modeller geliştirmişlerdir. ABAQUS yazılımı ile sonlu elemanlar analizi kullanarak, farklı çarpma hızları ve BHTS geometrileri altında RC kolonların ve korumalı kolonların dinamik tepkileri, enerji emilim kapasiteleri ve hasar modları karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. BHTS'lerin RC kolonların çarpma performansını önemli ölçüde artırdığı ve özellikle altıgen BHTS'lerin en iyi enerji emilim kapasitesini sunduğu sonucuna varmışlardır.

Xia vd., (2024) RC kolonların çarpma performansını artırmak amacıyla UHPC kompozit yapılarının kullanımını araştırmayı hedeflemişlerdir. UHPC kaplamalar ve petek yapılar gibi farklı UHPC kompozit konfigürasyonları içeren sayısal modeller oluşturmuşlardır. ABAQUS yazılımı ile Sonlu elemanlar analizi kullanarak, çeşitli çarpma yükü senaryoları altında güçlendirilmiş RC kolonların dinamik tepkileri, enerji emilim kapasiteleri, maksimum yer değiştirmeler ve hasar modlarını ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. UHPC kompozit yapılarının, RC kolonların çarpma enerjisi emilimini ve hasar direncini önemli ölçüde artırdığı; özellikle, petek yapılarla birleştirilmiş UHPC kaplamaların, çarpma

etkisini dağıtarak ve enerji sönümlemesini iyileştirerek üstün bir koruma sağladığı sonuçlarına varmışlardır.

SONUÇ

Bu çalışmada, taşıyıcı sistemin en kritik bileşenlerinden biri olan betonarme kolonların çarpma yükleri altındaki dinamik davranışı ve bu direnci artırmaya yönelik güçlendirme teknikleri literatür ışığında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Çarpma yükleri, statik yüklerden farklı olarak çok kısa sürelerde yüksek enerji transferi, atalet etkileri ve dalga yayılımı ile karakterize edilmektedir. Çarpma hızı ve enerjisindeki artışın, kolonun davranışını sünek bir eğilme modundan gevrek bir kesme moduna dönüştürdüğü görülmüştür.
- Düşük hızlı çarpmalarda yayılı eğilme çatlakları ve donatı akması gözlenirken; yüksek hızlı veya yüksek enerjili çarpmalarda ani kesme kırılması, çarpma noktasında yerel ezilme ve donatı burkulması gibi kritik hasarlar meydana gelmektedir.
- Geleneksel yöntemlerin aksine FRP, TRM ve çelik ceketleme gibi modern güçlendirme tekniklerinin kolonların enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Özellikle CFRP sargılamanın betonun basınç dayanımını artırarak hasarı geciktirdiği, TRM sistemlerinin ise yangın dayanımı ve çatlak kontrolü açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir.
- UHPC ve ECC gibi yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin kullanımı, darbe direncini artırmada ve yerel hasarları minimize etmede klasik betonlara göre üstün performans sergilemektedir.

Sonuç olarak, kritik yapılarda bulunan kolonların tasarımında yalnızca statik yüklerin değil, olası çarpma senaryolarının da dikkate alınması hayati önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların; hibrit güçlendirme sistemlerinin optimize edilmesi ve farklı eksenel yük seviyeleri altında tekrarlı darbe etkilerinin uzun dönemli performans üzerindeki etkilerine odaklanması önerilmektedir.

REFERANSLAR

- Abay, A. (2022). Finite Element Analysis of CFRP Strengthened Bundle RC Column Subjected to Repeated Impact Load. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 6985506.
- Abdallah, M., Dua, A., Hajiloo, H., & Braimah, A. (2024, June). Dynamic response of RC and CFFT columns under impact loading caused by vehicle collision: Numerical simulation. In *Structures* (Vol. 64, p. 106575). Elsevier.
- Anil, Ö., Erdem, R. T., & Tokgöz, M. N. (2018). Investigation of lateral impact behavior of RC columns. *Computers and Concrete, An International Journal*, 22(1), 123-132.
- Cengiz, A., Gürbüz, T., İlki, A., & Aydoğan, M. (2023). Dynamic and Residual Static Behavior of Axially Loaded RC Columns Subjected to Low-Elevation Impact Loading. *Buildings*, 14(1), 92.
- Erbaş, Y., Baran, M., Anil, Ö., & Mercimek, Ö. (2025). Experimental investigation of TRM-strengthened RC columns under concentric and eccentric axial loads. *Construction and Building Materials*, 503, 144525.
- Fuhaid, A. A., Soheli, K. M. A., & Arifuzzaman, M. (2022). The effect of strengthening methods on the performance of reinforced concrete columns against vehicle impact. *Applied Sciences*, 12(3), 1382.
- Hu, B., Cai, J., & Ye, J. (2021). Numerical Simulation of Dynamic Response and Evaluation of Flexural Damage of RC Columns under Horizontal Impact Load. *Applied Sciences*, 11(23), 11223.
- Kadhim, M. M., Semendary, A. A., Hammed, M., & Cunningham, L. S. (2022). Numerical investigation of hybrid UHPC columns subject to lateral impact. *Journal of Building Engineering*, 47, 103914.
- Li, X., Yin, Y., Li, T., Zhu, X., & Wang, R. (2023). Analytical Study on Reinforced Concrete Columns and Composite Columns under Lateral Impact. *Coatings*, 13(1), 152.
- Liu, B., Fan, W., Huang, X., Shao, X., & Kang, L. (2020). A simplified method to predict damage of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 32.
- Liu, X., Zheng, Y., Fang, Q., Zhou, C., Yang, Y., Xiang, H., & Yan, H. (2022). Dynamic Behavior of RC Columns Confined with Micro-Expansive Concrete-Filled Steel Tubes Subjected to Lateral Low-Velocity Impact: Experimental and Numerical Study. *Buildings*, 12(5), 515.
- Liu, T., Xu, X., Chen, L., Kim, S., & Hong, S. (2023). Numerical analysis on dynamic response of CFRP-wrapped RC columns under lateral impact loading. *Materials*, 16(6), 2425.
- Luan, H., Wu, J., Cao, T., Zhao, X., Geng, F., & Dong, G. (2023). Axial compression performance of reinforced concrete columns after lateral impact load. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(8), 3528-3541.
- Luo, Z., & Wang, Y. (2022). Experimental and numerical study of axially loaded reinforced concrete columns and frame columns under lateral impact loading. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(3), 330-345.
- Mercimek, Ö., Çelik, A., Ghoroubi, R., & Anil, Ö. (2024, February). Retrofitting of squat RC column by using TRM strip under axial load. In *Structures* (Vol. 60, p. 105909). Elsevier.

- Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2012). *Engineering Mechanics: Dynamics* (7th Edition). John Wiley & Sons.
- Rhouma, M. B., Maazoun, A., Aminou, A., Belkassem, B., Vandenbruwane, I., Tysmans, T., & Lecompte, D. (2024). Blast Loading of Small-Scale Circular RC Columns Using an Explosive-Driven Shock Tube. *Buildings*, 14(4), 921.
- Shi, Y., Hao, H., & Li, Z. X. (2008). Numerical derivation of pressure–impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1213-1227.
- Swesi, A. O., Cotsovos, D. M., & Val, D. V. (2022). Effect of CFRP strengthening on response of RC columns to lateral static and impact loads. *Composite Structures*, 287, 115356.
- Şengel, H. S., Erol, H., Yılmaz, T., Anıl, Ö., Gürdal, H. C., & Uludoğan, A. M. (2022, October). Low-velocity impact behavior of two-way RC slab strengthening with carbon TRM strips. In *Structures* (Vol. 44, pp. 1695-1714). Elsevier.
- Tantrapongsaton, W., Hansapinyo, C., Limkatanyu, S., Zhang, H., & Vimonsatit, V. (2022). Nonlinear response of RC columns subjected to equal energy-double impact loads. *Buildings*, 12(9), 1420.
- Wang, S., Xia, H., Zong, Y., Liang, J., & Zhu, R. (2024). The Protection of RC Columns by Bio-Inspired Honeycomb Column Thin-Walled Structure (BHST) Under Impact Load. *Biomimetics*, 9(12), 759.
- Wang, X., Wu, Q., Gao, Z., & Sha, L. (2023). Study on Impact Resistance of All-Lightweight Concrete Columns Based on Steel Fiber Reinforced and Various Axial Compression Ratio. *Buildings*, 13(8), 2076.
- Xia, H., Fang, X., Yu, Q., Wang, S., Huang, Y., & Sun, Q. (2024). The impact protection behavior of UHPC composite structure on RC columns. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03866.
- Xiang, S., Zeng, L., Liu, Y., Mo, J., Ma, L., Zhang, J., & Chen, J. (2020). Experimental study on the dynamic behavior of T-shaped steel reinforced concrete columns under impact loading. *Engineering Structures*, 208, 110307.
- Xu, R., Liu, X., & Chen, Z. (2026). Axial Compression Performance of CFRP-Strengthened Aluminum-cement-timber Composite Columns: Experimental Study and Finite Element Analysis. *Journal of Building Engineering*, 115964.
- Yılmaz, T. (2018). Betonarme kolonların çarpma davranışının deneysel olarak incelenmesi. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yılmaz, T., Kırac, N., & Anıl, Ö. (2019). Experimental investigation of axially loaded reinforced concrete square column subjected to lateral low-velocity impact loading. *Structural Concrete*, 20(4), 1358-1378.
- Zhang, X., Hao, H., & Li, C. (2016). Experimental investigation of the response of precast segmental columns subjected to impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 95, 105-124.
- Zukas, J. A. (1980). *Impact dynamics: Theory and experiment* (Technical Report ARBRL-TR-02271). U.S. Army Armament Research and Development Command, Ballistic Research Laboratory.

IoT ve Giyilebilir Biyosensörler: Sağlıkta Yeni Ufuklar

Zülfü TÜYLEK¹

1- Öğr. Gör. Zülfü TÜYLEK; Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü. zulfu.tuylek@ozal.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9086-1327

ÖZET

Biyosensör teknolojilerindeki son hızlı gelişmeler, kişiselleştirilmiş ve sürekli sağlık izleme çözümlerinin önünü açmıştır. Bu inceleme, kronik hastalık yönetimi için giyilebilir sistemler, Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemlerin sağladığı gerçek zamanlı veri iletimi ve klinik uygulamalar ile EEG ve EMG gibi nörosinyal sistemlerindeki biyosensörlerin katkılarına odaklanarak, biyosensör teknolojilerinin sağlık hizmetlerindeki dönüştürücü etkisini incelemektedir.

Giyilebilir biyosensörler, glikoz, kortizol ve laktat gibi biyokimyasal parametrelerin gerçek zamanlı ve sürekli izlenmesini sağlar. Genellikle mikroakışkan sistemler ve elektrokimyasal algılama teknolojileriyle entegre olan bu cihazlar, kullanıcılara konforlu ve invaziv olmayan bir izleme deneyimi sunar. IoT destekli altyapılar, toplanan verileri bulut tabanlı platformlara güvenli bir şekilde ileterek veri analizini hızlandırır ve klinik karar alma süreçlerini destekler. Ayrıca, EEG ve EMG tabanlı biyosensörler, sinirsel aktivitenin izlenmesini kolaylaştırarak nörolojik bozuklukların erken teşhisi ve rehabilitasyon uygulamaları için etkili çözümler sunar. Bu derlemenin amacı, biyosensör teknolojilerinin sağlık alanındaki çok boyutlu uygulamalarına ilişkin kapsamlı bir genel bakış sunmak ve gelecekteki klinik potansiyellerine ışık tutmaktır.

Anahtar Kelimeler – Giyilebilir biyosensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT), kronik hastalık, Gerçek zamanlı sağlık izleme.

GİRİŞ

Geleneksel sağlık hizmetleri genellikle semptomlar ortaya çıktıktan sonra müdahaleye dayanırken, günümüz teknolojileri proaktif sağlık yönetimini mümkün kılmaktadır. Özellikle giyilebilir biyosensörler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı sistemler bu dönüşümde öncü bir rol oynamaktadır. Biyosensörler, kimyasal, biyolojik veya fiziksel verileri algılayıp analiz eden cihazlardır. Taşınabilir ve bağlantılı olduklarında, birey merkezli sağlık yönetimini desteklerler (Alves et al., 2022).2].

Dijital teknolojilerdeki hızlı gelişmeler, sağlık hizmetlerinin sunulma biçiminde köklü bir dönüşüme yol açmıştır. IoT teknolojilerinin biyosensörlerle entegrasyonu sayesinde, bireysel fizyolojik veriler gerçek zamanlı ve sürekli olarak izlenebilmekte ve kalp ritmi, kan basıncı, vücut ısısı ve glikoz seviyeleri gibi temel biyometrik parametreler gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve sağlık uzmanlarına iletebilmektedir. Bu da daha hızlı ve daha etkili klinik karar alma süreçlerine olanak sağlamaktadır.

Dijital sağlık pazarının 2025 yılına kadar yıllık %20'nin üzerinde büyümesi bekleniyor. Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı biyosensör cihazları, giyilebilir teknolojiler, tele-tıp çözümleri ve uzaktan hasta izleme sistemleri bu

büyümede önemli bir rol oynuyor (Statista, 2024), (MarketsandMarkets, 2024). COVID-19 pandemisi ile birlikte bu teknolojilere olan ilgi artmış ve özellikle uzaktan hasta izleme ve bakım süreçlerinde dijitalleşme kaçınılmaz hale gelmiştir (World Health Organization, 2020).

IoT özellikli biyosensör sistemleri, yalnızca bireysel sağlık izlemede değil, aynı zamanda kronik hastalık yönetimi, koruyucu sağlık hizmetleri ve acil müdahalede de kritik roller oynamaktadır. Yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak analiz edilen bu sistemler tarafından üretilen büyük veriler, klinik karar destek sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmakta ve kişiselleştirilmiş sağlık hizmetlerinin yaygın olarak benimsenmesini desteklemektedir.

Bu çalışma, IoT tabanlı biyosensör sistemlerinin teknolojik altyapısını, çalışma modlarını, klinik uygulama alanlarını ve gelecekteki potansiyelini ayrıntılı olarak inceleyerek sağlık hizmetlerinde dijital dönüşüm sürecine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır (World Health Organization, 2023).

GIYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERLE BİREYSEL SAĞLIKTA BİR DEVİRİM

Yüzyıllar boyunca modern tıbbın gelişimi, semptomların gözlemlenmesine ve ardından tedavilerin uygulanmasına dayanıyordu. Ancak, sağlık hizmetlerinde artık reaktif bir yaklaşımdan proaktif ve kişiselleştirilmiş modellere doğru köklü bir paradigma değişimi yaşanıyor. Bu dönüşümü yönlendiren, yapay zekâ, büyük veri, biyosensör teknolojileri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi dijital sağlık bileşenlerinin entegre kullanımıdır[6, (Seshadri et al., 2020).

Özellikle giyilebilir biyosensörler, yalnızca ölçüm cihazları değil; insan vücudunu sürekli izleyen, değişkenleri analiz eden ve sağlık uzmanlarına sürekli veri sağlayan biyolojik bekçiler haline gelmiştir (Heikenfeld et al., 2018). Bu cihazlar, bireylerin kan şekeri, kalp atış hızı, stres seviyesi ve kas aktivitesi gibi hayati parametreleri gerçek zamanlı olarak izlemelerine olanak tanıyarak daha hızlı, daha etkili ve daha hedefli klinik müdahalelere olanak tanır (Patel et al., 2012).

Günümüz toplumları, artan yaşam beklentisiyle birlikte kronik hastalıkların yükünün hızla arttığı bir döneme girmiştir. Diyabet, kalp yetmezliği, hipertansiyon ve nörolojik hastalıklar gibi uzun vadeli ve maliyetli sağlık sorunları, bireylerin yaşam kalitesini düşürmekle kalmayıp aynı zamanda sağlık sistemlerini de sürdürülemez hale getirmektedir (Dünya Sağlık Örgütü (WHO). Bu bağlamda, giyilebilir IoT özellikli biyosensör sistemleri yalnızca bireysel sağlık yönetimini dönüştürmekle kalmamakta, aynı zamanda halk sağlığına, sağlık ekonomisine ve sağlık hizmetlerinin erişilebilirliğine doğrudan katkıda bulunmaktadır (Lee et al., 2017).

Bu teknolojilerin sunduğu potansiyel yalnızca izlemeyle sınırlı değildir. Yapay zekâ ile entegre edildiklerinde, bu sistemler hastalıkları erken aşamada tahmin edebilir, kişiselleştirilmiş tedavi planlarını optimize edebilir ve sağlık hizmetlerini zaman, mekan ve insan gücü kısıtlamalarından kurtarabilir (Rajkomar et al., 2019) . Bu durum, "kliniğe gitmeden klinik düzeyde izleme", "hastalıktan önce önleme" ve "tedavi değil, sağlık optimizasyonu" gibi devrim niteliğindeki sağlık hizmetleri yaklaşımlarını mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, bu teknolojilerin uzaktan erişim yetenekleri sayesinde, kırsal kesimde yaşayan veya hareket kabiliyeti kısıtlı bireyler için sağlık hizmetlerine erişim kolaylaşmaktadır; Bu, sağlık hizmetlerinde fırsat eşitliğini artırma yolunda önemli bir adım olarak kabul edilmektedir (Keesara et al., 2020).

Bu çalışma, bu teknolojilerin yalnızca teknik yönlerini değil, aynı zamanda sağlık sistemleri, kullanıcı deneyimleri, veri güvenliği sorunları ve gelecekteki yenilikçi potansiyel üzerindeki etkilerini de çok yönlü bir bakış açısıyla incelemektedir. Teknolojiyi yalnızca anlamak yeterli değildir; aynı zamanda onu sağlık hizmetlerine nasıl entegre edeceğimizi, bireylerin yaşamlarına nasıl değer katacağını ve sistemleri nasıl dönüştüreceğini de derinlemesine analiz etmeliyiz.

GIYİLEBİLİR BİYOSENSÖRLERİN KRONİK HASTALIK TAKİBİNDEKİ ROLÜ

Giyilebilir biyosensör teknolojileri, son yıllarda sağlık hizmetlerindeki dijital dönüşümün merkezinde yer alarak, özellikle kronik hastalıkların yönetiminde devrim niteliğinde bir yenilik sunmaktadır. Bu sensörler, ter, interstisyel sıvı ve deri altı sıvısı gibi vücut sıvılarını analiz ederek biyobelirteçlerin sürekli ve invaziv olmayan bir şekilde izlenmesini sağlar. Bu, bireylerin fizyolojik durumları hakkında gerçek zamanlı veri sağlayarak dinamik sağlık takibine olanak tanır.

Glikoz, kortizol, laktat, ürik asit, elektrolitler (sodyum, potasyum, kalsiyum) ve pH seviyeleri gibi biyobelirteçlerin izlenmesi, diyabet, kardiyovasküler hastalık, böbrek yetmezliği, kronik stres, hormonal dengesizlikler ve metabolik sendrom gibi uzun vadeli durumların yönetimi için kritik öneme sahiptir (Wang et al., 2023). Örneğin, giyilebilir glikoz monitörleri, diyabet hastalarının kan şekeri seviyelerini 7/24 izlemelerine ve insülin dozlarını ayarlarken hekimlere ve hastalara gerçek zamanlı karar desteği sağlamalarına olanak tanır. Benzer şekilde, kortizol seviyelerini ölçen sensörler, bireyin stres seviyesini ve endokrin sistem tepkilerini izleyerek psikolojik veya fizyolojik stres bozukluklarının erken teşhisine katkıda bulunabilir.

Bu biyosensörler genellikle esnek, hafif, biyouyumlu ve nanometre ölçekli malzemelerden üretilir. Bu, cilde kolayca entegre edilebilen ve uzun

sürekli kullanıma uygun cihazların tasarlanmasına olanak tanır. Giyilebilir sensörler, akıllı saatler, cilt bantları, tekstile gömülü sistemler veya şeffaf cilt bantları gibi çeşitli formlarda gelir. Günlük hayata entegre edilebilen bu sistemler, hastanın hareket özgürlüğünü kısıtlamadan klinik düzeyde veri toplanmasına olanak tanır.

Ayrıca, bu sensörler yalnızca veri toplamakla kalmaz, aynı zamanda kablosuz ve bulut bilişim teknolojileriyle entegre olarak toplanan verilerin sağlık uzmanlarına anında iletilmesini sağlar. Bu, hem uzaktan hasta izleme hem de erken müdahale olanaklarını artırır. Örneğin, kalp yetmezliği olan bir hastada ani sıvı birikiminden kaynaklanan riskli bir durum, sensörler aracılığıyla erken tespit edilebilir ve hastaneye yatış önlenebilir.

Aynı zamanda, büyük veri ve yapay zekâ algoritmalarıyla desteklenen bu sistemler, hastanın sağlık geçmişine dayalı risk analizi yapabilir, olası komplikasyonları tahmin edebilir ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Bu, sağlık hizmetlerine yönelik geleneksel, reaktif yaklaşımdan uzaklaşarak daha önleyici ve kişiselleştirilmiş bir sağlık hizmeti modelini benimser.

Ayrıca, bu teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesi, sağlık hizmetlerine sınırlı erişimi olan bireyler için de önemli avantajlar sunmaktadır. Uzaktan izleme yetenekleri, kırsal kesimde yaşayan veya hareket kabiliyeti kısıtlı bireylerin sağlıklarını düzenli olarak takip etmelerini mümkün kılar. Bu da sağlık eşitsizliklerinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Sonuç olarak, giyilebilir biyosensörler yalnızca hastaların yaşam kalitesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda sağlık sistemlerinin sürdürülebilirliğine de katkıda bulunur. Giderek daha gelişmiş ve entegre hale gelen bu sistemler, kronik hastalıkların daha etkili bir şekilde izlenmesini, hastalık ilerlemesinin yavaşlatılmasını ve sağlık hizmetlerinin bireye odaklanacak şekilde yeniden yapılandırılmasını sağlar. Bu bağlamda, giyilebilir biyosensörler modern tıbbın geleceğinde kilit bir rol oynamaktadır.

IoT TABANLI BİYOSENSÖR SİSTEMLERİ: GERÇEK ZAMANLI SAĞLIK TAKİBİ

Günümüzde sağlık teknolojileri, dijitalleşme ve Nesnelerin İnterneti (IoT) entegrasyonu ile hızla dönüşüyor. Özellikle biyosensörlerin IoT altyapısıyla entegrasyonu, kronik hastalıkların yönetiminde devrim niteliğinde yenilikler sunuyor. Bu sistemler, hastaların vücutlarından gerçek zamanlı biyometrik veriler toplayarak bunları kablosuz ağlar aracılığıyla sağlık profesyonellerine gerçek zamanlı olarak iletiyor. Bu sayede hasta sağlığının sürekli izlenmesi, erken uyarılar ve kişiselleştirilmiş tedavi stratejileri oluşturulabiliyor (Hosain et al., 2025).

Bu bölümde, IoT tabanlı biyosensör sistemlerinin teknik altyapısı, sağlık verilerinin gerçek zamanlı izlenmesi, yapay zeka ile entegrasyon ve

uzaktan hasta izleme uygulamaları ayrıntılı olarak ele alınacak. Ayrıca, bu teknolojilerin sağlık sektörü için faydaları, zorlukları ve gelecekteki geliştirme potansiyeli de ele alınacak[14, (Page et al., 2021).

IoT Teknolojisinin Biyosensörlerle Entegrasyonu

Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisi, biyosensörlerin kablosuz iletişim yeteneklerini önemli ölçüde artırarak sağlık verilerinin anında ve kesintisiz toplanmasını sağlar. Örneğin, Fitbit ve Apple Watch gibi akıllı saatler, kalp atış hızını ve kan oksijen seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyerek kullanıcılara anında sağlık bilgileri sağlar. Bu cihazlar, toplanan verileri mobil uygulamalar aracılığıyla sağlık profesyonelleriyle paylaşabilir (Hosain et al., 2025).

Mobil ve Bulut Tabanlı Sağlık İzleme

IoT tabanlı biyosensörlerden elde edilen verilere, mobil uygulamalar ve bulut platformları aracılığıyla hem hastalar hem de sağlık profesyonelleri erişebilir. COVID-19 pandemisi sırasında yaygınlaşan Uzaktan Hasta İzleme (RPM) çözümleri, hastaların solunum ve kalp fonksiyonlarının evlerinden çıkmadan izlenmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, Microsoft Azure Health Bot platformu toplanan sağlık verilerini işleyerek kullanıcılara rehberlik ve önerilerde bulunabilir (Page et al., 2021).

Klinik Karar Destek Sistemleri ve Yapay Zekâ Entegrasyonu

IoT tabanlı biyosensörler tarafından toplanan veriler, yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek kişiselleştirilmiş sağlık yönetimi sağlanır. Örneğin, Biofourmis, hastaların kalp yetmezliği gibi kronik rahatsızlıklarını uzaktan izleyen yapay zekâ destekli biyosensör sistemleri geliştirmiştir. Bu sistemler, hasta rahatsızlıklarındaki değişiklikleri erken tespit ederek tedavi planlarında dinamik güncellemeler yapılmasını sağlar (Hosain et al., 2025).

Uzaktan Hasta İzleme ve Sağlık Hizmetlerine Erişim

Uzaktan hasta izleme uygulamaları, kronik hastalar ve yaşlılar için önemli kolaylıklar sağlar. Philips Uzaktan Hasta İzleme çözümü, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) hastalarının solunum fonksiyonlarını evlerinden izleyerek erken müdahaleyi mümkün kılar. Bu, hastane yükünü azaltır ve hastaların yaşam kalitesini artırır.

Veri Güvenliği ve Gizlilik Yaklaşımları

IoT sağlık cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte veri güvenliği kritik hale gelmiştir. Örneğin, IBM Watson Health platformu, sağlık verilerinin güvenli ve şeffaf bir şekilde paylaşılmasını sağlamak için blok zinciri teknolojisini kullanmaktadır. Ayrıca, HIPAA (Sağlık Sigortası Taşınabilirliği ve Sorumluluk Yasası) ve GDPR (Genel Veri Koruma Yönetmeliği) gibi düzenlemeler, hasta verilerinin gizliliğini korumak için yasal çerçeveler sunmaktadır (Page et al., 2021).

Gelecekteki Potansiyel ve Faydalar

Sensör teknolojilerindeki gelişmeler ve 5G bağlantısının yaygınlaşmasıyla birlikte, IoT tabanlı biyosensör sistemlerinin gerçek zamanlı veri aktarım ve analiz kapasitesi daha da artacaktır. Örneğin, Google Health ve Amazon Care gibi büyük teknoloji şirketleri, sağlık izleme için yapay zekâ destekli çözümler geliştiriyor ve bu teknolojilerin klinik uygulamalara entegrasyonunu hızlandırıyor. Bu gelişmeler, kronik hastalık yönetiminde erken teşhis, kişiselleştirilmiş tedavi ve sağlık hizmetlerine erişimin iyileştirilmesi açısından büyük umut vad ediyor (Hosain et al., 2025) .

EEG/EMG TABANLI NÖROSİNYAL TAKİP SİSTEMLERİ

Günümüz biyoteknoloji uygulamalarında, sinir sistemi tabanlı sinyallerin doğru ve hassas bir şekilde izlenmesi hem klinik tanı süreçlerinde hem de yeni nesil nöroteknolojik arayüzlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, elektroensefalografi (EEG) ve elektromiyografi (EMG) sistemleri, beyin ve kas aktivitesinin izlenmesini sağlayan iki temel nörosinyal ölçüm yöntemidir.

EEG, yüzey elektrotları aracılığıyla beyindeki sinirsel aktiviteyi ölçerek zihinsel durum, uyku düzeni, epileptik ataklar ve diğer nörolojik işlev bozuklukları hakkında değerli bilgiler sağlar. EMG ise kas elektriksel aktivitesini analiz ederek motor kontrol bozuklukları, kas hastalıkları ve sinir iletim sorunlarının değerlendirilmesini sağlar. Bu sistemlerin kullanımı yalnızca tanı ile sınırlı değildir; aynı zamanda inme rehabilitasyonu, nörolojik bozuklukların izlenmesi ve beyin-bilgisayar arayüzü (BBA) teknolojilerinin geliştirilmesi de dâhil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine de yayılmaktadır.

Son yıllarda, nanomalzemelerle geliştirilen esnek ve biyoyumlu elektrotlar sayesinde bu sistemlerin performansı önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca, yapay zekâ tabanlı sinyal işleme teknikleri, EEG ve EMG verilerinden daha hızlı ve daha doğru klinik sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu bölüm, EEG/EMG sistemlerinin temel çalışma prensiplerine, kullanılan biyosensör teknolojilerine ve klinik ve teknolojik uygulamalarına dair

ayrıntılı bir genel bakış sunmakta ve mevcut gelişmeler ile geleceğe yönelik beklentiler hakkında kapsamlı bir tartışma sunmaktadır.

EEG ve EMG Sistemlerinin Temel Prensipleri

Elektroensefalografi (EEG), kafa derisi aracılığıyla beyin elektriksel aktivitesini ölçen invaziv olmayan bir tekniktir. Beyindeki nöronlar tarafından üretilen sinyaller, elektrotlar kullanılarak toplanır ve analiz edilir. Elektromiyografi (EMG) ise kaslardaki elektriksel aktiviteyi ölçer; kas fonksiyonu, kas liflerinin uyarılmasıyla üretilen sinyaller aracılığıyla değerlendirilir. Bu iki biyo-sinyal sistemi, sinir ve kas sistemlerinin sağlığı hakkında ayrıntılı bir tablo sunar (Ferreira et al., 2022),.

Nanomalzemelerle Geliştirilmiş Esnek Elektrot Teknolojileri

Geleneksel elektrotlar genellikle serttir ve uzun süreli kullanımda kullanıcı konforunu sınırlar. Son yıllarda, grafen, altın nanopartiküller ve karbon nanotüpler gibi nanomalzemelerle güçlendirilmiş esnek elektrotlar geliştirilmiştir. Bu elektrotlar cilde uyum sağlayarak hareket sırasında sinyal bozulmasını azaltır ve yüksek kaliteli, gürültüsüz nöro-sinyal kayıtları sağlar (Kim et al., 2021). Ek olarak, bu malzemeler biyouyumlu olup alerjik reaksiyon riskini en aza indirir.

Klinik Uygulamalar ve Nörolojik Hastalık Takibi

EEG, epilepsi gibi nöbet bozukluklarının teşhisinde altın standarttır ve anormal beyin dalgalarının tespit edilmesini sağlar. Parkinson hastalığında, EMG sinyalleri kas spazmlarını ve titremeleri analiz etmek için kullanılır. EEG'nin uyanıklık ve bilişsel durum göstergesi olarak kullanımı Alzheimer ve diğer demans türlerinin izlenmesinde giderek artmaktadır. Ayrıca, EMG inme rehabilitasyonunda kas fonksiyonlarının iyileşmesini objektif olarak izler (Ferreira et al., 2022),.

Beyin-Bilgisayar Arayüzlerinde (BCI) EEG/EMG Kullanımı

Beyin-bilgisayar arayüzleri, EEG ve EMG sinyallerini yorumlayarak engelli bireylerin düşünce gücüyle bilgisayarları, tekerlekli sandalyeleri veya iletişim cihazlarını kontrol etmelerini sağlar. Bu teknoloji aynı zamanda nörorehabilitasyonda da kullanılır ve hastaların motor fonksiyonlarını yeniden kazanmalarına yardımcı olur. Örneğin, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) ve Neuralink gibi araştırma merkezleri, yüksek hassasiyetli EEG tabanlı BCI sistemleri geliştirmektedir[19, (Neuralink, 2023)].

Yapay Zekâ ve Sinyal İşleme Teknikleri

Nöro sinyal verileri karmaşık ve hacimlidir. Yapay zeka algoritmaları (örneğin, makine öğrenimi ve derin öğrenme) bu verileri anlamlandırmak için kullanılır. Bu yöntemler, hastalık belirtilerinin erken tespitini, anormal sinyal örüntülerinin sınıflandırılmasını ve tedavi etkilerinin izlenmesini kolaylaştırır. Örneğin, derin öğrenme modelleri epilepsi ataklarını tahmin etmede başarılı sonuçlar göstermiştir (Wang et al., 2025).

Gelecekteki Gelişmeler ve Zorluklar

EEG/EMG sistemleri daha taşınabilir, kullanıcı dostu ve kablosuz hale gelerek evde kullanımlarını kolaylaştırmaktadır. 5G ve Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) entegrasyonu bu veriler anında sağlık çalışanlarına iletebilir. Ancak, veri gizliliği, uzun süreli kullanımda cilt tahrişi ve yüksek maliyet gibi zorluklar devam etmektedir. Nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmelerle bu sorunların üstesinden gelinmesi beklenmektedir (Ferreira et al., 2022), (Kim et al., 2021).

Tablo 1. Örnekler, teknolojik ürünler ve vaka çalışmaları içerir

Alt Başlık	Spesifik Örnek / Ürün	Açıklama ve Vaka Çalışması	Kaynaklar
EEG ve EMG Sistemlerinin Temel Prensipleri	NeuroSky MindWave	Kullanıcıların beyin dalgalarını ölçerek odaklanma ve rahatlama durumlarını değerlendiren taşınabilir EEG cihazı.	(NeuroSky, 2023)
Nanomalzemeler ile Geliştirilmiş Esnek Elektrot Teknolojileri	Graphene Electronics' Esnek Elektrot	Grafen bazlı esnek elektrotlar, uzun süreli EEG/EMG ölçümlerinde yüksek konfor ve hassasiyet sağlar.	(Wang et al., 2023).
Klinik Uygulamalar ve Nörolojik Hastalık Takibi	Emotiv EPOC+	Epilepsi hastalarında EEG ile nöbet izleme, beyin dalgası analizinde kullanılan	(Delsys Inc., 2023; Chen et al., 2022) (Emotiv, 2024)

		kablosuz EEG başlığı. Kas aktivitesini yüksek doğrulukla ölçen, rehabilitasyon süreçlerinde tercih edilen kablosuz EMG sistemi.	
	Delsys Trigno EMG Sistemi		
		Elon Musk'ın geliştirdiği implant tabanlı BCI teknolojisiyle felçli hastaların cihaz kontrolü sağlanması. Kas hareketlerini EMG sinyalleriyle okuyup cihaz kontrolü sağlayan bileklik, engelli kullanıcılar için iletişim kolaylığı.	(Meta Reality Labs, 2024). (Elon Musk, 2024) (Neuralink, 2023)
Beyin-Bilgisayar Arayüzlerinde (BCI) EEG/EMG Kullanımı	Neuralink		
	CTRL-Labs (Facebook)		
	Epilog Neural's AI Destekli EEG	önceden tahmin eden, makine öğrenimi tabanlı sinyal işleme algoritmaları kullanılır. Kas hastalıkları takibinde yapay zekâ destekli EMG verisi analizi ile kişiselleştirilmiş tedavi önerileri.	(Epilog Neural, 2023; Roy et al., 2022).
Yapay Zeka ve Sinyal İşleme Teknikleri	Biofourmis AI EMG Analiz Platformu		(Biofourmis, 2023).
	Neuroelectrics Starstim	Kablosuz, taşınabilir EEG sistemi; 5G ile	
Geleceğe Yönelik Gelişmeler ve			

Zorluklar

	gerçek zamanlı veri aktarımı ve klinik uzaktan izleme olanakları sağlar.	
	Parkinson ve epilepsi tedavisinde kullanılan implant tabanlı nörostimülasyon cihazları, nörolojik hastalık yönetiminde yenilikçi bir yaklaşım.	(Neuroelectronics, 2024). (Medtronic, 2023; Lozano et al., 2022).
Medtronic Deep Brain Stimulation (DBS)		

Bu tablo, EEG ve EMG tabanlı nörosinyal takip sistemlerinin çeşitli alt alanlarında kullanılan güncel teknolojik ürünler, spesifik örnekler ve ilgili vaka çalışmaları hakkında özet bilgiler sunmaktadır. Her bir alt başlık, alanın klinik uygulamalarını, nanomalzeme teknolojilerini, yapay zekâ entegrasyonunu ve gelecekteki gelişmeleri kapsamaktadır.

GELECEK PERSPEKTİFİ

Giyilebilir ve IoT destekli biyosensör sistemleri, günümüzde kronik hastalıkların takibinde sağladıkları kolaylıkların ötesinde, dijital sağlık yönetiminin tüm katmanlarında köklü değişimler yaratmaktadır. Bu sistemler, sadece hasta verilerinin toplanması ve izlenmesiyle sınırlı kalmayıp; aynı zamanda yapay zekâ, büyük veri analitiği ve makine öğrenimi gibi ileri teknolojilerle birleşerek sağlık hizmetlerinin kişiselleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Smith et al., 2024).

Gelecekte, biyosensörlerden toplanan verilerin yapay zekâ destekli analizlerle hastalıkların erken evrede tespiti, risk faktörlerinin önceden belirlenmesi ve bireysel sağlık profillerine dayalı önleyici müdahalelerin geliştirilmesi beklenmektedir (Johnson & Lee, 2025). Bu da, hastalıkların ortaya çıkmasını önleyerek sağlık sistemlerinin üzerindeki yükü azaltacak ve hasta yaşam kalitesini önemli ölçüde artıracaktır.

Ayrıca, 5G ve ötesi kablosuz iletişim teknolojilerinin yaygınlaşması ile sensörlerden gelen veriler neredeyse anlık olarak sağlık profesyonellerine ulaşabilecek, uzaktan hasta takibi ve acil müdahale süreçleri daha etkin hale gelecektir (Wang et al., 2024). Gelişen nanoteknoloji ve malzeme bilimleri sayesinde, biyosensörler daha küçük, esnek ve uzun ömürlü hale gelerek

kullanıcılara konforlu ve kesintisiz sağlık takibi imkânı sunacaktır (BioIntelliSense, 2025).

Dahası, blockchain gibi güvenli veri paylaşım teknolojilerinin entegrasyonu ile hasta mahremiyeti korunurken, sağlık verilerinin çeşitli kurumlar arasında güvenli ve şeffaf şekilde paylaşılması sağlanacaktır (Garcia & Patel, 2024). Bu sayede, farklı sağlık hizmet sağlayıcıları arasında koordinasyon artacak ve daha bütüncül bir sağlık yönetimi mümkün olacaktır.

Son Uygulama Örnekleri:

Apple Watch Series 9: Yeni nesil Apple Watch, kan oksijen seviyesinin yanı sıra EKG (elektrokardiyogram) ve atriyal fibrilasyon tespiti gibi gelişmiş kalp sağlığı takibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Bu cihaz, gerçek zamanlı verileri hem kullanıcının kendisine hem de doktorlara aktararak proaktif sağlık yönetimine olanak tanımaktadır (Apple, 2025).

BioIntelliSense BioSticker: ABD merkezli BioIntelliSense'in geliştirdiği bu biyosensör, hastaların vital bulgularını (ateş, kalp hızı, solunum hızı) uzun süreli olarak ev ortamında kesintisiz izlemesini sağlar. COVID-19 ve diğer solunum yolu hastalıklarının erken tespiti için kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Google Health AI: Google'ın yapay zekâ destekli sağlık platformu, biyosensörlerden gelen verileri analiz ederek diyabet, kalp hastalıkları ve kanser gibi kronik rahatsızlıkların erken teşhisini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, klinik karar destek sistemleri ile doktorların tanı ve tedavi süreçlerine katkı sağlamaktadır (Google Health, 2025).

Philips Remote Patient Monitoring (RPM): Philips'in sunduğu bu çözüm, kronik hastalar için uzaktan takip imkânı sunarken, toplanan verileri bulut tabanlı platformda analiz ederek kişiye özel tedavi önerileri sağlamaktadır. Bu sistem, özellikle KOAH ve kalp yetersizliği hastalarında erken müdahaleyi kolaylaştırmaktadır (Philips, 2025).

Sonuç olarak, biyosensör teknolojilerinin yapay zekâ ve iletişim teknolojileri ile birleşimi, sağlık sektöründe paradigmanın önleyici, kişiselleştirilmiş ve sürekli izleme odaklı bir yapıya dönüşmesini tetikleyecek, sağlık hizmetlerinin etkinliği ve erişilebilirliği önemli ölçüde iyileştirilecektir. Bu dönüşüm, sadece kronik hastalıkların yönetiminde değil, genel olarak bireylerin sağlıklı yaşam sürdürmelerinde de devrim niteliğinde fırsatlar sunmaktadır (Smith et al., 2024).

SONUÇ

Bu çalışma, giyilebilir ve Nesnelerin İnterneti (IoT) destekli biyosensör sistemlerinin sağlık izlemedeki artan önemini ve potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Literatür taraması ve güncel uygulama örnekleri, bu teknolojilerin kronik hastalık yönetiminden nörolojik durum

izlemeye kadar çok çeşitli konularda etkili çözümler sunduğunu göstermektedir.

Giyilebilir biyosensörler, hastaların gerçek zamanlı sağlık verilerinin sürekli izlenmesini sağlayarak erken teşhis, koruyucu tedavi ve kişiselleştirilmiş sağlık yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır. IoT teknolojisiyle entegrasyon, veri iletiminde süreklilik ve erişilebilirlik sağlarken, yapay zeka destekli analiz, toplanan verilerin yorumlanmasında ve klinik karar destek sistemlerine dönüştürülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu, sağlık hizmetlerinin kalitesini artırır, hasta katılımını güçlendirir ve sağlık sistemlerinin genel verimliliğini artırır.

Ancak, bu teknolojilerin yaygın olarak benimsenmesinin önünde engeller de bulunmaktadır. Veri güvenliği ve gizliliği, özellikle sağlık hizmetlerinde hassas verilerin korunması için hayati önem taşımaktadır. Ayrıca, cihaz maliyeti, kullanıcı adaptasyonu ve uzun süreli kullanım sırasında olası fizyolojik etkiler gibi faktörler, bu teknolojilerin sürdürülebilir ve yaygın kullanımını sınırlayabilir. Bu noktada, malzeme bilimi ve nanoteknolojideki gelişmeler, daha kullanıcı dostu, uygun maliyetli ve güvenli biyosensörlerin geliştirilmesini mümkün kılacaktır.

Geleceğe baktığımızda, 5G ve sonrasında iletişim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla, biyosensör verilerinin anlık ve kesintisiz iletimi mümkün olacak ve yapay zekâ algoritmalarının gelişmesiyle hastalıkların öngörücü analizi daha da hassas hale gelecektir. Ayrıca, blockchain gibi güvenli veri paylaşım teknolojilerinin entegrasyonu, hasta mahremiyetini korurken sağlık verilerinin güvenli bir şekilde paylaşılmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, giyilebilir ve IoT tabanlı biyosensör sistemleri, sağlık sektöründeki paradigmaları değiştirecek ve bireysel sağlık yönetiminde devrim yaratacak önemli teknolojik gelişmelerdir. Bu sistemlerin klinik pratikte entegrasyonu ve yaygın kullanımı, daha sağlıklı toplumlar yaratma yolunda kritik bir adımdır. Gelecekte, disiplinlerarası iş birliği ve sürekli teknolojik inovasyon, bu alandaki fırsatları en üst düzeye çıkarmamızı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

- Alves, G. R., Oliveira, J. L., & Silva, F. M. (2022). Wearable biosensors for personalized health monitoring: Technologies and trends. *Journal of Biomedical Informatics*, 128, 104072.
- Apple. (2025). Apple Watch Series 9: Health features overview. Apple
- BioIntelliSense. (2025). BioSticker: Continuous health monitoring platform. BioIntelliSense
- Chen, X., Zhang, X., & Zhou, P. (2022). Wearable EMG systems and their applications in rehabilitation: A review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 15, 1–15.
- Delsys Inc. (2023). Trigno wireless EMG system documentation. Delsys Inc.
- Emotiv. (2024). EPOC+ EEG headset specifications. Emotiv

- Epilog Neural. (2023). Clinical AI whitepaper. Epilog Neural
- Ferreira, J. A., Campos, D., & Rocha, L. A. (2022). Flexible and biocompatible sensors for neural monitoring: Materials and applications. *Advanced Healthcare Materials*, 11(3), 2101837.
- Garcia, P., & Patel, S. (2024). Blockchain technology in healthcare data security: A systematic review. *Journal of Medical Internet Research*, 26(4), e32055.
- Google Health. (2025). Transforming healthcare with AI: Google Health initiatives. Google Health
- Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., & Kim, J. (2018). Wearable sensors: Modalities, challenges, and prospects. *Lab on a Chip*, 18(2), 217–248.
- Hosain, M. S., Amin, M. B., & Hossain, M. I. (2025). IoT-based healthcare systems: A review of recent trends and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(4), 1550–1562.
- Johnson, M. A., & Lee, K. Y. (2025). Early detection of chronic diseases using AI-integrated wearable biosensors. *International Journal of Medical Informatics*, 185, 105025.
- Keesara, S., Jonas, A., & Schulman, K. (2020). Covid-19 and health care’s digital revolution. *New England Journal of Medicine*, 382(23), e82.
- Kim, H. J., Lee, S. Y., & Park, J. (2021). Nanomaterials in wearable biosensors for real-time monitoring: Recent progress and perspectives. *ACS Nano*, 15(1), 2065–2085.
- Lee, C. H., Yoon, H. J., & Kim, S. Y. (2017). Smart wearable sensor and device in healthcare. *Journal of Medical Systems*, 41(6), 118.
- Lozano, A. M., Lipsman, N., & Bergman, H. (2022). Deep brain stimulation: Current challenges and future directions. *Nature Reviews Neurology*, 18(3), 148–160.
- MarketsandMarkets. (2024). IoT in healthcare market: Global forecast to 2025. MarketsandMarkets
- Medtronic. (2023). Deep brain stimulation therapy: Clinical evidence update. Medtronic
- Meta Reality Labs. (2024). EMG wristband research update. Meta Reality Labs
- Musk, E. (2024). Neuralink and the brain’s magical future. *Neuralink White Paper Series* (Vol. 2). Elon Musk
- Neuralink. (2023). An integrated brain-machine interface platform: Progress update. Neuralink
- Neuroelectrics. (2024). Starstim clinical update. Neuroelectrics
- NeuroSky. (2023). MindWave mobile 2 documentation. NeuroSky
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). Updating guidance for reporting systematic reviews: The PRISMA 2020 statement. *Journal of Clinical Epidemiology*, 134, 103–112.
- Patel, S., Park, H., Bonato, P., Chan, L., & Rodgers, M. (2012). A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 9(1), 21.
- Philips. (2025). Remote patient monitoring solutions. Philips
- Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I. (2019). Machine learning in medicine. *New England Journal of Medicine*, 380(14), 1347–1358.

- Roy, Y., Banville, H., Albuquerque, I., Gramfort, A., Falk, T. H., & Faubert, J. (2022). Deep learning-based electroencephalography analysis: A systematic review. *Journal of Neural Engineering*, 19(2), 021001.
- Seshadri, D. R., Li, R. T., Voos, J. E., Rowbottom, J. R., Alfes, C. M., Zorman, C. A., & Drummond, C. K. (2020). Wearable sensors for monitoring the internal and external workload of the athlete. *NPJ Digital Medicine*, 3(1), 103.
- Smith, D. T., Johnson, M. A., & Lee, K. Y. (2024). Predictive analytics in digital health: Integrating AI and biosensor data. *Health Informatics Journal*, 30(1), 122–140.
- Statista. (2024). Digital health market outlook 2025. Statista
- Wang, H., Liu, Z., & Cheng, G. (2025). Deep learning approaches for epileptic seizure prediction using EEG. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 33, 214–222.
- Wang, L., et al. (2024). Impact of 5G networks on remote healthcare monitoring. *Sensors*, 24(3), 870.
- Wang, R., Zhang, L., Xu, Y., & Sun, Y. (2023). Real-time monitoring of multiple biomarkers using wearable sensors: A review. *Sensors*, 23(4), 1521.
- Wang, Y., Li, T., & Zhang, X. (2023). Flexible graphene-based bioelectrodes for electrophysiological signal acquisition. *Advanced Materials*, 35(10), 2208765.
- World Health Organization. (2023). Digital health and innovation report: Post-pandemic strategies. World Health Organization
- World Health Organization. (2020). Global status report on chronic diseases. World Health Organization

Kronik Hastalık Yönetiminde Giyilebilir Teknolojilerin Yükselişİ

Zülfü TÜYLEK¹

1- Öğr. Gör. Zülfü TÜYLEK; Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü. zulfu.tuylek@ozal.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9086-1327

ÖZET

Kronik hastalıkların erken teşhisi ve sürekli takibi, hastaların yaşam kalitesini iyileştirmek, hastalığın ilerlemesini yavaşlatmak ve komplikasyonları önlemek için çok önemlidir. Geleneksel izleme yöntemleri genellikle hastaneye bağlı, zaman alıcı ve invaziv olsa da, giyilebilir biyosensörler yenilikçi ve kullanıcı dostu bir alternatif sunar.

Giyilebilir biyosensörler, glikoz, laktat ve kortizol gibi biyobelirteçleri invaziv olmayan ve gerçek zamanlı olarak izleyerek bireylerin sağlık durumlarını anında değerlendirmelerine olanak tanır. Bu, diyabet, hipertansiyon ve kardiyovasküler hastalık gibi yaygın kronik rahatsızlıkların daha etkili bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Bu sistemlerde kullanılan nanomalzemeler, sensörlerin hassasiyetini ve biyouyumluluğunu artırarak daha güvenilir ve doğru ölçümler sağlar. Ayrıca, evde sağlık izleme ve uzaktan hasta izleme uygulamaları aracılığıyla sağlık hizmetlerinin dijitalleşmesine önemli ölçüde katkıda bulunurlar.

Bu çalışma, giyilebilir biyosensör teknolojilerinin temel çalışma prensiplerini, nanoteknolojinin sunduğu avantajları ve bu sistemlerin kronik hastalık izleme için mevcut uygulamalarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Anahtar Kelimeler – Giyilebilir Biyosensörler, Kronik Hastalık Yönetimi, Nanoteknoloji, Gerçek Zamanlı Sağlık Takibi, Uzaktan Hasta İzleme

GİRİŞ

Diyabet, kardiyovasküler hastalık ve kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) gibi kronik hastalıklar, dünya çapında hem ölüm hem de morbiditenin önde gelen nedenleri arasındadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, yıllık ölümlerin yaklaşık %71'i kronik hastalıklardan kaynaklanmaktadır (who, 2020). Hastaların fizyolojik parametrelerinin düzenli olarak izlenmesi, bu hastalıkların etkili bir şekilde yönetilmesi, semptomların kontrol altına alınması, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve komplikasyonların önlenmesi için hayati önem taşımaktadır. Ancak, bu izlemenin geleneksel yöntemlerle (örneğin, klinik ortamda periyodik kontroller aracılığıyla) yapılması, hasta için hem zaman alıcı hem de külfetli olabilir. Ayrıca, sağlık hizmetlerine erişimin sınırlı olduğu bölgelerde bu yöntemler yetersiz kalabilir.

Bu nedenle, bireylerin kendi ortamlarında sağlık durumlarını sürekli ve gerçek zamanlı olarak izlemelerine olanak tanıyan giyilebilir biyosensör teknolojileri, son yıllarda önemli bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir. Mobil sağlık (mHealth) ve dijital sağlık çözümlerinin geliştirilmesiyle bütünleşen bu sistemler, hastane merkezli bakımın birey merkezli, koruyucu sağlık hizmetleriyle değiştirilmesini mümkün

kılmaktadır (Chen et al., 2022; Heikenfeld et al., 2018). Giyilebilir biyosensörler, özellikle glikoz, kalp atış hızı, kan basıncı, vücut sıcaklığı ve solunum hızı gibi temel fizyolojik göstergeleri invaziv olmayan ve sürekli olarak izleyerek kronik hastalıkların daha erken tespit edilmesine ve daha iyi yönetilmesine katkıda bulunmaktadır (Gao et al., 2016).

GIYİLEBİLİR BİYOSENSÖRLERİN TEMEL YAPISI ve İŞLEVİ

Giyilebilir biyosensörler, vücutla sürekli temas halinde kalarak fizyolojik verileri gerçek zamanlı olarak toplayıp analiz eden ileri teknoloji sistemlerdir. Genellikle bileklik, akıllı saat, bandaj, tişört veya doğrudan cilde uygulanabilen mikro cihazlar gibi akıllı tekstiller olarak tasarlanırlar. Bu sensörler kullanıcı konforunu ön planda tutar ve sağlık takibini günlük yaşamın doğal bir parçası haline getirmeyi amaçlar (Wu et al. 2025).

BİYOLOJİK SIVILAR VE BİYOBELİRTEÇLER

Son yıllarda giyilebilir biyosensör teknolojileri, bireylerin sağlık durumlarının gerçek zamanlı ve invaziv olmayan bir şekilde izlenmesini sağlayan yenilikçi çözümler sunmuştur. Bu teknolojiler, doğal olarak atılan biyolojik sıvılardan (örneğin ter, interstisyel sıvı [ISF], tükürük ve gözyaşı) elde edilen biyobelirteçleri analiz ederek bireyin metabolik durumu hakkında önemli bilgiler sağlar (Heikenfeld et al., 2018).

Bu biyolojik sıvılar sistemik dolaşımla yakından bağlantılı olduğundan, glikoz, laktat ve kortizol gibi çeşitli biyobelirteçlerin izlenmesi için oldukça uygundur. Bu tür biyobelirteçlerin sürekli ve gerçek zamanlı izlenmesi, yalnızca hastalık takibi için değil, aynı zamanda erken teşhis, tedavi yanıtının değerlendirilmesi ve kişiselleştirilmiş sağlık yönetimi için de büyük bir potansiyel taşımaktadır (Kim et al., 2019).

Glikoz, özellikle diyabet hastaları için kritik bir biyobelirteçtir. ISF aracılığıyla glikoz ölçen giyilebilir sensörler, parmak delme ihtiyacını azaltır, kullanıcı konforunu artırır ve daha sık veri toplanmasına olanak tanır. Bu, hiperglisemi ve hipoglisemi gibi potansiyel olarak tehlikeli durumların daha erken tespit edilmesini sağlar (Bandodkar ve Wang, 2014). Ayrıca, enzim tabanlı elektrokimyasal sensörlerin doğruluğu ve kullanıcıya özel kalibrasyon yetenekleri, bu alandaki teknolojik gelişmeleri yansıtmaktadır (Lee et al., 2021).

Laktat, özellikle fiziksel aktivite sırasında anaerobik metabolizmanın bir sonucu olarak üretilir ve kas yorgunluğu, egzersiz seviyesi ve metabolik stres gibi durumları değerlendirmek için kullanılır. Giyilebilir laktat sensörleri genellikle ter bazlıdır ve fiziksel performans izleme, sporcu sağlığı

ve rehabilitasyon süreçlerinde kullanılır (Jeangros et al., 2021). Bu cihazlar, egzersiz sırasında laktat seviyelerindeki değişiklikleri anında ölçerek kullanıcıya biyolojik geri bildirim sağlar (Ray et al., 2019).

Kortizol, stres seviyelerinin izlenmesi için önemli bir hormondur. Hipotalamik-hipofiz-adrenal (HPA) ekseninin aktivitesini yansıtan kortizol, sirkadiyen ritimle dalgalanır. Giyilebilir sensörlerle kortizol seviyelerinin sürekli izlenmesi, ruh sağlığı, stres yönetimi ve uyku bozuklukları gibi alanlarda klinik karar destek sistemlerine katkıda bulunabilir (Gao vd., 2016). Tükürük bazlı kortizol sensörleri, invaziv olmayan örnekleme yöntemleriyle entegre edilerek günlük kullanım için kullanıcı dostu bir çözüm sunabilir (Nyein vd., 2021).

Bu biyobelirteçlerin sürekli izlenmesi, akut durumlarda hızlı müdahaleye olanak tanır, kronik hastalıkların yönetimini kolaylaştırır ve bireylerin günlük sağlık verilerinin analizini mümkün kılar. Bu bağlamda, yapay zeka destekli analiz sistemleriyle birleştirilmiş biyosensör platformları, daha akıllı ve daha uyarlanabilir sağlık yönetimi araçlarının önünü açmaktadır (Lee vd., 2021). Giyilebilir sistemlerin yalnızca tıbbi uygulamalarda değil, aynı zamanda tüketici sağlığı, zindelik ve psikolojik refah gibi alanlarda da yaygınlaşması beklenmektedir (Ray vd., 2019).

SENSÖR TÜRLERİ

Giyilebilir biyosensörler, farklı biyobelirteçleri ve fizyolojik parametreleri tespit etmek için çeşitli algılama mekanizmalarına dayalı teknolojiler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sensörler genellikle elektrokimyasal, optik, piezoelektrik ve mekanik sistemler olarak sınıflandırılır. Her teknoloji, hedeflenen biyobelirteç ve kullanım amacına bağlı olarak avantajlar sunar. Giyilebilir biyosensörler, elektrokimyasal, optik, piezoelektrik ve mekanik dahil olmak üzere çeşitli teknolojiler kullanılarak üretilir:

Elektrokimyasal Sensörler

Elektrokimyasal sensörler, en yaygın kullanılan giyilebilir biyosensör türüdür. Bu sensörler, genellikle enzimatik reaksiyonlarla tetiklenen kimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen elektrik sinyallerini ölçer. Örneğin, glikoz sensörlerinde glikoz oksidasyonu, glikoz oksidaz enzimi kullanılarak gerçekleştirilir ve bu işlem sırasında üretilen hidrojen peroksit miktarı amperometrik olarak ölçülür (Bandodkar et al., 2014). Elektrokimyasal sensörler, yüksek hassasiyet, düşük maliyet ve küçük boyut avantajları nedeniyle diyabet takibinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca laktat, ürik asit ve çeşitli elektrolitlerin izlenmesinde kullanılmak üzere de geliştirilmektedirler.

Optik Sensörler

Optik sensörler, ışığın emilim, yansıma, kırılma veya floresan özellikleri aracılığıyla biyobelirteçleri analiz eder. Bu tür sensörler genellikle kalp atış hızı, oksijen satürasyonu (SpO₂), kan dolaşımı ve cilt sıcaklığı gibi parametreleri izlemek için kullanılır. Örneğin, fotopletismografi (PPG) tekniği kalp atış hızını ve oksijen satürasyonunu ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Bu sistemlerde LED'ler ve fotodiyotlar birlikte çalışır; LED ışığı cilde iletir ve fotodiyot, yansıyan veya iletilen ışığı algılayarak kan hacmindeki değişiklikleri yorumlar (Jeong et al., 2021). Optik sensörler, invaziv olmayan yapıları nedeniyle uzun süreli kullanıma uygundur.

Piezoelektrik Sensörler

Piezoelektrik sensörler, fiziksel deformasyon sonucu elektrik sinyalleri üretebilen malzemeler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu sensörler, kas kasılması, nabız, solunum döngüsü ve hareket takibi gibi mekanik değişiklikleri algılayabilir. Piezoelektrik sensörler, özellikle mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) kullanılarak geliştirilenler, son derece hassas ve enerji tasarruflu cihazlardır (Dagdeviren et al., 2017). Spor ve rehabilitasyon uygulamalarında vücut hareketlerinin hassas bir şekilde izlenmesinde oldukça etkilidirler. Enerji hasadı teknolojileriyle entegre edilerek kendi enerjisini üretebilen sistemler geliştirmek de mümkündür.

VERİ İLETİMİ VE ENTEGRASYONU

Toplanan biyolojik veriler genellikle kablosuz iletişim protokolleri (Bluetooth, NFC, Wi-Fi vb.) aracılığıyla bir mobil uygulamaya veya bulut tabanlı veri platformuna iletilir. Bu yapı, hem hastaların hem de sağlık çalışanlarının verilere gerçek zamanlı olarak erişebilmesini sağlar ve anormallik durumunda sistem otomatik uyarılar gönderebilir. Bu yapı, kişiselleştirilmiş tıbbi uygulamalar, uzaktan hasta takibi ve koruyucu sağlık hizmetleri için önemli avantajlar sunar.

NANOMALZEME DESTEKLİ SİSTEMLERİN ROLÜ

Giyilebilir biyosensörlerin geliştirilmesi, cihaz tasarımıyla sınırlı olmayıp aynı zamanda malzeme bilimi ile de doğrudan ilişkilidir. Geleneksel sensör platformlarının karşılaştığı temel zorluklar arasında düşük sinyal doğruluğu, biyolojik ortamlarda kararsızlık, sınırlı seçicilik ve kısa ömür yer almaktadır. Nanomalzeme teknolojilerinin entegrasyonu, bu sınırlamaların büyük ölçüde üstesinden gelmiş ve giyilebilir sensörlerin sağlık alanında daha güvenilir, hassas ve çok işlevli sistemler haline gelmesini sağlamıştır (Tan et al., 2024).

ARTAN HASSASIYET VE SEÇİCİLİK

Nanomalzemeler, yüksek yüzey-hacim oranları sayesinde biyobelirteçlerle çok daha etkili bir şekilde etkileşime girebilir ve böylece sinyal kalitesini önemli ölçüde iyileştirebilir. Özellikle, grafen, karbon nanotüpler (CNT'ler) ve altın nanopartiküller (AuNP'ler) gibi iletken nanoyapılar sensör elektrotlarına entegre edildiğinde, elektron transfer hızını artırarak daha net ve güçlü elektrokimyasal sinyaller sağlar (Kostarelos et al., 2014).

Sonuç olarak, sensörün minimum tespit limiti (LOD) düşer; yani çok düşük molekül konsantrasyonları bile tespit edilebilir. Bu, hastalığın erken teşhisi için kritik öneme sahiptir. Örneğin, semptomlar ortaya çıkmadan önce kan şekeri seviyelerinde meydana gelen bir düşüş, glikoz sensörleriyle erken tespit edilebilir ve hipoglisemi riski önlenir.

ÇOKLU BİYOBELİRTEÇ İZLEME

Kronik hastalıkların seyri genellikle birden fazla biyolojik parametredeki değişikliklerle yakından bağlantılıdır. Bu durum, tek bir biyobelirteci izleyerek bu hastalıkları yeterince anlamayı zorlaştırır. Geleneksel biyosensör sistemleri genellikle glikoz seviyeleri gibi tek bir parametreyi izlerken, bu yaklaşım birçok klinik durumda yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda geliştirilen nanoyapı kaplı elektrot yüzeyleri, farklı biyoreseptörlerle işlevselleştirilebilmeleri sayesinde aynı platformda birden fazla biyobelirtecin eş zamanlı olarak izlenmesine olanak tanır (Gao et al., 2016; Bandodkar et al., 2021). Bu teknoloji, özellikle kronik hastalıkların teşhis, takip ve tedavisinde daha kapsamlı ve kişiselleştirilmiş bir yaklaşım sunar.

Örneğin, glikoz + laktat + pH'ı birleştiren sensörler, diyabetli bireylerde yalnızca kan şekeri seviyelerinin izlenmesini değil, aynı zamanda egzersiz sonrası kas yorgunluğunun değerlendirilmesini de mümkün kılar. Laktat, hücresel düzeyde anaerobik metabolizmanın bir göstergesi olarak hizmet ederken, pH değişiklikleri kas dokusundaki metabolik dengede bir bozulmaya işaret edebilir. Bu parametrelerin glikoz ile birlikte izlenmesi, hastanın metabolik durumunun daha bütünsel bir değerlendirmesine olanak tanır (Kim vd., 2019).

Benzer şekilde, kortizol + cilt sıcaklığı + kalp atış hızı kombinasyonu, stres ve anksiyete gibi psikofizyolojik durumların yönetimini hedefleyebilir. Kortizol, stres tepkisinin temel bir biyobelirteçidir ve otonom sinir sistemi tarafından düzenlenen kalp atış hızı ve cilt sıcaklığı gibi fizyolojik sinyallerle birlikte değerlendirildiğinde, bireyin zihinsel ve fizyolojik durumunu daha net bir şekilde ortaya çıkarabilir (Heikenfeld vd., 2018).

Bu tür çoklu biyobelirteç izleme sistemleri, yalnızca semptom temelli değil, hastalığın altında yatan fizyolojik süreçlere dayanan bütünsel bir sağlık yaklaşımı sağlar. Dahası, sürekli ve gerçek zamanlı veri toplama yeteneğine sahip bu sensör platformları, kişiselleştirilmiş tıp uygulamaları için güçlü bir temel sağlar. Bu teknolojiler, kronik hastalık yönetimini daha proaktif, önleyici ve hasta merkezli bir yaklaşıma dönüştürme potansiyeline sahiptir (Tan et al., 2024).

BİYOUYUMLULUK, ESNEKLİK VE KARARLILIK

Giyilebilir biyosensörler, doğrudan ciltle temas ettikleri için, kullanılan malzemelerin biyouyumlu, esnek, dayanıklı ve çevresel koşullara dirençli olması büyük önem taşır. Bu sensörlerin kullanıcı üzerinde tahriş, alerji veya inflamatuvar yanıt oluşturmada güvenli şekilde çalışabilmesi, malzeme seçiminin hassasiyetini artırmaktadır. Bu bağlamda, nanomalzemeler yalnızca elektronik performanslarıyla değil, aynı zamanda biyolojik sistemlerle uyumlu yapıları sayesinde giyilebilir teknolojilerde öne çıkmaktadır (Someya et al., 2016).

Özellikle bazı nanomalzeme türleri, bu çok yönlü gereksinimleri karşılayabilecek özellikler taşır:

Grafen Oksit (GO)

Grafen oksit, esnekliği, büyük yüzey alanı ve hidrofilik fonksiyonel grupları sayesinde hem mekanik hem de kimyasal olarak ciltle uyumludur. Ayrıca toksik olmayan yapısı ve antibakteriyel özellikleri, onu uzun süreli deri teması gerektiren uygulamalarda ideal hâle getirir (Zhao et al., 2020). GO, aynı zamanda iletkenlik açısından da yeterli performans sunarak sinyal iletiminde verimlilik sağlar.

Altın Nanopartiküller (AuNP'ler)

Altın nanopartiküller, biyolojik sistemlerle yüksek uyumluluk gösteren inert malzemelerdir. Yüzeyleri kolayca fonksiyonelleştirilebildiği için biyomoleküllerle spesifik bağlar kurabilirler. Ayrıca bağışıklık sistemi tarafından genellikle tolere edilirler; bu da inflamatuvar reaksiyon riskini azaltır (Dreaden et al., 2012). Bu özellikler, özellikle uzun vadeli biyosensör implantlarında kritik rol oynar.

Metal-Organik İskeletler (MOF'ler)

MOF'ler, son derece gözenekli ve düzenli yapıları sayesinde gaz, iyon ve küçük moleküllerin seçici geçişine olanak tanır. Bu özellikleri, ter analizi, nefes sensörleri ve kimyasal buhar algılama gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlar (Kreno et al., 2012). Aynı zamanda bazı MOF türleri biyolojik olarak parçalanabilir yapıdadır ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da tercih edilir (He et al., 2023).

Nanomalzemelerin bir diğer önemli avantajı ise çevresel kararlılıklarıdır. Nem, sıcaklık, pH, mekanik gerilme gibi dış etkenlere karşı dirençli yapıları sayesinde bu malzemeler, sensörlerin uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlar. Özellikle polimer matrislerle birlikte kullanıldıklarında, esnekliğini kaybetmeden bükülebilir, katlanabilir ve vücut hareketlerine uyum sağlayabilirler (Rogers et al., 2010). Bu da hem ölçüm doğruluğunu artırır hem de kullanıcı konforunu optimize eder.

Sonuç olarak, giyilebilir biyosensörlerin fonksiyonel başarısı yalnızca algılama hassasiyetine değil, aynı zamanda biyoyumluluk, esneklik ve çevresel dayanıklılık gibi malzeme kaynaklı özelliklere de bağlıdır. Nanomalzemeler, bu çok boyutlu gereksinimleri karşılayarak sensörlerin performansını ve kullanım süresini önemli ölçüde artırmaktadır.

ENTEĞRE SİSTEMLER İÇİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE UYGUNLUK

Bazı nanomalzemeler yalnızca sensör işlevi görmekle kalmaz, aynı zamanda enerji üretimi ve depolamasında da kullanılır. Örneğin: Piezoelektrik nanomalzemeler (örneğin, ZnO nanotel yapıları), vücut hareketlerinden enerji üretebilir.

Esnek süper kapasitörler veya mikro piller, sensör sistemlerine entegre edilerek harici bir güç kaynağına olan ihtiyacı ortadan kaldırabilir. Bu, nanomalzeme destekli giyilebilir sensörlerin yalnızca veri toplamasını değil, aynı zamanda kendi enerjilerini üretebilen ve verileri kablosuz olarak iletebilen akıllı sistemler haline gelmesini sağlar (He et al., 2023).

SPR (Yüzey Plazmon Rezonansı), optik biyosensörlerde kullanılan yüksek hassasiyetli bir ölçüm yöntemidir. Kuantum Noktaları, bunlar ışığa duyarlı, nano ölçekli yarı iletken kristallerdir. Sensör yüzeyinde floresan etkisi yaratırlar. ZnO Nanoteller ise hem sensör hem de enerji kaynağı olarak kullanılan piezoelektrik bir nanomalzemedir.

Tablo 1. Nanomalzeme destekli giyilebilir biyosensör uygulamaları

Nanomalzeme Türü	Sensör Tipi	İzlenen Biyobelirteç(ler)	Uygulama Alanı	İlgi Çekici Özellik	Kaynak
Grafen oksit (GO)	Elektrokimyasal	Glikoz, Laktat	Diyabet yönetimi	1 μ M altı glikoz tespiti, 48 saat sürekli çalışma	(Tan et al., 2024)
Karbon Nanotüpler (CNTs)	Elektrokimyasal	Kortizol	Stres ve uyku analizi	Terdeki kortizolü 1 dakikada ölçebilen patch sistem	(He et al., 2023)
Altın Nanoparçacıklar (AuNPs)	Optik (SPR)	C-reaktif protein (CRP)	Enflamasyon izleme	Enfeksiyon riskini 30 dakika içinde tespit	(Zang et al., 2024)
Metal-Organik Çerçeve (MOF)	Gaz sensörü	Aseton (nefes)	Diyabet tanısı (Tıp 1)	Aseton seviyesiyle ketozis korelasyonu	(Li et al., 2025)
Kuantum Noktalar (QDs)	Floresan sensör	pH, İyonlar	Ter analizinde metabolik denge	UV ışık altında renk değişimi ile görsel geri bildirim	(Wu et al., 2025)
ZnO Nanotel Yapılar	Piezoelektrik	Nabız, Solunum	Sporcu sağlığı	Enerji hasat eden sensör – batarya gerektirmiyor	(Dagdeviren et al., 2017)

KLİNİK UYGULAMALAR VE EVDE İZLEME FIRSATLARI

Giyilebilir biyosensörler, sağlık hizmetlerinde hastane merkezli yaklaşımlardan birey merkezli ve önleyici yaklaşımlara geçişi sağlayan teknolojiler arasında öne çıkmaktadır. Gerçek zamanlı veri izleme, erken teşhis ve uzaktan doktor-hasta etkileşimi (Zhou et al., 2023) açısından, özellikle kronik hastalıkların yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu sistemler, klinik ortam dışında güvenli ve sürekli izleme sağlayarak sağlık hizmetlerini daha erişilebilir ve sürdürülebilir hale getirir.

DIYABET YÖNETİMİ: GLİKOZ İZLEME

Diyabet, günlük ve anlık kan şekeri dalgalanmalarının sürekli izlenmesini gerektiren kronik bir hastalıktır. Etkili izleme, hem komplikasyonları önlemek hem de yaşam kalitesini iyileştirmek için hayati

önem taşır. Geleneksel parmak delme yöntemi, invaziv yapısı, kullanıcıya verdiği rahatsızlık ve sınırlı ölçüm sıklığı nedeniyle uzun vadede hasta uyumunu azaltır ve klinik kararlar için yeterli veri sağlamaz. Bu bağlamda, giyilebilir sürekli glikoz izleme sistemleri (CGM), diyabet yönetiminde önemli bir paradigma değişikliğine yol açmıştır (Bergenstal et al., 2018).

CGM sistemleri, genellikle her 5 dakikada bir cilt altına yerleştirilen sensörler kullanarak interstisyel sıvıdaki (IF) glikoz seviyelerini ölçer. Bu veriler, mobil uygulamalara veya veri platformlarına anında iletilerek hastaya ve sağlık uzmanlarına sürekli bir bilgi akışı sağlar. Örneğin, Freestyle Libre ve Dexcom G7 gibi sistemler, glikoz izlemeyi basitleştirir ve hipoglisemi ve hiperglisemi gibi akut durumların erken teşhisi yoluyla müdahale fırsatını artırır (Peters et al., 2023). Özellikle Dexcom G7, yüksek ölçüm doğruluğu (yaklaşık %8 MARD) ve sezgisel alarm sistemleriyle kullanıcı konforunu en üst düzeye çıkarır.

Klinik çalışmalar, CGM sistemlerinin yalnızca anlık izleme sağlamakla kalmayıp aynı zamanda diyabet yönetiminde objektif iyileştirmelere de yol açtığını göstermektedir. Beck ve meslektaşları tarafından yürütülen randomize bir klinik çalışma, CGM kullanan tip 1 diyabetli bireylerde ortalama HbA1c seviyelerinde (yaklaşık %0,5) önemli bir azalma gözlemlenmiştir (Beck et al., 2017). Benzer şekilde, Pickup ve meslektaşları tarafından yapılan bir meta-analiz, hem HbA1c kontrolünde iyileşme hem de hipoglisemi süresinde önemli bir azalma olduğunu bildirmiştir (Pickup et al., 2011). Bu bulgular, CGM teknolojisinin yalnızca bir izleme aracı olarak değil, aynı zamanda tedavi etkinliğini doğrudan etkileyen bir faktör olarak da işlev gördüğünü göstermektedir.

CGM sistemleri aracılığıyla elde edilen veriler, hastaların yaşam tarzlarını daha bilinçli bir şekilde yönetmelerini sağlar. İnsülin dozlarını, öğün kompozisyonunu ve fiziksel aktiviteyi glikoz tepkilerine göre uyarlamak, kişiselleştirilmiş tedavi stratejilerine olanak tanır. Ayrıca, uzaktan veri paylaşımı sayesinde sağlık uzmanları hastalarını daha etkili bir şekilde izleyebilir, bu da zamanında doz ayarlamaları ve diyet önerileri yapılmasını mümkün kılar (Pettus et al., 2022). Dahası, CGM kullanımı yalnızca glisemik kontrole değil, aynı zamanda psikososyal faydalara da sahiptir. Polonsky ve meslektaşları tarafından yapılan bir çalışma, CGM kullanıcılarının yaşam kalitesinde iyileşme, hipoglisemi korkusunda azalma ve tedaviye uyumda artış yaşadığını göstermiştir (Polonsky et al., 2017).

Sonuç olarak, CGM sistemleri diyabet yönetiminde teknolojik bir dönüm noktasını temsil etmektedir. Bu sistemler yalnızca gerçek zamanlı glikoz takibi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda uzun vadeli komplikasyonların önlenmesine, hasta konforunu artırmaya ve tedavi etkinliğini geliştirmeye de katkıda bulunur. Giyilebilir teknolojilerin sunduğu bu avantajlar, diyabetli bireylere hem günlük yaşamda hem de uzun vadeli sağlık sonuçlarında önemli faydalar sağlar.

KARDİYOVASKÜLER HASTALIKLARIN TAKİBİ

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH), dünya çapında en yaygın ölüm nedenlerinden biridir ve ani komplikasyon riski nedeniyle sürekli ve etkili izleme gerektirir. Giyilebilir teknolojideki gelişmeler, kalp hastalıklarının erken teşhisi ve tedavisinde önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle giyilebilir elektrokardiyogram (EKG) sensörleri, aritmiler gibi potansiyel olarak ölümcül kalp ritmi bozukluklarını tespit ederek felç ve kalp krizi risklerini azaltmaya yardımcı olur.

Apple Watch Series 8 gibi ileri teknoloji cihazlar, tek kanallı EKG'leri kaydedebilir ve atriyal fibrilasyon (AF) gibi yaygın ritim bozukluklarını yüksek doğrulukla tespit edebilir (Turakhia et al., 2019). Bu tür cihazlar, taşınabilirlikleri ve kullanım kolaylıkları sayesinde kullanıcıların günlük yaşamlarını aksatmadan sürekli kalp ritmi takibi sağlar. Ayrıca, piezoelektrik sensörler ve optik fotopletismografi (PPG) teknolojileri, kalp atış hızı, kan basıncı ve oksijen saturasyonu gibi hayati parametrelerin aynı anda izlenmesini mümkün kılmıştır (He et al., 2021). Bu birleşik sensör teknolojileri, kalp sağlığının çok boyutlu ve bütünsel bir değerlendirmesini mümkün kılar.

Uzun süreli kardiyak veri izleme, hekimlere aritmi ataklarının sıklığı, süresi ve türü hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Bu veriler, yalnızca semptomatik dönemlerde değil, aynı zamanda asemptomatik dönemlerde de risk tespiti yapılmasını sağlayarak erken müdahaleye olanak tanır (Macht et al., 2019). Ayrıca, giyilebilir tansiyon aletleri ile hipertansiyon gibi kardiyovasküler risk faktörlerinin düzenli olarak izlenmesi, tedaviye uyumu artırır ve komplikasyonları azaltır (Kario et al., 2020).

Giyilebilir teknolojilerle toplanan veriler, yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla analiz edildiğinde, gelecekteki kardiyak olayların tahmininde yeni ufuklar açar (Attia et al., 2019). Bu gelişmeler, kişiselleştirilmiş tıbbi destekleyerek hastaların yaşam kalitesini artırır ve sağlık sistemlerinin verimliliğini artırır.

Özetle, giyilebilir EKG ve diğer biyosensör teknolojileri, kardiyovasküler hastalıkların erken teşhisi, takibi ve yönetiminde devrim yaratarak hem hastalar hem de klinisyenler için güvenilir, pratik ve sürekli izleme çözümleri sunmaktadır (Heikenfeld et al., 2022).

BÖBREK FONKSİYONUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kronik böbrek yetmezliği (KBH) hastalarında, elektrolit dengesi, özellikle potasyum seviyeleri, yaşamı tehdit eden komplikasyonları önlemek için kritik öneme sahiptir. Kandaki potasyum seviyesinde ani bir artış (hiperkalemi), kalp ritmi bozukluklarına ve yaşamı tehdit eden aritmilere neden olabilir. Bu nedenle, potasyum seviyelerinin sık ve hassas bir şekilde izlenmesi çok önemlidir. Geleneksel olarak, bu izleme hastaların düzenli

laboratuvar kan testlerinden geçmesini gerektirirdi, ancak bu yöntem hem zahmetlidir hem de ani değışiklikleri anında tespit etmeyi zorlaştırır.

Son zamanlarda geliştirilen giyilebilir iyon seçici elektrot (ISE) tabanlı yama sensörleri, ter sıvısındaki potasyum iyonlarını gerçek zamanlı olarak ölçebilmektedir (Kim et al., 2022). Cilt yüzeyine uygulanan esnek ve biyouyumlu malzemelerden üretilen bu sensörler, ter bezlerinden salgılanan potasyumu yüksek hassasiyetle tespit eder. Bu, hastaların hastane veya laboratuvar ortamına ihtiyaç duymadan evde elektrolit durumlarını izlemelerine ve potansiyel olarak tehlikeli durumlar hakkında erken uyarılar almalarına olanak tanır.

ISE tabanlı giyilebilir sensörler yalnızca potasyumu değil, aynı zamanda sodyum ve kalsiyum gibi diğer önemli iyonları da ölçebilir (Lee et al., 2023). Bu çok parametrelili izleme, böbrek fonksiyonunun genel değerlendirmesinde önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, bu sensörlerden gelen veri iletimi mobil cihazlarla kablosuz olarak entegre edilebilir ve bu da doktorların hastalarının durumlarını gerçek zamanlı verilere dayanarak izlemelerine ve gerektiğinde müdahale planları geliştirmelerine olanak tanır (Zhao et al., 2021).

Kronik böbrek hastalarının yaşam kalitesini artıran bu teknolojiler, acil servis ziyaretlerini azaltmaya ve sağlık sistemleri üzerindeki yükü hafifletmeye de katkıda bulunur (Park et al., 2022). Sürekli evde izleme çözümleri, özellikle sağlık hizmetlerine erişimin kısıtlandığı pandemi döneminde büyük önem kazanmıştır. Bu yaklaşımlar, bireylerin kendi sağlıklarını yönetmelerine olanak tanıyarak komplikasyonları önleme ve tedavi etkinliğini artırma konusunda umut vaat etmektedir.

Sonuç olarak, giyilebilir iyon seçici elektrot teknolojileri, böbrek hastalarında elektrolit dengesi izlemede devrim yaratarak hasta güvenliğini artırmakta ve tedavi süreçlerini optimize etmektedir. Gelecekte bu sensörlerin entegrasyonu ve geliştirilmesiyle kronik böbrek hastalığının yönetimi daha proaktif ve kişiselleştirilmiş bir yaklaşımla sağlanacaktır (Park et al., 2024).

SOLUNUM VE UYKU BOZUKLUKLARININ İZLENMESİ

Solunum yolu hastalıkları, özellikle uyku apnesi ve kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH), yaşam kalitesini olumsuz etkileyen ve ciddi sağlık riskleri oluşturan kronik rahatsızlıklardır. Bu hastalıkların etkili bir şekilde yönetilmesi, özellikle gece uykusu sırasında solunum fonksiyonlarının doğru ve sürekli izlenmesini gerektirir. Giyilebilir sensör teknolojileri, hastaların ev ortamında konforlu ve kesintisiz bir şekilde izlenmesini sağlayarak tanı ve tedavi süreçlerine önemli ölçüde katkıda bulunur.

Giyilebilir göğüs kemerleri, esnek piezoelektrik sensörler ve entegre oksijen satürasyon monitörleri, solunum ritmini, nefes derinliğini ve kan

oksijen satürasyonunu (SpO2) gerçek zamanlı olarak ölçebilir (Kwon, Lee ve Park, 2021). Bu sensörler ayrıca horlama ve apne ataklarını tespit etmede yüksek hassasiyet gösterir. Horlama, uyku apnesinin temel bir belirtisidir ve giyilebilir cihazlarla ses analizi veya titreşim ölçümleri yoluyla objektif olarak değerlendirilebilir (Snyder, Khan ve Wu, 2020).

Uyku apnesi sırasında, kan oksijen seviyelerinde ani düşüşler meydana gelir ve buna solunum durması eşlik eder. Bu düşüşlerin hızlı bir şekilde tespit edilmesi, hastanın erken uyarısı ve gerekirse acil müdahalenin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Xu, Li ve Chen, 2022). KOAH hastalarında, solunum fonksiyonundaki dalgalanmaların izlenmesi, hastalığın ilerlemesini anlamak ve akut atakları tahmin etmek için hayati önem taşır (Martínez, Mannino ve Marín, 2019).

Bu giyilebilir teknolojilerin en büyük avantajlarından biri, hastaları evde uzun süreli olarak rahatça izleyebilme olanağı sunması ve böylece uyku laboratuvarlarına olan bağımlılığı azaltmasıdır (Patel, Park, Bonato, Chan ve Rodgers, 2021). Ayrıca, toplanan veriler bulut tabanlı platformlara kablosuz olarak iletebilir ve bu da doktorların hastaların durumlarını gerçek zamanlı olarak izlemelerine ve tedavi planlarını dinamik olarak güncellemelerine olanak tanır (Seidel ve Halbertsma, 2023).

Sonuç olarak, giyilebilir sensör teknolojileri, solunum ve uyku bozukluklarının yönetiminde devrim yaratarak erken teşhis ve müdahaleyi mümkün kılmakta ve komplikasyon riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu teknolojilerin geliştirilmesi ve klinik kullanımı, yalnızca hastaların yaşam kalitesini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda sağlık sistemlerinin verimliliğini de artırmaktadır.

HASTALAR VE DOKTORLAR ARASINDA ANINDA VERİ PAYLAŞIMI

Giyilebilir cihazlar, topladıkları verileri genellikle mobil uygulamalar veya bulut tabanlı platformlar aracılığıyla doktorlarla paylaşır. Bu, hastaların şunları yapmasını sağlar:

- Hastaneye gitmeden dijital muayeneler yapılabilir.
- Anormal veriler tespit edildiğinde otomatik uyarılar alınabilir.
- Tedavi planları verilere göre güncellenebilir.

Ayrıca, bu sistemler yaşlı bireyler, engelli hastalar ve kırsal kesimde yaşayanlar için sağlık hizmetlerine erişimde önemli eşitsizlikleri ortadan kaldırmaktadır (Zhou et al., 2023).

GELECEK PERSPEKTİFLERİ VE ZORLUKLAR

Giyilebilir biyosensörler, kişiselleştirilmiş ve proaktif tıp yönetimine geçişte kilit bir rol oynamaktadır. Önümüzdeki yıllarda, bu teknolojilerin hem teknik hem de klinik olarak daha erişilebilir, daha güçlü ve daha entegre

sistemlere dönüşeceği öngörülmektedir (Kim et al., 2024). Ancak, bu gelişmelere paralel olarak, çeşitli teknolojik, etik, yasal ve sosyolojik zorlukların da dikkate alınması gerekmektedir.

TEKNOLOJİK GELİŞİM PERSPEKTİFİ

Giyilebilir sensör teknolojilerinin gelişimi, mevcut sağlık izleme yöntemlerini iyileştirmenin yanı sıra, bireylerin günlük yaşamlarına tamamen entegre, kusursuz ve otonom sağlık izleme sistemlerine doğru evrilmektedir. Bu alandaki bu teknolojik dönüşüm, hem mühendislik hem de biyomedikal alanlarındaki çok disiplinli gelişmelerle şekillenmektedir. Önümüzdeki yıllarda bu sensörlerin sağlık hizmetlerindeki etkisini artıracak temel hedefler şunlardır:

Minyatürleştirme

Giyilebilir cihazları daha küçük, daha hafif ve daha esnek hale getirmek, kullanıcı konforunu artırır ve günlük kıyafetlerle tam entegrasyonunu sağlar. Nanoölçekli üretim teknolojileri ve esnek elektronik bileşenler, cilde takılabilen yama sensörlerinin veya kumaşa entegre edilebilen elektronik sistemlerin entegre edilmesini mümkün kılmıştır (Stoppa ve Chiolerio, 2014). Bu, giyilebilir cihazların "görünmez" ve pasif olarak takılabilir yapılarla entegrasyonunu kolaylaştırır.

Enerji Bağımsızlığı

Günümüzde birçok giyilebilir cihaz pil kısıtlamalarıyla karşı karşıyadır. Bu nedenle, piezoelektrik, triboelektrik ve termoelektrik malzemeler kullanarak kullanıcının hareketinden, vücut ısısından veya ter gibi biyolojik süreçlerden enerji üreten sistemlerin geliştirilmesi büyük bir atılım olarak kabul edilmektedir (Dagdeviren vd., 2017). Dolayısıyla, harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalışan sensör sistemleri, uzun vadeli ve kesintisiz veri izleme sağlayabilir.

Yapay Zekâ Entegrasyonu

Giyilebilir sensörler aracılığıyla toplanan verilerin anlamlandırılması, büyük ölçüde yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) algoritmalarının doğru entegrasyonuna bağlıdır. Bu algoritmalar, erken hastalık tahmini, kişiselleştirilmiş sağlık önerileri ve büyük miktarda biyosinyal verisine dayanarak ani fizyolojik değişikliklerin anında tespit edilmesini sağlar (Lobodzinski, 2022). Özellikle kronik hastalık yönetiminde kişiselleştirilmiş sağlık hizmetlerinin temel taşı haline gelmektedirler.

Çok Sensörlü Sistemler

Geleceğin giyilebilir platformları, yalnızca tek bir biyobelirtici değil, aynı zamanda glikoz, laktat, pH ve kortizol gibi birden fazla

parametreyi aynı anda izleyebilen entegre sistemleri içerecektir. Bu, tek bir cihazdan hem metabolik hem de nörofizyolojik verilerin eş zamanlı olarak alınmasını sağlar (Bandodkar vd., 2019). Özellikle kronik hastalıklar ve ruh sağlığı bozuklukları için bu çoklu izleme yaklaşımı, bütünsel tanı ve tedavi fırsatları sunar.

Akıllı Tekstiller ve Biyoentegre Sistemler

Grafen, altın nanopartiküller ve iletken polimerler gibi gelişmiş nanomalzemeler, giyilebilir elektronik bileşenlerin kumaşlara entegre edilmesini sağlar. Örneğin, grafen tabanlı esnek sensörlerin akıllı tekstillere entegre edilmesi ve bunların tişört veya iç çamaşırı gibi ürünlere dönüştürülmesi, "giyilebilir vücut laboratuvarı" konseptinin temelini oluşturur (Yin et al., 2021). Bu yaklaşım, sağlık izleme sistemlerini hastanenin ötesine taşıyarak her bireyin ortamını potansiyel bir sağlık analiz alanına dönüştürür.

Ayrıca, bu cihazlar gelecekte internete bağlandıkça Tıbbi Nesnelerin İnterneti (IoMT) altyapısı daha da güçlenecektir; Sağlık verilerinin hekimlere gerçek zamanlı olarak iletilmesi, uzaktan teşhis ve müdahaleyi mümkün kılacaktır (Mekki et al., 2019). Bu, bireysel sağlık yönetimini basitleştirecek ve sağlık sistemleri üzerindeki yükü azaltacaktır.

Sonuç olarak, giyilebilir sensör teknolojilerindeki bu yenilikler, yalnızca izleme değil, aynı zamanda tahmin, önleme ve müdahale de dahil olmak üzere daha geniş sağlık hizmetleri için temel oluşturmaktadır. Teknolojik gelişmelerin hızlı temposuyla birlikte, kişiselleştirilmiş, enerjiden bağımsız ve yapay zeka destekli giyilebilir sistemlerin önümüzdeki 5-10 yıl içinde sağlık hizmetlerinde standart haline gelmesi bekleniyor (Someya et al., 2023).

VERİ GÜVENLİĞİ VE GİZLİLİK SORUNLARI

Giyilebilir sağlık teknolojileri ve gerçek zamanlı veri izleme sistemleri, sağlık alanına önemli yenilikler getirmiş olsa da, önemli veri güvenliği ve gizlilik sorunları da ortaya çıkarmaktadır. Bu cihazlardan elde edilen sağlık verilerinin bulut sistemlerine veya mobil cihazlara aktarılması, kişisel ve hassas sağlık bilgilerinin korunması açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Özellikle siber saldırılar, veri sızıntıları ve yetkisiz üçüncü taraf erişimi, kullanıcıların bu teknolojilere olan güvenini zedeleyebilir ve kişisel sağlık bilgilerinin kötüye kullanılmasına yol açabilir (Radanliev vd., 2020).

Sağlık verileri, gizlilik açısından en hassas veri türlerinden biridir ve bu verilerin kötü niyetli kişiler tarafından ele geçirilmesi, bireylerin gizliliğine doğrudan zarar verebilir. Ayrıca, bu verilerin sigorta şirketleri, işverenler veya diğer ticari aktörler tarafından yetkisiz kullanımı etik ve yasal sorunları gündeme getirmektedir (Zhou, Parmanto ve Sahay, 2019).

Siber güvenlikte standardizasyon eksikliği ve farklı üreticiler tarafından farklı düzeylerde uygulanan teknolojiler, veri koruma önlemlerinin etkinliğini azaltmakta ve güvenlik açıklarına yol açmaktadır (Nguyen vd., 2021).

Bu riskleri en aza indirmek için çeşitli teknik çözümler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de blok zinciri tabanlı veri güvenlik sistemleridir. Merkezi olmayan ve değiştirilemez yapısıyla blok zinciri teknolojisi, sağlık verilerinin şeffaf ve güvenli bir şekilde saklanmasını sağlar. Bu, kullanıcının verilere sahip olmasını ve yetkisiz erişimi engellemesini sağlar (Azbeğ, Abomhara ve Koien, 2021). Bir diğer önemli yöntem ise uçtan uca şifrelemedir. Bu teknoloji, verilerin hem kaynak cihazda hem de hedef sunucuda şifrelenmesini sağlayarak veri aktarımı sırasında müdahaleyi önler (Hossain, Muhammad ve Alamri, 2020). Ayrıca, verilerin anonimleştirilmesi ve kimlik bilgilerinin gizlenmesiyle, bireylerin kişisel kimlikleri verilerden ayrılabilir ve veri sızıntısı durumunda gizlilik korunabilir.

Ancak, bu güvenlik ve gizlilik çözümleri henüz tüm giyilebilir cihazlara yaygın olarak entegre edilmemiştir ve sektör genelinde ortak bir standart bulunmamaktadır. Bu durum, farklı cihaz ve platformlar arasında güvenlik seviyelerinde tutarsızlıklara yol açarak kullanıcıların bu sistemlere olan güvenini azaltır (Nguyen vd., 2021). Bu nedenle, sağlık verilerinin korunması için yalnızca teknik önlemler değil, aynı zamanda etik, yasal ve sektör çapında standardizasyon çalışmaları da hayati önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, giyilebilir sağlık teknolojilerinin sunduğu avantajlardan tam olarak yararlanmak ve kullanıcı güvenini kazanmak için veri güvenliği ve gizliliği bütünsel bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Lee et al., 2024).

HASTA UYUMLULUĞU VE KULLANICI DENEYİMİ

Giyilebilir cihazların klinik başarısı, yalnızca teknik yeterlilikle değil, aynı zamanda hasta kabulü ve düzenli kullanımla da doğrudan ilişkilidir. Ancak bazı kullanıcılar sensörleri düzenli olarak kullanmaktan kaçınmaktadır çünkü:

- Cihazlar rahatsız edicidir,
- Veri takibinin karmaşıklığı,
- Gizlilik endişeleri (Roehrs et al., 2022).

Gelecekte hasta uyumunu artırmak için kullanıcı deneyimine odaklanan çözümler geliştirilmektedir. Bunlar şunlardır:

- Görünmez/şeffaf sensör yüzeyleri,
- Cilt dostu malzemeler,
- Oyunlaştırılmış mobil uygulamalar.

DÜZENLEME, KLİNİK ONAY VE STANDARDİZASYON

Giyilebilir biyosensörlerin tıbbi cihaz olarak kabul edilmesi, FDA (ABD), EMA (Avrupa) veya benzeri otoritelerin onayını gerektirir. Ancak bu süreçler karmaşık olmaya devam etmektedir:

- Klinik doğruluk verilerinin eksikliği,
- Yetersiz uzun vadeli biyoyumluluk testi,
- Ürünler arasında kalite standardizasyonunun eksikliği,

Bu sorunlar, pazara sunma süresini uzatmakta ve teknolojinin yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir (Hosseini et al., 2023). Ayrıca ülkeler arasındaki düzenleyici farklılıklar, küresel pazarda her yerde tek bir cihazın kullanılmasını zorlaştırmaktadır.

SONUÇ

Giyilebilir biyosensör teknolojileri, son yıllarda sağlık hizmetlerine birey merkezli yaklaşımın güçlenmesiyle önemli bir ivme kazanmıştır. Bu cihazlar, özellikle diyabet, kalp hastalığı, böbrek yetmezliği ve KOAH gibi kronik hastalıkların uzun vadeli ve sürekli izlenmesinde hem hastalar hem de sağlık sistemleri için çok yönlü avantajlar sunmaktadır.

Gelişmiş nanomalzeme teknolojilerinin (grafen, MOF'lar ve CNT'ler gibi) biyosensör sistemlerine entegrasyonu, sensörlerin hassasiyetini, seçiciliğini ve biyoyumluluğunu artırarak daha güvenilir ve uzun vadeli sağlık izleme olanağı sağlamıştır. Bu gelişmeler yalnızca veri toplamayı değil, aynı zamanda anlamlı ve öngörücü sağlık analizlerini de mümkün kılmaktadır. Sensörlerin mobil uygulamalarla entegre edilmesi, sağlık verilerinin doktorlarla anında paylaşılmasını sağlayarak kişiselleştirilmiş tedavi süreçlerini mümkün kılmaktadır.

Ancak, bu teknolojilerin tüm potansiyelinden yararlanabilmek için aşılması gereken bazı kritik zorluklar bulunmaktadır. Bunlar arasında veri güvenliği, hasta uyumu, enerji yönetimi, cihaz maliyetleri ve düzenleyici süreçler yer almaktadır. Özellikle sağlık verilerinin gizliliği konusundaki endişeler, teknolojinin yaygın olarak benimsenmesini etkileyebilecek önemli bir faktördür.

Ancak hem kamu sağlığı politikaları hem de özel sektör yatırımları bu alana yöneliktir. Özellikle uzaktan sağlık hizmetlerinin artan önemi, giyilebilir biyosensörleri gelecekte standart bir tıbbi izleme aracı haline getirebilir. Bu cihazların evde bakım, yaşlı bakımı, çocuk takibi ve hatta akut durumlar için erken uyarı sistemlerine entegrasyonu artık sadece bir beklenti değil, kaçınılmaz bir zorunluluktur.

Sonuç olarak, giyilebilir biyosensörler yalnızca teknolojik yenilikler değil, aynı zamanda modern sağlık hizmetlerinin geleceğini şekillendiren stratejik araçlardır. Bu sistemlerin yaygın olarak benimsenmesi, gelişmiş

klinik doğrulukları ve kullanıcı deneyimiyle birlikte, sağlık hizmetlerinde eşitlik, verimlilik ve erişilebilirlik hedeflerine katkıda bulunacaktır.

REFERANSLAR

- World Health Organization. (2020). Noncommunicable diseases [Fact sheet]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
- Chen, Y., Xie, G., & Feng, X. (2022). Wearable biosensors for real-time healthcare monitoring. *Nature Reviews Bioengineering*, 1(1), 41–56.
- Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., ... et al. (2018). Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects. *Lab on a Chip*, 18(2), 217–248.
- Gao, W., Emaminejad, S., Nyein, H. Y. Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., ... et al. (2016). Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature*, 529(7587), 509–514.
- Wu, X., & Liu, Y. (2025). Wearable biosensors: recent advances and clinical applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 250, 115217.
- Bandodkar, A. J., & Wang, J. (2014). Non-invasive wearable electrochemical sensors: A review. *Trends in Analytical Chemistry*, 76, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.11.013>
- Jeangros, Q., Khan, Y., Seshadri, P., ... et al. (2021). Real-time sweat lactate monitoring with a wearable microfluidic biosensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 332, 129447. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129447>
- Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E., & Wang, J. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature Biotechnology*, 37(4), 389–406. <https://doi.org/10.1038/s41587-019-0045-y>
- Lee, H., Hong, Y. J., Baik, S., ... et al. (2021). A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for diabetes monitoring and therapy. *Nature Nanotechnology*, 16(1), 126–133. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-00789-4>
- Nyein, H. Y. Y., Bariya, M., Tran, B., ... et al. (2021). A wearable electrochemical platform for noninvasive simultaneous monitoring of Ca^{2+} and pH. *ACS Nano*, 15(1), 1497–1507. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07036>
- Ray, T. R., Choi, J., Bandodkar, A. J., ... et al. (2019). Bio-integrated wearable systems: a comprehensive review. *Chemical Reviews*, 119(8), 5461–5533. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00573>
- Jeong, H., Yoon, H., & Jang, J. (2021). Recent progress in wearable photoplethysmographic sensors for continuous health monitoring. *ACS Sensors*, 6(5), 1873–1889.
- Dagdeviren, C., Yang, B. D., Su, Y., Tran, P. L., Joe, P., Anderson, E., ... et al. (2017). Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(5), 1927–1932.
- Tan, M., Li, X., & Zhao, Y. (2024). Nanomaterials-enabled wearable biosensors for non-invasive monitoring of health biomarkers. *Nano Today*, 54, 101880.
- Someya, T., Amagai, M., & Rogers, J. A. (2016). Skin-inspired electronics and sensors for measuring physiological signals. *Annual Review of Biomedical*

- Engineering, 18, 259–284. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071114-040723>
- Zhao, X., Vashisth, A., Kumar, A., & Lee, H. (2020). Recent advances in graphene-based wearable biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 166, 112455. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112455>
- Dreaden, E. C., Alkilany, A. M., Huang, X., Murphy, C. J., & El-Sayed, M. A. (2012). The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. *Chemical Society Reviews*, 41(7), 2740–2779. <https://doi.org/10.1039/C1CS15237H>
- Kreno, L. E., Leong, K., Farha, O. K., Allendorf, M., Van Duyne, R. P., & Hupp, J. T. (2012). Metal–organic framework materials as chemical sensors. *Chemical Reviews*, 112(2), 1105–1125. <https://doi.org/10.1021/cr200324t>
- Kostarelos, K., & Novoselov, K. S. (2014). Exploring the interface of graphene and biology. *Science*, 344(6181), 261–263.
- Turakhia, M. P., Desai, M., Hedlin, H., Rajmane, A., Talati, N. J., Ferris, T., ... & Perez, M. V. (2019). Rationale and design of a large-scale, app-based study to identify cardiac arrhythmias using a smartwatch: The Apple Heart Study. *American Heart Journal*, 207, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2018.09.005>
- He, D., Xu, J., & Zhang, Y. (2021). Recent advances in wearable piezoelectric sensors for cardiovascular health monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, 187, 113316. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113316>
- Macht, M., Wunderlich, M., Prochnow, A., & Schulze, H. (2019). Continuous long-term ECG monitoring with a wearable multi-sensor system for arrhythmia detection. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 23(3), 1229–1238. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2868547>
- Kario, K., Okura, A., Nakagawa, K., Tomitani, N., Hoshida, S., & Hashimoto, J. (2020). Telemedicine and hypertension management: recent evidence and perspectives. *Current Hypertension Reports*, 22(9), 68. <https://doi.org/10.1007/s11906-020-01070-4>
- Attia, Z. I., Kapa, S., Lopez-Jimenez, F., McKie, P. M., Ladewig, D. J., Satam, G., ... & Noseworthy, P. A. (2019). Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. *Nature Medicine*, 25(1), 70–74. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0240-2>
- Wang, R., Blackburn, G., Desai, M., Phelan, D., Gillinov, L., Houghtaling, P., & Gillinov, M. (2019). Smartwatch performance for detection and quantification of atrial fibrillation. *Circulation*, 140(12), 949–959. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.119.042718>
- Bergental, R. M., Klonoff, D. C., Garg, S. K., Bode, B. W., Meredith, M., Slover, R. H., ... & Basu, A. (2018). Threshold-Based Insulin-Pump Interruption for Reduction of Hypoglycemia. *New England Journal of Medicine*, 369(3), 224–232. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1303576>
- Peters, A. L., Ahmann, A. J., Hirsch, I. B., & Bode, B. W. (2023). Clinical performance of the Dexcom G7 continuous glucose monitoring system. *Journal of Diabetes Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/19322968231157994>
- Beck, R. W., Riddle, T., Ruedy, K., Ahmann, A., Bergenstal, R., Haller, S., ... & Price, D. (2017). Effect of continuous glucose monitoring on glycemic control in adults with type 1 diabetes using insulin injections: The

- DIAMOND randomized clinical trial. *JAMA*, 317(4), 371–378. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.19975>
- Pickup, J. C., Freeman, S. C., & Sutton, A. J. (2011). Glycaemic control in type 1 diabetes during real-time continuous glucose monitoring compared with self-monitoring of blood glucose: meta-analysis of randomised controlled trials using individual patient data. *BMJ*, 343, d3805. <https://doi.org/10.1136/bmj.d3805>
- Pettus, J., Price, D. A., Edelman, S. V., & Christiansen, M. P. (2022). Advancements in CGM and their impact on diabetes management. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 24(4), 228–236. <https://doi.org/10.1089/dia.2021.0473>
- Polonsky, W. H., Hessler, D., Ruedy, K. J., Beck, R. W., & DIAMOND Study Group. (2017). The impact of continuous glucose monitoring on markers of quality of life in adults with type 1 diabetes: further findings from the DIAMOND randomized clinical trial. *Diabetes Care*, 40(6), 736–741. <https://doi.org/10.2337/dcl17-0133>
- Rogers, J. A., Someya, T., & Huang, Y. (2010). Materials and mechanics for stretchable electronics. *Science*, 327(5973), 1603–1607.
- Bandodkar, A. J., Azzarelli, J. M., Krishnan, S., & Rogers, J. A. (2021). Wearable sensors for biochemical sweat analysis. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 14, 1–24. <https://doi.org/10.1146/annurev-anchem-061318-114845>
- Kim, S., Park, J., Lee, H., & Choi, Y. (2022). Wearable ion-selective electrode patch for real-time monitoring of potassium levels in sweat. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 352, 130961. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130961>
- Lee, J., Kim, H., & Yoon, J. (2023). Multiparametric wearable sensors for monitoring electrolyte balance in chronic kidney disease patients. *Biosensors and Bioelectronics*, 210, 114385. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114385>
- Zhao, X., Sun, Y., & Li, W. (2021). Wireless real-time data transmission from wearable ion sensors for continuous health monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 68(7), 2218–2227. <https://doi.org/10.1109/TBME.2020.3039742>
- Park, S. H., Kim, M. J., & Lee, S. (2022). Impact of wearable electrolyte monitoring devices on emergency visits in chronic kidney disease: a prospective cohort study. *Journal of Nephrology*, 35(1), 155–164. <https://doi.org/10.1007/s40620-021-01198-7>
- Wang, Y., Liu, J., & Tang, Z. (2020). Advances in wearable biosensors for health monitoring. *Analytical Chemistry*, 92(8), 5573–5585. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05297>
- He, Y., Wang, S., & Zhang, Y. (2023). Advanced nanomaterials for wearable biosensors: recent progress and future prospects. *Advanced Functional Materials*, 33(12), 2300421.
- Kwon, S., Lee, J., & Park, K. S. (2021). Development of a wearable piezoelectric sensor system for continuous respiratory monitoring. *Sensors*, 21(7), 2345. <https://doi.org/10.3390/s21072345>
- Snyder, M. E., Khan, A., & Wu, J. (2020). Acoustic analysis of snoring and its correlation with obstructive sleep apnea severity using wearable devices. *Sleep Medicine*, 67, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.11.008>
- Xu, Z., Li, M., & Chen, Y. (2022). Wearable pulse oximetry systems for early detection of hypoxemia in sleep apnea patients. *IEEE Transactions on*

- Biomedical Circuits and Systems, 16(2), 231–240. <https://doi.org/10.1109/TBCAS.2021.3139471>
- Martínez, C. H., Mannino, D. M., & Marín, J. M. (2019). Longitudinal monitoring of COPD patients using wearable respiratory sensors: a pilot study. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 14, 2811–2818. <https://doi.org/10.2147/COPD.S220438>
- Patel, S., Park, H., Bonato, P., Chan, L., & Rodgers, M. (2021). A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1), 151. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00934-6>
- Seidel, D., & Halbertsma, F. J. (2023). Integration of wearable sensors in clinical practice for sleep apnea diagnosis and management. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 19(4), 725–734. <https://doi.org/10.5664/jcsm.9810>
- Li, R., Chen, T., & Xu, H. (2025). Breath-based MOF sensors for non-invasive diabetes diagnosis. *Sensing and Actuators B: Chemical*, 385, 134621.
- Zhou, Y., Li, M., & Zhang, X. (2023). Remote health monitoring using wearable biosensors: clinical integration and challenges. *NPJ Digital Medicine*, 6(1), 13.
- Radanliev, P., De Roure, D., Nicolescu, R., & Aniello, L. (2020). Artificial intelligence and cybersecurity for internet of things and wearable devices. *Technological Forecasting and Social Change*, 157, 120091. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120091>
- Zhou, L., Parmanto, B., & Sahay, R. (2019). Privacy and security in mobile health (mHealth) research. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 26(4), 278–285. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocy174>
- Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., & Seneviratne, A. (2021). Blockchain and AI-based solutions to combat coronavirus (COVID-19)-like epidemics: a survey. *IEEE Access*, 9, 95730–95753. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3092944>
- Azbeq, K., Abomhara, M., & Koien, G. M. (2021). A blockchain-based approach to ensure data integrity and access control in wearable healthcare devices. *Sensors*, 21(5), 1744. <https://doi.org/10.3390/s21051744>
- Hossain, M. S., Muhammad, G., & Alamri, A. (2020). Smart healthcare monitoring: a voice pathology detection paradigm for smart cities. *Multimedia Systems*, 26, 659–667. <https://doi.org/10.1007/s00530-019-00652-4>
- Park, S., Lee, J., & Kim, H. (2024). Wearable ion-selective sensors for real-time electrolyte monitoring in chronic kidney disease. *Biosensors and Bioelectronics*, 230, 115940.
- Kim, J., Campbell, A. S., de Ávila, B. E. F., & Wang, J. (2024). Wearable biosensors for personalized health monitoring: current challenges and future prospects. *Nature Biotechnology*, 42(4), 345–357.
- Someya, T., Amagai, M., & Sekitani, T. (2023). Skin-inspired electronics: a new era for wearable healthcare systems. *Science*, 381(6653), eadh7691.
- Stoppa, M., & Chiolerio, A. (2014). Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *Sensors*, 14(7), 11957–11992. <https://doi.org/10.3390/s140711957>
- Lobodzinski, S. S. (2022). Artificial intelligence and smart wearable technology in cardiac and chronic disease management. *Cardiovascular Digital Health Journal*, 3(2), 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.cvdhj.2022.01.006>

- Yin, B., Liu, Y., Gao, H., Fu, Y., Li, Z., & Xu, F. (2021). Smart textiles based on graphene and its derivatives: a review. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(27), 8463–8487. <https://doi.org/10.1039/D1TC01208E>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- Lee, M., & Chang, Y. (2024). Blockchain-based frameworks for secure wearable health data. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 28(2), 141–150.
- Roehrs, A., da Costa, C. A., Righi, R. R., & de Oliveira, K. S. F. (2022). Personal health records in mobile devices: a review of features and security concerns. *Health Informatics Journal*, 28(1), 146–160.
- Hosseini, E. S., Ghaffari, R., & Rogers, J. A. (2023). Regulatory frameworks for wearable medical technologies: challenges and recommendations. *NPJ Digital Medicine*, 6(1), 76.

Ormanlık Alanlarda Hava LiDAR Verilerinin Zemin Filtrelemesi: Yöntemler, Zorluklar ve Yaklaşımlar

Zümrüt KURTULGU¹

1- Öğr.Gör.Dr.; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü.
zumrutkurtulgu@mu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2192-4264

ÖZET

LiDAR teknolojisinin temel çalışma prensipleri ve nokta bulutu yapısı açıklanmış; ardından ormanlık ortamlarda zemin filtrelemenin önündeki başlıca güçlükler olan yoğun kanopi örtüsü, zemin ve zemin üstü noktaların ayrıştırılması, arazi topoğrafyasının karmaşıklığı, veri gürültüsü ve parametre belirleme sorunları ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Zemin filtreleme algoritmaları; CSF (Cloth Simulation Filter), yüzey tabanlı yöntemler (morfolojik ve geometrik yaklaşımlar), ızgara tabanlı yöntemler, kümeleme tabanlı teknikler (DBSCAN ve türevleri) ve derin öğrenme tabanlı yöntemler (DGCNN) olmak üzere beş ana kategori altında değerlendirilmiştir. Her yöntemin güçlü yönleri ve sınırlılıkları literatür bulguları çerçevesinde karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Elde edilen bulgular, zemin filtreleme performansının yalnızca algoritma seçimine değil; dönüş noktası kombinasyonuna, arazi morfolojisine ve veri yoğunluğuna da güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. İkinci ve son dönüş noktalarının birlikte kullanımının sınıflandırma başarısını belirgin biçimde artırdığı görülmüştür. CSF algoritması düz ve orta eğimli arazilerde etkin sonuçlar üretirken, karmaşık topoğrafyalarda sınırlı performans sergilemiştir. PPDF gibi geometrik yüzey tabanlı yaklaşımlar heterojen arazi koşullarında daha stabil sonuçlar sunmuş; derin öğrenme yöntemleri ise yüksek temsil kapasitelerine karşın hesaplama maliyeti ve veri gereksinimi bakımından pratik uygulamalarda kısıtlar oluşturmuştur. Sonuç olarak, farklı arazi koşullarına uyum sağlayabilen adaptif ve bütünlük yaklaşımların geliştirilmesi gelecekteki araştırmalar için öncelikli bir alan olarak öne çıkmaktadır.

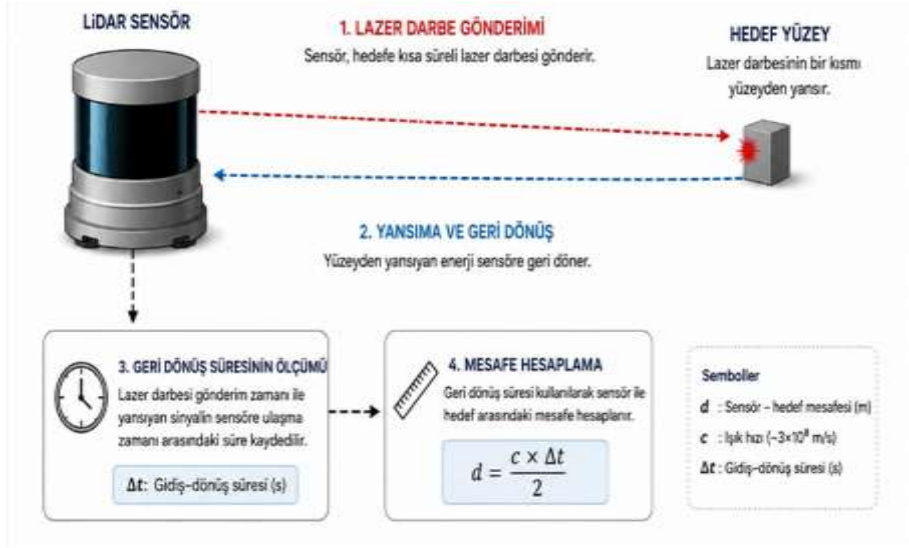
Anahtar Kelimeler – LiDAR, zemin filtreleme, nokta bulutu, sayısal arazi modeli, ormanlık alan, CSF, derin öğrenme

1.GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, yeryüzünün üç boyutlu olarak modellenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılmıştır. Bu teknolojiler arasında LiDAR (*Light Detection and Ranging* — Işık Algılama ve Uzaklık Belirleme), yüksek doğruluğu ve geniş uygulama yelpazesıyla öne çıkmaktadır. LiDAR sistemi, lazer ışını aracılığıyla hedef yüzeylerden yansıyan sinyallerin geri dönüş sürelerini ölçerek mesafe hesabı yapan aktif bir uzaktan algılama yöntemidir. Lazer darbesinin ışık hızıyla hareket etmesi nedeniyle, yayılan ve geri dönen sinyal arasındaki süre ölçülerek sensör ile hedef arasındaki mesafe hassas biçimde belirlenebilmektedir. LiDAR teknolojisinin temelleri 1960'lı yıllara dayanmakta olup ilk uygulamalar denizaltı tespitine yönelik hava platformlarında gerçekleştirilmiştir. Sistemin

operasyonel kullanımı ise 1970'lerin başında yaygınlık kazanmıştır. O tarihten bu yana sensör teknolojisi, veri işleme algoritmaları ve platform çeşitliliği açısından önemli bir evrim geçirerek günümüzde kara, hava ve deniz platformlarında kullanılır hale gelmiştir (Weng, 2012; Dong ve Chen, 2017).

LiDAR sistemi, hedef yüzeye lazer darbeleri göndererek çalışır. Gönderilen enerji, karşılaştığı yüzeyden kısmen yansır ve sensöre geri döner. Bu geri dönüş süresi kaydedilerek sensör-hedef mesafesi hesaplanmaktadır.



Şekil 1: LiDAR'ın çalışma prensibi

LiDAR sisteminin performansı çeşitli parametrelerle tanımlanmaktadır. Açısal tarama aralığı, sistemin ölçüm yapabileceği yatay açıyı ifade etmekte olup 360°'ye ulaşabilen sistemler tam çevresel tarama kapasitesine sahipken, daha dar açılı sistemler yalnızca belirli bir kesimi tarayabilmektedir. Açısal çözünürlük, oluşturulan nokta bulutunun detay seviyesini doğrudan etkiler; çözünürlük değeri küçüldükçe harita kalitesi artmaktadır. Tarama frekansı ise sistemin saniye başına tamamladığı dönüş sayısını belirtir. Örneğin 10 Hz frekanslı bir sistem, saniyede 10 tam tarama döngüsü gerçekleştirmektedir. Tarama yoğunluğu açısından ise 1024 örnek/tarama gibi değerler, tek bir tarama döngüsünde elde edilen nokta sayısını göstermektedir (Tummala, 2019).

LiDAR ölçümlerinden elde edilen temel çıktı, her biri enlem, boylam ve yükseklik bilgisi içeren üç boyutlu koordinat kümelerinden oluşan nokta bulutudur. Bu noktalar, lazer ışınının çarptığı yüzeyin türüne göre sınıflandırılmaktadır (Dong ve Chen, 2017; Tummala, 2019). LiDAR

verileri genellikle "nokta bulutu" olarak ifade edilen üç boyutlu koordinat kümelerinden oluşmaktadır. Her bir nokta; X, Y ve Z koordinat bilgisine ek olarak yansıma şiddeti, dönüş numarası ve sınıf bilgisi gibi öznitelikler içerebilmektedir. Lazer darbelerinin yüzeylerle etkileşimine bağlı olarak birden fazla dönüş kaydedilebilmektedir. İlk dönüş sinyalleri sensöre ulaşan ilk yansımaları temsil eder; bunlar genellikle ağaç tepeleri veya bina çatıları gibi üst yüzeylerden kaynaklanmaktadır. Son dönüş sinyalleri ise ışının ulaşabildiği en alt yüzeyden — zemin ya da alçak bitki örtüsünden — geri dönen yansımalarıdır. Foton bazında ele alındığında, bir lazer ışını oluşturan fotonların bir kısmı ağaç tepesine çarparak geri dönerken, geri kalanlar dal, gövde ve yapraklardan geçerek zemine ulaşır ve oradan yansır. Böylece tek bir lazer darbesi birden fazla dönüş noktası üretebilmektedir (Demetrios ve Hans-Erik , 2008; Tummala, 2019).

Veri yoğunluğu da sonuçların kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Birim alana düşen nokta sayısı arttıkça, özellikle bitki örtüsünün yoğun olduğu bölgelerde zemine nüfuz eden nokta oranı yükselir ve bu durum daha güvenilir yüzey modellerinin üretilmesini sağlamaktadır (ASPRS, 2023).

LiDAR teknolojisi, atmosferik ve çevresel parametrelerin izlenmesinden kentsel planlama ve altyapı yönetimine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Orman envanteri (ağaç yüksekliği, örtü yoğunluğu, tür dağılımı), yüksek çözünürlüklü topografik haritalama, tarihi ve kültürel miras alanlarının belgelenmesi, enerji hatları ve demiryolu altyapısının denetimi ile denizaltı batimetri çalışmaları bu alanların başında gelmektedir. Bunların yanı sıra maden araştırmaları, nehir yatağı analizleri ve atmosferik partikül tespiti gibi uygulamalarda da etkin biçimde kullanılmaktadır (Elprocus, 2020).

LiDAR sistemleri platform türüne bağlı olarak hava (ALS), yersel (TLS) ve mobil LiDAR sistemleri şeklinde sınıflandırılabilir. Hava LiDAR sistemleri (ALS), uçak veya helikopter gibi platformlara monte edilerek geniş alanların hızlı ve yüksek çözünürlüklü biçimde taranmasına olanak tanımaktadır. Bu sistemler özellikle erişimi güç ve geniş ormanlık alanların haritalanmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Yersel LiDAR sistemleri (TLS) ise sabit bir noktadan gerçekleştirilen yüksek yoğunluklu taramalara imkân tanıyarak daha ayrıntılı ve yakın mesafe ölçümleri sunmaktadır. Mobil LiDAR sistemleri, araç, insansız hava aracı (İHA) veya el tipi platformlara entegre edilerek dinamik ortamlarda sürekli veri toplanmasını mümkün kılmaktadır. Bu sistemler özellikle yol güzergâhları, kentsel alanlar ve orman yolları gibi doğrusal yapıların hızlı biçimde belgelenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Her üç platform türü de farklı ölçek, çözünürlük ve erişilebilirlik avantajları sunmakta; uygulamanın amacına ve arazi koşullarına göre tek başına ya da birlikte kullanılabilir (Tummala, 2019). Ne var ki yoğun kanopi örtüsü, eğimli topoğrafya, düzensiz zemin noktası dağılımı ve gürültü içeren

ölçümler, bu ortamlarda zemin noktalarının güvenilir biçimde belirlenmesini önemli ölçüde güçleştirmektedir. Bu nedenle nokta bulutlarının doğru sınıflandırılması ve zemin filtreleme algoritmalarının uygun parametrelerle uygulanması kritik bir öneme sahiptir. Özellikle filtreleme aşamasında yapılan yanlış sınıflandırmalar, üretilen sayısal arazi modellerinin doğruluğunu doğrudan olumsuz etkileyebilmektedir (ASPRS, 2023). Ormanlık alanlarda hava LiDAR verilerinin zemin filtreleme süreci, bu alanda kullanılan yaygın algoritmalar, karşılaşılan uygulama zorlukları ve karmaşık topoğrafik yapılarıdaki sınıflandırma problemleri çerçevesinde değerlendirilmektedir. Ayrıca farklı filtreleme yaklaşımlarının güçlü ve sınırlı yönleri ile uygulama alanları metodolojik bir bakış açısıyla ele alınmaktadır.

2.ORMANLIK ALANLARDA ZEMİN FİLTRELEMENİN ZORLUKLARI

Hava LiDAR sistemleri, orman alanlarında zemin yüzeyinin üç boyutlu olarak modellenmesinde güçlü bir araç olmakla birlikte, bu ortamların kendine özgü yapısı veri kalitesini ve zemin noktalarının doğru belirlenmesini önemli ölçüde güçleştirmektedir. Ormanlık alanlarda zemin filtreleme problemleri; bitki örtüsünün lazer sinyaline etkisi, arazi yapısının karmaşıklığı, veri gürültüsü ve algoritma parametrelerinin belirlenmesi gibi birbirini etkileyen farklı faktörler üzerinden değerlendirilmektedir.

2.1. Bitki Örtüsünün Zemine Nüfuza Etkisi

Ormanlık alanlarda lazer ışınlarının yoğun bitki örtüsünden geçerek zemine ulaşması, zemin filtrelemenin önündeki en temel engellerden birini oluşturmaktadır. Özellikle yapraklı dönemlerde kanopi yoğunluğunun artması, lazer enerjisinin büyük bölümünün ağaç tepelerinde yansımaya ve zemine ulaşan sinyal miktarının önemli ölçüde azalmasına yol açmaktadır (Demetrios ve Hans-Erik , 2008). Bu durum, zemin katmanında nokta yoğunluğunun azalmasına neden olarak sayısal arazi modellerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

Bununla birlikte, veri yoğunluğunun artırılması bu sorunu kısmen gidermektedir. Birim alana düşen nokta sayısı yükseldikçe bitki örtüsündeki boşluklardan geçen ve zemine ulaşan lazer darbesi oranı da artmakta; dolayısıyla zemin noktalarının daha eksiksiz biçimde elde edilmesi mümkün olmaktadır (ASPRS, 2023). Ancak yoğun çalılık alanlarında ya da alçak bitki örtüsünün yoğun olduğu kesimlerde bu yoğunluk artışı bile yetersiz kalabilmekte; üstelik alçak bitki örtüsünden gelen yansımalar çıplak zemin noktalarıyla karıştırılabilmektedir (Demetrios ve Hans-Erik , 2008).

2.2. Zemin ve Zemin Üstü Noktaların Ayırıştırılması

Ormanlık alanlarda zemin filtrelemenin bir diğer önemli güçlüğü, zemine ait noktaların ağaç gövdeleri, dallar, yapraklar ve alt bitki örtüsü gibi zemin üstü unsurlardan kaynaklanan noktalarla iç içe geçmesidir. Nokta bulutunda her koordinatın hangi yüzeye karşılık geldiğinin belirlenmesi, otomatik sınıflandırma algoritmalarının temel görevlerinden biridir. Ancak bu süreç, özellikle dikey yapı açısından karmaşık orman kesimlerinde önemli zorluklar içermektedir (Tummala, 2019).

Dönüş türleri bu ayırıştırma sürecinde belirleyici bir rol üstlenmektedir. Son dönüş noktalarının zemini temsil ettiği varsayımına dayanan geleneksel yaklaşımlar, özellikle karmaşık arazi yapılarında yetersiz kalabilmektedir. Yapılan çalışmalar, yalnızca son dönüş noktalarının kullanıldığı analizlerin düşük F1 skoru ürettiğini ortaya koymaktadır (Pingel ve diğerleri, 2013; Chen ve diğerleri, 2017). Buna karşın ikinci ve son dönüş noktalarının birlikte değerlendirilmesi, zemin sınıflandırma başarısını belirgin biçimde artırabilmektedir.

2.3. Arazi Yapısının Karmaşıklığı

Arazi topoğrafyası, zemin filtreleme algoritmalarının performansı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir. Eğimli ve engebeli arazilerde zemin noktalarının doğru biçimde ayırıştırılması, düz alanlara kıyasla çok daha güç olmaktadır. Nitekim pek çok çalışmada, arazi eğiminin artmasıyla birlikte filtreleme hatalarının da yükseldiği gözlemlenmiştir (Robert ve diğerleri, 2019; Klápště ve diğerleri, 2020). Yakın mesafelerde yükseklik farklarının belirgin olduğu karmaşık arazi türlerinde, yalnızca düz araziler için optimize edilmiş algoritmaların başarıımı önemli ölçüde düşmektedir.

Bu bağlamda zemin filtreleme algoritmalarının seçiminde arazi türünün gözetilmesi büyük önem taşımaktadır. Aynı algoritmanın farklı arazi koşullarında birbirinden çok farklı sonuçlar verebileceği; dolayısıyla tek bir algoritmanın tüm arazi türleri için evrensel bir çözüm sunamayacağı vurgulanmaktadır (Robert ve diğerleri, 2019).

2.4. Gürültü ve Aykırı Değerler

Ham LiDAR nokta bulutları; atmosferik saçılma, yüzey yansımaları ve sistem kaynaklı hatalar nedeniyle gürültü noktaları ve aykırı değerler içermektedir. Bu istenmeyen noktaların filtreleme öncesinde veri setinden temizlenmesi, sonraki işlem adımlarının güvenilirliği açısından önemli bir ön işlem adımdır. Heterojen arazi örtüsüne sahip bölgelerde uygulanan gürültü filtreleme eşiklerinin sistematik sapmalara yol açabildiği ve orman modellerinin doğruluğunu olumsuz etkilediği bilinmektedir (Mahoney ve diğerleri, 2022). Bunun yanı sıra yansıyan yüzeylerden kaynaklanan yoğun gürültü noktaları da sınıflandırma sürecinde ciddi hatalar üretebilmektedir (Gao ve diğerleri, 2021).

2.5. Parametre Belirleme ve Otomasyon Sorunu

Zemin filtreleme algoritmalarının performansı büyük ölçüde kullanılan parametrelerin doğruluğuna bağlıdır. Eşik değerleri, pencere boyutu ve yoğunluk parametreleri gibi girdiler çoğunlukla deneyime dayalı yöntemlerle belirlenmekte; bu durum hem zaman maliyetini artırmakta hem de sonuçların tekrarlanabilirliğini sınırlamaktadır (Zhao ve diğerleri, 2016; Zhang ve diğerleri, 2023). Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, parametre belirleme sürecini otomatikleştirme potansiyeline sahiptir. Ancak yüksek veri hacimlerinde bu süreç hâlâ önemli bir hesaplama yükü oluşturmaktadır (Luo ve diğerleri, 2023).

3.ZEMİN FİLTRELEME ALGORİTMALARI

LiDAR nokta bulutlarından zemin yüzeyinin ayrıştırılması, sayısal arazi modeli üretiminin en kritik aşamalarından biridir. Bu amaçla geliştirilen zemin filtreleme algoritmaları, nokta bulutu içerisindeki zemin ve zemin üstü noktaların farklı kriterlere göre sınıflandırılmasını hedeflemektedir. Geliştirilen yöntemler, kullanılan yaklaşım türüne bağlı olarak farklı kategoriler altında incelenmektedir.

Zemin filtreleme algoritmaları genel olarak morfolojik yaklaşımlar, yüzey tabanlı yöntemler, kümeleme tabanlı teknikler ve makine öğrenmesi temelli yöntemler olmak üzere farklı kategorilerde ele alınmaktadır. Bu yöntemlerin performansı; veri yoğunluğu, arazi eğimi ve bitki örtüsü yapısı gibi çevresel ve veri kaynaklı faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

3.1. CSF (Cloth Simulation Filter) Algoritması

CSF (Cloth Simulation Filter) algoritması, zemin noktası sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir ve kumaş simülasyonu prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşımda nokta bulutu üzerine sanal bir kumaş serilmekte ve yerçekimi etkisi altında yüzeye oturması simüle edilerek zemin ve zemin üstü noktalar ayrıştırılmaktadır.

Algoritma özellikle düz ve orta eğimli arazilerde yüksek başarı göstermekte olup, ormanlık alanlar, batimetrik uygulamalar ve maden sahaları gibi farklı çalışma ortamlarında test edilmiştir. Yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda CSF, RF (Random Forest) ve MSBF (Modified Slope-Based Filter) yöntemleriyle birlikte değerlendirilmiş ve “time step” parametresinin etkin kullanımıyla 0.86 kappa değeri ile yüksek sınıflandırma başarısı elde etmiştir (Bailey ve diğerleri, 2022). Batimetrik LiDAR uygulamalarında ise 0.5 m nokta aralığının en uygun performansı sağladığı rapor edilmiştir (Iwen ve diğerleri, 2023).

CSF algoritmasının en önemli avantajı, parametre yapısının görece basit olması ve farklı veri setlerine hızlı şekilde uyarlanabilmesidir. Ayrıca karmaşık modelleme süreçlerine ihtiyaç duymadan zemin yüzeyini fizik tabanlı bir yaklaşım ile temsil edebilmesi, yöntemin pratik uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, algoritmanın arazi eğimine

ve bitki örtüsü yoğunluğuna duyarlı olması önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır. Özellikle ormanlık alanlarda, çok katmanlı bitki örtüsünün oluşturduğu karmaşık dikey yapı ve zemin noktasına ulaşımın kısıtlı olması, kumaş modelinin gerçek zemin yüzeyine adaptasyonunu zorlaştırabilmektedir. Bu durum, yer yer yanlış zemin temsili veya zemin üstü noktaların zemine dahil edilmesi gibi hatalara neden olabilmektedir. Özellikle düşük bitki örtüsüne sahip alanlarda sınıflandırma performansının azalabildiği, dik eğimli ve heterojen arazi yapılarında ise hata oranının arttığı bildirilmektedir (Robert ve diğerleri, 2019).

Ayrıca karmaşık topoğrafyalarda CSF ile elde edilen sonuçların, ikinci ve son dönüş noktalarının birlikte kullanıldığı yaklaşımlara kıyasla daha düşük F1 skoru ürettiği görülmektedir. Bu durum, algoritmanın arazi yapısına ve veri yoğunluğuna bağlı olarak değişken performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Kurtulgu ve Pırtı, 2025).

3.2. Yüzey Tabanlı Filtreleme Yöntemler

Yüzey tabanlı filtreleme yöntemleri, nokta bulutunun doğrudan geometrik veya hücresel temsiller üzerinden modellenmesine dayanan yaklaşımları kapsamaktadır. Bu yöntemler genel olarak, yüzey bilgisini ya hücresel (grid tabanlı) bir yapıya indirger ya da yerel geometrik özellikleri doğrudan analiz ederek zemin–zemin üstü ayrımını gerçekleştirir. Bu kapsamda yöntemler; grid tabanlı (morfolojik) yaklaşımlar ve geometrik yüzey modelleme tabanlı yaklaşımlar olmak üzere iki alt grupta incelenebilir.

3.2.1. Grid / Morfolojik tabanlı yöntemler

Zemin ve zemin üstü noktaların ayrıştırılmasında görüntü işleme temelli işlemlerden yararlanan klasik yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde nokta bulutu genellikle belirli bir grid yapısına dönüştürülmekte ve genişleme (dilation) ile aşındırma (erosion) gibi morfolojik operasyonlar uygulanmaktadır. Temel amaç, yüzeydeki yüksek frekanslı değişimleri bastırarak daha düzgün bir zemin yüzeyi elde etmektir.

Bu yaklaşım, özellikle düzenli topoğrafyalarda başarılı sonuçlar üretmesine rağmen, eğimli ve karmaşık arazi yapılarında performans kaybı gösterebilmektedir. Bunun başlıca nedeni, sabit pencere boyutlarının farklı eğim koşullarına uyum sağlayamaması ve dolayısıyla yerel yüzey değişimlerini yeterince temsil edememesidir. Ayrıca yoğun bitki örtüsünün bulunduğu alanlarda zemin noktalarının yeterince korunamaması, yöntemin önemli sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Morfolojik filtreleme ile benzer şekilde, ızgara tabanlı yaklaşımlar da nokta bulutunu hücresel yapılara indirger ve sınıflandırma işlemini bu yapı üzerinden gerçekleştirir. Ancak bu sadeleştirme süreci, özellikle detaylı arazi morfolojisinin korunması açısından bilgi kaybına neden olabilmektedir (Qin ve diğerleri, 2023).

3.2.2. Geometrik/ düzlem yüzey tabanlı modelleme yöntemleri

Geometrik yüzey modelleme tabanlı filtreleme yöntemleri, zemin ve zemin üstü noktaların ayrıştırılmasında doğrudan yüzey geometrisini temel alan yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, grid tabanlı sadeleştirme yerine nokta bulutunun yerel düzlem yapısını ve eğim değişimlerini analiz ederek sınıflandırma gerçekleştirmektedir.

Bu kapsamda PPDF (Progressive Plane Detection Filtering) yöntemi, çok ölçekli düzlem tespitine dayalı iteratif bir filtreleme yaklaşımı sunmaktadır. Yöntem, orman örtüsü altındaki karmaşık yapıyı aşamalı RANSAC tabanlı düzlem algılama ile modellemekte ve farklı ölçeklerde elde edilen düzlemler üzerinden en uygun zemin yüzeyini belirlemektedir. Bu süreçte eğim değişimleri küçük ölçekli düzlemsel yapılarla temsil edilmekte ve her iterasyonda seçilen düzlemlerden zemin noktaları kademeli olarak ayrıştırılmaktadır (Cai ve diğerleri, 2023).

PPDF yönteminin en önemli avantajlarından biri, klasik morfolojik veya grid tabanlı yöntemlere kıyasla daha az kullanıcı parametresine ihtiyaç duymasıdır. Bu durum, özellikle ormanlık ve heterojen arazi koşullarında yönteminin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ayrıca sabit pencere veya hücre boyutuna bağımlı olmaması, yerel topoğrafik değişimlere daha iyi uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte yöntem, yüksek yoğunluklu nokta bulutlarında hesaplama maliyeti açısından daha ağır olabilmekte ve çok katmanlı orman yapılarında doğru düzlemin seçimi iteratif süreci etkileyebilmektedir. Buna rağmen, karmaşık ormanlık arazilerde zemin noktalarının ayrıştırılmasında başarılı sonuçlar üretmesi nedeniyle literatürde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

3.2.3. Izgara Tabanlı Yöntemler

Izgara tabanlı yaklaşımlar, nokta bulutunu düzenli hücresel yapılara bölerek her hücre içerisindeki yükseklik dağılımına göre zemin ve zemin üstü noktaların ayrıştırılmasını esas almaktadır. Bu yöntemler özellikle yüksek yoğunluklu LiDAR verilerinde bina, ağaç ve zemin sınıflarının ayırımında etkili sonuçlar üretebilmektedir. Ancak hücresel yapıya indirgeme süreci, arazi yüzeyinin detaylı morfolojik özelliklerinin kaybolmasına neden olabilmekte ve özellikle karmaşık topoğrafyalarda yerel yüzey değişimlerinin yeterince temsil edilememesi gibi sınırlılıklar ortaya çıkarmaktadır (Qin ve diğerleri, 2023).

Izgara tabanlı yöntemleri tamamlayan bir diğer yaklaşım, LiDAR son dönüş noktalarının farklı yükseklik katmanlarına ayrılarak her katmana bağımsız filtreleme işlemi uygulanmasına dayanmaktadır. Bu strateji, zemine yakın konumdaki noktaların öncelikli olarak işlenmesini mümkün kılmakta ve sayısal arazi modelinin daha tutarlı biçimde oluşturulmasına katkı sağlamaktadır (Chen ve diğerleri, 2017). Genel olarak izgara tabanlı yöntemler hesaplama açısından hızlı ve uygulanması kolay olmasına

rağmen, arazi yüzeyindeki ince detayların kaybı ve karmaşık topoğrafyalarda doğruluk azalması gibi sınırlılıklar göstermektedir.

3.2.4. Kümeleme Tabanlı Yöntemler

Kümeleme algoritmaları, nokta bulutu içerisindeki veri noktalarını yoğunluk ve uzaklık temelli ölçütlere göre gruplandırarak zemin ve zemin üstü noktaların ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Bu yöntemler arasında özellikle DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) ve türevleri, gürültüye duyarlı yapısı ve düzensiz veri dağılımlarında uygulanabilirliği nedeniyle ormanlık alan uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Literatürde, veri kümelerinin 100 m × 100 m'lik ızgara hücrelerine ayrılarak ön sınıflandırmaya tabi tutulduğu ve ardından DBSCAN algoritmasının uygulandığı çalışmalarda, mesafe eşiğinin 0.7 m ile 4 m arasında değişmesinin kümeleme performansı üzerinde belirleyici olduğu rapor edilmiştir (Ghosh ve Lohani, 2013). İnsansız su araçları için geliştirilen uyarlanabilir DBSCAN yaklaşımında ise komşuluk mesafesinin her nokta için dinamik olarak belirlenmesi, sabit parametrelili klasik yöntemlere göre daha kararlı sonuçlar üretmiştir (Deng ve diğerleri, 2022). Benzer şekilde, K-D tree veri yapısına dayalı geliştirilen DBSCAN türevinde minPts parametresinin veri setinden otomatik olarak türetilmesi, manuel parametre seçimine olan bağımlılığı azaltarak yöntemin uygulanabilirliğini artırmıştır (Pan ve diğerleri, 2023).

Kümeleme tabanlı yaklaşımların en önemli avantajı, veri içerisindeki düzensiz dağılımları ve yerel yoğunluk farklılıklarını doğrudan modelleyebilmesidir. Bununla birlikte algoritma performansı, seçilen parametrelere ve veri yoğunluğuna bağlı olup heterojen arazi koşullarında sınıflandırma başarısında dalgalanmalar gözlenebilmektedir. Yoğun bitki örtüsü ve karmaşık yüzey yapılarında ise yanlış kümeleme riski artabilmektedir (Qin ve diğerleri, 2023). Bu nedenle yöntemin etkin kullanımı, arazi koşullarına uygun adaptif parametre seçim mekanizmalarının geliştirilmesine bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

3.2.5. Derin Öğrenme Tabanlı Yöntemler

Geleneksel zemin filtreleme algoritmalarına alternatif olarak son yıllarda derin öğrenme tabanlı yöntemler LiDAR nokta bulutu analizinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, veri içerisindeki karmaşık uzamsal ilişkileri manuel özellik tanımlamasına ihtiyaç duymadan öğrenebilme kapasitesine sahiptir. Bu kapsamda dinamik grafik evrişimli sinir ağı (DGCNN), özellikle nokta bulutu verisinin yerel komşuluk ilişkilerini grafik yapısı üzerinden modelleyebilmesi nedeniyle öne çıkan yöntemlerden biridir (Gamal ve diğerleri, 2020; Luo ve diğerleri, 2023).

DGCNN tabanlı yaklaşımlar, bina ve bitki örtüsü gibi karmaşık yapıların ayrıştırılmasında ve tam dalga biçimli LiDAR verilerinden zemin

noktalarının çıkarılmasında yüksek temsil kabiliyeti sunmaktadır. Özellikle hiperspektral görüntüler ile LiDAR verilerinin birlikte kullanıldığı çalışmalarda, dalga biçimi parametrelerinin nesne özelliklerini daha ayrıntılı yansıttığı ve sınıflandırma doğruluğunu artırdığı görülmüştür (Luo ve diğerleri, 2023).

Ancak derin öğrenme tabanlı yöntemlerin bazı önemli sınırlılıkları da göz ardı edilmemelidir. Büyük veri setlerinde etiketleme sürecinin zaman alıcı olması, yüksek hesaplama maliyeti ve model eğitimi için güçlü donanım gereksinimi uygulama sürecini zorlaştırmaktadır. Bunun yanı sıra farklı arazi tiplerine genellenabilirlik problemi ve eğitim verisine olan bağımlılık, yöntemin pratik kullanımını kısıtlayan diğer önemli faktörler arasında yer almaktadır (Luo ve diğerleri, 2023).

Genel olarak literatürde hiçbir yöntemin tüm arazi türlerinde üstün performans göstermediği görülmektedir. Bu durum, zemin filtreleme probleminde tek bir yaklaşımın yeterli olmadığını ve yöntem seçiminin veri yoğunluğu, arazi eğimi ve bitki örtüsü yapısı gibi çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada ormanlık alanlarda hava LiDAR verilerinden zemin noktalarının ayrıştırılması amacıyla farklı filtreleme yaklaşımları incelenmiş ve elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak sonuçlar, zemin filtreleme performansının yalnızca kullanılan algoritmaya değil, aynı zamanda dönüş noktası seçimi, arazi yapısı ve veri yoğunluğu gibi faktörlere güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir.

Zemin filtrelemede dönüş noktası seçiminin kritik bir etken olduğu görülmektedir. Literatürde pek çok çalışma (Pingel ve diğerleri, 2013; Chen ve diğerleri, 2017) ormanlık alanlarda yalnızca son dönüş noktalarını zemin verisi olarak kabul etmiştir. Ancak gerçekleştirilen analizler, bu yaklaşımın karmaşık arazi yapılarında yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Nitekim yalnızca son dönüş noktalarının kullanıldığı analizde 0.19 F1 skoru elde edilmiş ve bu sonuç yöntemin karmaşık topoğrafyalarda güvenilir zemin tespiti için tek başına yeterli olmadığını açıkça göstermiştir. Buna karşın ikinci ve son dönüş noktalarının birlikte kullanılması, sınıflandırma başarısını 0.71 F1 skoruna yükselterek belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Bu bulgu, özellikle çok katmanlı bitki örtüsüne sahip ormanlık alanlarda dönüş noktası kombinasyonunun zemin filtreleme performansı üzerindeki belirleyici etkisini destekler niteliktedir (Kurtulgu ve Pırtı, 2025).

CSF algoritması, literatürde yaygın biçimde tercih edilen ve düz ile orta eğimli arazilerde başarılı sonuçlar ürettiği bilinen bir yöntemdir (Erol ve diğerleri, 2020; Liao ve diğerleri, 2021; Yılmaz ve Güngör, 2021; Kim I. ve diğerleri, 2022). Bununla birlikte gerçekleştirilen analizlerde, yakın

mesafelerde belirgin eğim farklılıklarının bulunduğu karmaşık arazi koşullarında CSF ile elde edilen F1 skorunun 0.45 düzeyinde kaldığı görülmüştür. Bu sonuç, algoritmanın düz arazi yapıları için optimize edilmiş parametre yapısının heterojen topoğrafyalara yeterince uyum sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Nitekim (Robert ve diğerleri, 2019)'te de CSF'nin dik eğimli arazilerde görece iyi performans sergilemesine karşın düşük bitki örtüsü koşullarında sınıflandırma başarısının azaldığı bildirilmiştir. Bu bağlamda mevcut bulgular, CSF'nin karmaşık ormanlık arazilerde tek başına kullanımının sınırlılıklarını literatürle uyumlu biçimde doğrulamaktadır.

Zemin filtrelemede algoritma seçiminin yanı sıra arazi türünün de belirleyici bir etken olduğu görülmektedir. Morfolojik ve ızgara tabanlı yöntemler hesaplama verimliliği açısından avantaj sağlamakla birlikte, karmaşık topoğrafyalarda detay kaybı yaşanabilmekte ve yerel yüzey değişimleri yeterince temsil edilememektedir (Qin ve diğerleri, 2023). PPDF gibi geometrik yüzey tabanlı yaklaşımlar ise parametre duyarsızlığı ve adaptif yapısı sayesinde heterojen arazi koşullarında daha stabil sonuçlar üretmektedir (Cai ve diğerleri, 2023). Bu durum, tek bir algoritmanın tüm arazi türlerinde evrensel bir çözüm sunamayacağını bir kez daha teyit etmektedir (Robert ve diğerleri, 2019).

Kümeleme tabanlı yöntemler, özellikle DBSCAN ve türevleri, veri içerisindeki yoğunluk değişimlerini modelleyebilme yetenekleri sayesinde düzensiz arazi yapılarında esnek bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin performansı parametre seçimine yüksek derecede bağlıdır ve heterojen arazi koşullarında sınıflandırma sonuçlarında dalgalanmalar görülebilmektedir. Benzer şekilde, yoğun bitki örtüsünün bulunduğu alanlarda yanlış kümeleme riski artmaktadır (Qin ve diğerleri, 2023). Bu açıdan değerlendirildiğinde, söz konusu yöntemlerin pratik ormancılık uygulamalarına entegrasyonu henüz geleneksel yöntemler kadar yaygınlaşmamıştır.

Son yıllarda giderek yaygınlaşan derin öğrenme tabanlı yöntemler ise, nokta bulutu içerisindeki karmaşık uzamsal ilişkileri otomatik olarak öğrenebilme kapasitesine sahiptir. DGCNN gibi modeller, özellikle karmaşık yapıların ayrıştırılmasında yüksek temsil gücü sunmaktadır (Gamal ve diğerleri, 2020; Luo ve diğerleri, 2023). Ancak bu yöntemlerin yüksek hesaplama maliyeti, geniş ölçekli etiketli veri gereksinimi ve farklı arazi tiplerine genellenebilirlik sorunları, pratik uygulamalarda önemli kısıtlar oluşturmaktadır.

Genel olarak elde edilen bulgular, ormanlık alanlarda zemin filtreleme performansının tek bir algoritmaya bağlı olarak optimize edilemediğini göstermektedir. Bunun yerine dönüş noktası seçimi, arazi morfolojisi ve veri yoğunluğu gibi faktörlerin birlikte değerlendirildiği bütünsel bir yaklaşım gereklidir. Bu nedenle, farklı arazi koşullarına uyum

sağlayabilen adaptif ve veri odaklı yöntemlerin geliştirilmesi, gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

- ASPRS. (2023). ASPRS Positional Accuracy Standards For Dijital Geospatial Data.
- Bailey, G., Li, Y., McKinney, N., Yoder, D., Wright, W., & Herrero, H. (2022). Comparison of Ground Point Filtering Algorithms for High-Density Point Clouds Collected by Terrestrial LiDAR. *Remote Sensing*. HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14194776>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14194776>
- Cai, S., Liang, X., & Yu, S. (2023). A Progressive Plane Detection Filtering Method for Airborne LiDAR Data in Forested Landscapes. *Forests*, 14(3). HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f14030498>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f14030498>
- Chen, Z., Gao, B., & Devereux, B. (2017). State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data. *Sensors*, 17(1), 150. HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s17010150>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s17010150>
- Demetrios, G., & Hans-Erik , A. (2008). *A Guide to LIDAR Data Acquisition and Processing for the Forests of the Pacific Northwest*. United States Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-768.
- Deng, L., Guo, T., Wang, H., Chi, Z., Wu, Z., & Yuan, R. (2022). Obstacle Detection of Unmanned Surface Vehicle Based on Lidar Point Cloud Data. In *OCEANS 2022* (s. 1-8). IEEE. HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977340>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977340>
- Dong, P., & Chen, Q. (2017). *Lidar Remote Sensing and Applications*. CRC Press.
- Elprocus. (2020, 10 28). *All You Know About LIDAR Systems and Applications*. HYPERLINK "<https://www.elprocus.com/lidar-light-detection-and-ranging-working-application/>" \t "_blank" <https://www.elprocus.com/lidar-light-detection-and-ranging-working-application/>
- Erol, S., Özögel, E., Kuçak, R., & Erol, B. (2020). Utilizing Airborne LiDAR and UAV Photogrammetry Techniques in Local Geoid Model Determination and Validation. *ISPRS-International Journal of Geo-Information*, 9. HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi9090528>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi9090528>
- Gamal, A., Wibisono, A., Wicaksono, S. B., Abyan, M., Hamid, N., Wisesa, H., Jatmiko, W., & Ardianto, R. (2020). Automatic LIDAR building segmentation based on DGCNN and euclidean clustering. *Journal of Big Data*, 7, 1-18. HYPERLINK "<https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40537-020-00374-x>" \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40537-020-00374-x>
- Gao, R., Park, J., Hu, X., Yang, S., & Cho, K. (2021). Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data.

- Remote Sensing*, 13. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13163058"](https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13163058) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13163058>
- Ghosh, S., & Lohani, B. (2013). Mining Lidar Data with Spatial Clustering Algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, 34(14), 5119-5135. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431161.2013.787499"](https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431161.2013.787499) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431161.2013.787499>
- Iwen, D., Wąż, M., Klebba, M., & Adamczyk, A. (2023). Automated Detection of Seabed Objects from Mbes Data Based on Lidar Data Filtering Methods. *SSRN*. HYPERLINK ["https://doi.org/Available at SSRN 4421797"](https://doi.org/Available at SSRN 4421797) \t "_blank" <https://doi.org/Available at SSRN 4421797>
- Kim, I., Kim, J., Woo, H., & Choi, B. (2022). Feasibility of Terrestrial Laser Scanning System for Detecting and Monitoring Surface Displacement of Artificial Slopes on Forest Roads. *Sensors and Materials*, 34(12). HYPERLINK ["https://doi.org/https://doi.org/10.18494/SAM3949"](https://doi.org/https://doi.org/10.18494/SAM3949) \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.18494/SAM3949>
- Klápště, P., Fogl, M., Barták, V., Gdulová, K., Urban, R., & Moudrý, V. (2020). Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground filtering algorithms with UAV photogrammetry-based and LiDAR point clouds. 13(12), s. 1672-1694. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267"](https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267) \t
["_blank" https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267](https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267)
- Kurtulgu, Z., & Partı, A. (2025). A new approach for the classification of ground points from airborne LiDAR data in forested areas. *Šumarski list*, 149(1-2), s. 45-55. HYPERLINK ["https://doi.org/https://doi.org/10.31298/sl.149.1-2.4"](https://doi.org/https://doi.org/10.31298/sl.149.1-2.4) \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.31298/sl.149.1-2.4>
- Liao, J., Zhou, J., & Yang, W. (2021). Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types. *Open Geosciences*, 13(1), 497-504.
- Luo, W., Ma, H., Yuan, J., Zhang, L., Ma, H., Cai, Z., & Zhou, W. (2023). Luo, W., Ma, H., Yuan, J., Zhang, L., Ma, H., Cai, Z., & Zhou, W. (2023). High-Accuracy Filtering of Forest Scenes Based on Full-Waveform LiDAR Data and Hyperspectral Images. *Remote Sensing*, 15(14). HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15143499"](https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15143499) \t
["_blank" https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15143499](https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15143499)
- Mahoney, M. J., Johnson, L. K., Bevilacqua, E., & Beier, C. M. (2022). Filtering ground noise from LiDAR returns produces inferior models of forest aboveground biomass in heterogeneous landscapes. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1266-1280. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2103069"](https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2103069) \t
["_blank" https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2103069](https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2103069)
- Pan, Y. R., Xia, Y. H., Long, L. J., & Yang, M. L. (2023). Power-Line Extraction and Modelling from 3D Point Clouds Data Based on KD Tree DBSCAN Algorithm. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, (s. 1-11). HYPERLINK ["https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42835-023-01641-6"](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42835-023-01641-6) \t "_blank" <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42835-023-01641-6>
- Pingel, T., Clarke, K. C., & McBride, W. A. (2013). An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 77, 21-30.

- HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002"](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002>
- Qin, N., Tan, W., Guan, H., Wang, L., Ma, L., Tao, P., Fatholahi, S., Hu, X., & Li, J. (2023). Towards intelligent ground filtering of large-scale topographic point clouds: A comprehensive survey. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103566"](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103566) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103566>
- Robert, K. C., Lindsay, J. B., & Berg, A. A. (2019). An analysis of ground-point classifiers for terrestrial LiDAR. *Remote Sensing*, 11(16). HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11161915"](https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11161915) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11161915>
- Tummala, R. (2019). *Fundamentals of device and systems packaging: technologies and applications*. McGraw-Hill Education.
- Weng, Q. (2012). *An introduction to contemporary remote sensing*. McGraw-Hill Education.
- Yılmaz, Ç. S., & Güngör, O. (2021). The Effect of Point Density on Point Cloud Filtering Performance. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 2(1), 41-46. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.48123/rsgis.864234"](https://doi.org/https://doi.org/10.48123/rsgis.864234) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.48123/rsgis.864234>
- Zhang, Y., Tan, Y., Onda, Y., Hashimoto, A., Gomi, T., Chiu, C., & Inokoshi, S. (2023). A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. *Forest Ecosystems*, 10. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088"](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088>
- Zhao, X., Guo, Q., Su, Y., & Xue, B. (2016). Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 79-91. HYPERLINK
["https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.016"](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.016) \t "_blank"
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.016>

Endüstri 5.0 Çağında Veri Odaklı İnovasyon ve Teknoloji Yönetimi

Nur Nilgün SERT
M. Hanefi CALP

Yönetim Bilişim Sistemleri / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara Hacı Bayram Üniversitesi, Türkiye
(ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7541-6682>)
Yönetim Bilişim Sistemleri / İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ankara Hacı Bayram Üniversitesi,
Türkiye (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7991-438X>) sert.numilgun@ogr.hbv.edu.tr,
hanefi.calp@hbv.edu.tr

ÖZET

Büyük Veri ve Yapay Zekâ teknolojileri, günümüzün çalkantılı rekabet ortamında işletmeler için stratejik birer zorunluluğa dönüşmüştür. Ancak, veriyi anlamlandırma ve yönetim kapasitesinden yoksun firmalar veri miyopluğu riskiyle karşı karşıya kalırken, Endüstri 4.0'ın salt üretkenliğe odaklanan yaklaşımı teknolojik determinizmin sınırlarına dayanmıştır. Bu çalışma veri odaklı inovasyonun yönünü insan merkezlilik, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik sütunları üzerine inşa edilen Endüstri 5.0'in sosyo-teknik paradigmasına çevirmeyi amaçlamaktadır. Akademik literatür sentezine dayanan bu çalışmada kaynak ve bilgi temelli görüş, dinamik kapasiteler teorisi ve kaynak bağımlılığı teorisi entegre edilmiştir. Kurumların stratejik yol haritalama metodolojileri, işbirlikçi ve çeviklik mekanizmaları, yeşil insan kaynakları yönetimi ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) uygulamaları teknolojik dönüşümün temel köprüleri olarak konumlandırılmıştır. Sonuç olarak, ileri teknolojilerin şeffaf bir veri yönetişimi, esnek tasarım algısı, devlet destekli teşvik politikaları ve insan merkezli bir dijital çok yönlülükle desteklenmediği sürece sürdürülebilir bir rekabet avantajına dönüşmeyeceği teorik ve istatistiksel argümanlarla ortaya konmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Endüstri 5.0, Büyük Veri, Dijital Dönüşüm, İnovasyon, Teknoloji Yönetimi

I. GİRİŞ

Teknoloji yönetimi, donanım tedarikinin ötesine geçerek Bilgi Teknolojileri ile Operasyonel Teknolojilerin entegrasyonunu ifade etmektedir. Kaynaklara Dayalı Görüş ve Bilgi Temelli Görüş bağlamında, yapay zekâ ve büyük veri tek başına bir rekabet avantajı sağlamazken bu araçların kurum kültürüne entegre edilerek taklit edilemez bir örtük bilgiye dönüştürülmesi gereklilik oluşturmaktadır [23]. Başarılı bir entegrasyon için işletmelerin sistematik stratejik yol haritalama metodolojilerini kullanması gerekmektedir. [15], bu yol haritasının merkezinde yönetim yetkinliği ve kaynakların hazır bulunuşunun yer aldığını ve vizyoner liderlik ile kaynak tahsisi çözülmeden doğrudan teknoloji altyapısına odaklanmanın başarısızlıkla sonuçlanacağını vurgulamaktadır. [5], verinin gücünü performansa dönüştüren asıl mekanizmanın bilgi yönetimi olduğunu istatistiksel olarak kanıtlamıştır. Ayrıca, Kaynak Bağımlılığı Teorisi perspektifinden bakıldığında, hiçbir organizasyon dış ekosistemden bağımsız yaşayamadığı için dijitalleşme,

kurumlar arası iş birliğini tetikleyerek teknoloji transferini hızlandıran en önemli katalizördür [3].

Endüstri 5.0, önceki dönemin başarılarını reddeden değil, onun eksik bıraktığı sosyo-çevresel boyutları tamamlayan evrimsel bir yapı oluşturmaktadır [25]. Odak noktası, paydaş değerini maksimize eden algoritmik kontrol mekanizmalarından Akıllı Şehirler ve Toplum 5.0 vizyonu ile şekillenen kamu yönetişimine ve paydaş refahına kaymıştır. AB'nin dijital tek pazar stratejilerinde de görüldüğü üzere, bu geçiş izole bir sanayi hamlesi değil, şeffaflık ve sosyal kapsayıcılık barındıran stratejik bir yenilik yönetimi sürecidir [13]. Endüstri 5.0, otomasyon paradigmasının ötesine geçerek sürdürülebilir ve insan merkezli bir yaklaşımı temsil etmektedir. Temel odağı yapay zekâ destekli otomasyon olan Endüstri 4.0'ın aksine Endüstri 5.0, daha dirençli ve güçlü bir endüstriyel ekosistem inşa etmek amacıyla etik zekâ, kuantum güvenliği ve sürdürülebilirlik ilkelerini bütünleştirmektedir. Gerçek zamanlı optimizasyon, siber güvenlik ve stratejik karar alma süreçlerine ivme kazandıran Kuantum Makine Öğrenimi (QML), bu paradigmal geçişin merkezinde konumlanmaktadır. Kuantum bilişimin sunduğu paralellik, korelasyon ve yüksek boyutlu veri işleme gibi özgün kapasiteler sayesinde QML; Endüstri 5.0 altyapısını, karmaşık endüstriyel sınamalar karşısında proaktif öngöründe bulunma, dinamik uyum sağlama ve sistemleri esnek bir biçimde yeniden yapılandırma yetkinlikleriyle donatmaktadır [4].

Avrupa Komisyonu vizyonu ile şekillenen Endüstri 5.0, sanayiye salt ekonomik değer üreten kapalı bir kutu olmaktan çıkarp, ekolojik sınırlara saygı duyan ve Japonya'nın "Toplum 5.0" felsefesiyle entegre olan bir refah sağlayıcı olarak yeniden tanımlanmaktadır. Japonya tarafından öne sürülen Toplum 5.0 vizyonu, yapay zekanın sadece fabrikalarda değil sağlık (erken teşhis), eğitim (kişiselleştirilmiş öğrenme), ulaşım (otonom araçlar) ve afet yönetimi gibi tüm toplumsal katmanlarda insan refahını artırmak için kullanılmasını hedeflemektedir. Bu rotada eğitimden sağlığa, üretimden akıllı şehirlere kadar teknoloji, insan onurunu ve toplumsal faydayı artırmak için araçsallaştırılır [21].

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, gözleme dayalı ve kavramsal literatürün sistematik bir sentezine dayanan betimsel bir analizdir. Kapsam, Endüstri 4.0'dan 5.0'a geçişte aynı anda birçok katmanın etkileşiminin bütünsel değerlendirildiği, BiLSTM derin öğrenme modelleri, XAI gibi teknolojik altyapı dönüşümleri ve Dijital HRM,

İş Modeli İnovasyonu, Kurumlar Arası İş birliği gibi eşzamanlı organizasyonel değişimlerin incelenmesiyle sınırlandırılmıştır. Metodolojik olarak Kaynak Temelli Görüş, Bilgi Temelli Görüş, Teknoloji-Organizasyon-Çevre çerçevesi ve Dinamik Kapasiteler Teorisi temel alınmıştır.

2.1. Çalışmanın Önemi ve Amacı

Modern dijital ekonomide teknolojik varlıklar, işletmelerin pazar dinamiklerini okuma biçimlerini kökten değiştirmektedir. Ancak, salt veri biriktirmek radikal inovasyonu garanti etmemektedir. Turizm sektöründe yapılan güncel araştırmalar, yöneticilerin geçmiş satış raporlarına odaklanarak kapasite planlamasında veri miyopluğuna düştüklerini, bunun yerine tüketicilerin anlık arama motoru sorgularını öngörücü analitiklerle işlemeleri gerektiğini kanıtlamıştır [33].

Bu çalışmanın temel amacı, işletmelerin ham veriyi eyleme dönüştürülebilir stratejik içgörülere nasıl çevirebileceğini ve teknoloji yönetimini Endüstri 5.0 vizyonu altında nasıl yapılandırabileceğini gösteren kapsamlı bir teorik çerçeve sunmaktır.

2.2. Araştırma Motivasyonu ve Problemi

Endüstri 4.0 paradigması, üretkenlik ve otomasyon odaklı yapısıyla teknolojinin ittiği bir devrim olarak sanayiye yön vermiştir [16]. Ancak bu otomasyon takıntısı, sistemlerde şeffaflık ve etik sorunlarını derinleştirmiştir. Nitekim endüstri lideri firmalarda yaşanan aşırı otomasyon krizleri, üretim hatlarında insanın problem çözme ve sezgi yeteneğinin dışlanması sistematik çöktüşlere yol açabileceğini kanıtlamıştır [27]. Öte yandan, teknolojik dönüşümün kurumsal sınırları aşip kamu yönetişimine uyarlanması aşamasında ciddi boşluklar bulunmaktadır [13].

Temel araştırma problemi; teknolojinin insanı sistemden dışlamadan, çevresel tahribatı önleyerek ve güvenilir Yapay Zekâ (Trustworthy AI) ilkelerine uyum sağlayarak, hem mikro işletme hem de makro kamu düzeyinde değer yaratım sürecine nasıl entegre edileceğidir.

III. ENDÜSTRİ 5.0'IN TEKNOLOJİ YÖNETİMİNE ETKİLERİ

3.1. Stratejik Teknoloji Yönetimi Üzerindeki Etkiler

Endüstri 5.0, teknoloji yönetimini izole bir IT departmanı işlevi olmaktan çıkarıp tüm değer zincirine yayılan bir dinamik kapasite eksenine oturtmaktadır. [12]. hizmet odaklı bir vizyonun tek başına sürdürülebilir rekabet avantajı yaratmadığını; bunun ancak süreçlerin anlık konfigürasyonu operasyonel çeviklik, dış uzmanlıkların hızla sisteme entegrasyonu ortaklık

çevikliği ve varlıkların projeler arası esnek aktarımıyla sağlanan işbirlikçi çeviklik ile mümkün olduğunu kanıtlamaktadır. Bu süreçte, Gama ve Magistretti (2025) firmaların YZ'yi benimsemeden önce siber güvenlik yönetimi, dijital proje yönetişimi gibi etkinleştiren yetenekler inşa etmeleri gerektiğini, ancak sonrasında geliştiren yetenekler (artırılmış karar alma) elde edebileceklerini vurgulamaktadır. Özellikle turizm ve hizmet gibi dinamik sektörlerde, mevcut olanı sömürme ile yeni fırsatları keşfetme arasındaki "Dijital Çok Yönlülük" kavramı stratejik yönetimin temel dayanağını oluşturmaktadır [26].

3.2. Ar-Ge ve İnovasyon Süreçlerine Etkiler

Endüstri 5.0 ile Ar-Ge süreçleri köklü bir akışkanlık yaşamaktadır. Sadece pazar fırsatlarını hedefleyen geleneksel kalıplardan sıyrılarak insan merkezli girişimci oryantasyon formuna dönüşmektedir. [18], IoT sayesinde akıllı ürünlerin piyasaya sürüldükten sonra bile anlık veriyle yazılımsal olarak fonksiyon değiştirdiğini belirterek, sabit spesifikasyonlu geleneksel ürün geliştirme paradigmasının çöktüğünü ifade etmektedir. [25], inovasyonun artık sadece ekonomik büyüme için değil, etik risk yönetimi ve çalışanın bir ortak yaratıcı olarak sürece dahil edilmesi için kullanıldığını belirtmektedir. Fiziksel prototiplemenin getirdiği israf ve riskler, Dinamik simülasyon ve Dijital İkizler ile sanal ortama taşınmaktadır. Böylece Ar-Ge süreçlerindeki çevresel ayak izini sıfırlarken kişiselleştirilebilir ürün tasarımlarını hızlandırmaktadır [16]. Diğer yandan, teknolojik inovasyonun pazar başarısı kullanıcı merkezli tasarıma bağlı şekillenmektedir. [32], tarafından İsviçre'de yapılan bir popülasyon anketi, Dijital İkiz teknolojilerinin, geleneksel tıp kullanıcılarına karşı tamamlayıcı tıp kullanıcıları olan farklı profiller tarafından makineleşme korkusu ile tamamen zıt şekillerde algılandığını göstermektedir. Bu durum yenilik yönetiminde herkese uyan tek tıp (one-size-fits-all) stratejilerin başarısız olacağını kanıtlamaktadır.

3.3. İnsan Kaynakları ve Yetkinlik Yönetimi

Endüstri 5.0 bağlamında "Operatör 5.0" vizyonu, İnsan Kaynakları Yönetimini (İKY) idari bir destek birimi olmaktan çıkarıp analitik bir merkeze dönüştürmüştür. Nitel araştırmalar, Bilgi Teknolojileri Tabanlı İK'nın (Dijital İKY); e-işe alım, anlık performans takibi ve İK analitiği aracılığıyla organizasyonel esnekliği artırdığını göstermektedir [19]. [8], Mısır'daki otel endüstrisinde sürdürülebilir başarının ancak "Yeşil İnsan Kaynakları" ve "Yeşil İnsan Sermayesi" üzerinden yaratılacak "Yeşil İnovasyon" ile mümkün olacağını ampirik olarak ispatlamaktadır. Endüstri 5.0'ın akıllı ve

sürdürülebilir uygulamalarının, Gig Ekonomisi olarak adlandırılan kısa süreli proje bazlı esnek çalışma sistemleri ile entegre olması avantajlar sağlamaktadır. Gig Ekonomisi üzerinden küresel bağımsız yeteneklerin esnek bir biçimde projelere dahil edilmesi, İK'nın yeni sınırlarını çizmektedir ve şirketlerin sadece sabit bordrolu çalışanları değil, dijital platformlar üzerinden küresel ölçekteki bağımsız profesyonelleri de esnek bir biçimde insan sermayesi olarak yönetmesini zorunlu kılmaktadır [17]. Sahada ise çalışanlar, yorgunluğu önleyen dış iskeletler (exoskeletons) ve Karma Gerçeklik (MR) donanımları ile fiziksel ve bilişsel olarak desteklenmektedir [6].

3.4. Dijital Dönüşüm ve Organizasyonel Yapılar

KOBİ'ler ve büyük işletmeler için değer zincirinin modüllere ayrılabilmesi, iş modeli inovasyonunun temelini sağlamaktadır. RESTful, Modbus vb. farklı IT protokollerinin birbirini anlaması, organizasyonel çevikliğin ön koşulunu oluşturmaktadır. Dijital dönüşüm sadece yatırımcıya kar sağlamak için değil; tedarikçiden, üniversiteye, devlet kurumlarından işçi sendikalarına kadar tüm akıllı paydaşları sürece dahil eden bir teknoloji yönetişimi gerektirmektedir [16]. İnşaat gibi karmaşık ve tehlikeli sektörlerde, Teknoloji-Organizasyon-Çevre çerçevesi kullanılarak yapılan analizler, dijital teknolojilerin (BIM, IoT) en büyük katma değerinin uyumluluk değil, sahadaki kaynak tahsisi ve optimizasyonu ile iş güvenliği olduğunu, ancak eski sistemlere entegrasyondaki zorlukların dönüşümü yavaşlattığını ortaya koymuştur [22]. Organizasyonel düzeyde, YZ yatırımlarının rekabet avantajına dönüşmesi için KOBİ'lerin bu teknolojiyi bir IT aracı olarak değil, doğrudan iş modeli inovasyonuna dönüştürmeleri gerekmektedir [24].

3.5. Karar Destek Sistemleri ve Yapay Zekâ Entegrasyonu

Büyük Veri Analitiği Kapasitesi, teknoloji yönetimi ile kurumsal performans arasındaki en kritik köprüyü oluşturmaktadır [2]. Karar destek sistemleri, makine öğreniminin şeffaflaştırılmasıyla yeni bir boyut kazanmaktadır. Karmaşık makine öğrenimi modellerinin "kara kutu" doğası, stratejik kararlarda güven sorunlarına yol açmaktadır. Bu aşamada devreye giren "Açıklanabilir Yapay Zeka" (XAI), otonom kararların mantığını operatörlere şeffaf bir şekilde sunmaktadır [21]. [10], otel iptal tahminlerinde ML modellerinin "kara kutu" doğasının yöneticiler için kullanışsız olduğunu; Bayes ağları ile güçlendirilmiş Açıklanabilir YZ'nin (XAI) özellik etkileşimlerini şeffaflaştırarak stratejik aksiyon almayı mümkün kıldığını göstermiştir. Benzer şekilde, havacılık sektöründeki müşteri şikayetlerinde Metin Madenciliği (LDA ve Apriori algoritmaları) kullanılarak sorunların

birbirini nasıl tetiklediğini (domino etkisi kuralı) kanıtlanmış ve reaktif yönetimden proaktif yönetime geçiş sağlanmıştır [9]. Dijital pazarlamada, müşteri verilerinin ML algoritmalarıyla hiper-kişiselleştirme stratejilerine dönüştürülmesi pazarlama getirisini maksimize etmektedir [20]. Karar destek mekanizmalarında yaşanan en büyük sıçramalardan biri, Nörosifik AHP-TOPSIS gibi çok kriterli karar verme modellerinin kullanılmasıdır. [1], Sağlık 5.0 üzerine yaptıkları çalışmada, yöneticilerin teknoloji yatırımlarını donanım maliyetine göre değil, belirsizlik altında insan merkezilik ve dayanıklılık gibi sosyo-teknik faydalara göre optimize edebildiğini kanıtlamaktadır. Çin borsasındaki 26.596 şirket verisi üzerinde yapılan devasa ekonometrik analizler, YZ'deki iyileştirmelerin kurumsal sürdürülebilirlik performansını %18.9 oranında artırdığını, bu artışın Toplam Faktör Verimliliği ve "Bilgi Şeffaflığı" (Doğal Dil İşleme destekli) üzerinden gerçekleştiğini şüpheye yer bırakmayacak biçimde doğrulamaktadır [31].

IV. TARTIŞMA

4.1. Fırsatlar ve Avantajlar

Endüstri 5.0, teknoloji ile yönetişimin kesiştiği noktada eşsiz fırsatlar barındırmaktadır. Devlet destekli makro teşvikler, işletmelerin teknolojik sıçraması için en büyük katalizörü oluşturmaktadır. [11], Çin'deki "YZ Pilot Şehirleri" politikasının (Çifte Makine Öğrenimi analizi ile kanıtlandığı üzere) şirketlerin özümseme ve kaynak entegrasyon kapasitelerini artırarak tedarik zinciri dayanıklılığını doğrudan güçlendirdiğini ve krizlere karşı kalkan görevi gördüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca, platform ekosistemi orkestrasyonu, şirketlerin dış paydaşlarla çok modlu değer yaratımını hızlandırmaktadır. Mikro Makine Öğrenimi (TinyML) gibi teknolojiler, endüstriyel veri işleme süreçlerinde karbon ayak izini devasa oranda düşüren "yeşil bilişim" fırsatları sunmaktadır. Kurumsal Sosyal Sorumluluk Stratejilerinin, Paydaş İş birliği ve Güvenilir YZ ilkeleriyle eşzamanlı yürütülmesi; sadece üretkenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda yatırımcıların şirketlere olan güvenini pekiştirerek kurumsal sürdürülebilirliği maksimize etmektedir [28].

4.2. Riskler ve Zorluklar

Muazzam potansiyeline rağmen uygulamanın önünde ciddi engeller bulunmaktadır. [29], algoritmaların tüketicilerin seçim mimarisini manipüle ettiğini; gizlilik yasalarını aşmak için kullanılan sentetik veri ve izinsiz profillemeye için kullanılan atıl karanlık verinin marka güvenini yok edebileceği konusunda uyarılmaktadır. Ayrıca teknoloji, toplumun dezavantajlı

kesimlerinde dijital okuryazarlık eksikliği nedeniyle dijital uçurum riskini derinleştirmektedir [7]. [30], "Teknoloji Hazırlık Seviyesi (TRL) Paradoksu"na dikkat çekmektedir. Güvenilir YZ uygulamalarının halen TRL 3-4 (teorik doğrulama) seviyelerinde tıklandığını, fabrikalarda yaygın olarak devreye alınmaktan (TRL 9) çok uzak olduğunu ortaya koymaktadır. Şirketlerin hizmet odaklı ve insan merkezli söylemlerini operasyonel çeviklikle desteklememeleri, yatırımların birer halkla ilişkiler illüzyonunda kalmasına neden olma riskini taşımaktadır [12]. Kamu yönetiminde ise yerleşik bürokratik yapıların dijital entegrasyona direnç göstermesi, dönüşümün önündeki en büyük kültürel engellerden biridir [13].

4.3. Literatürdeki Boşluklar

Lojistik ve kalite kontrol gibi geleneksel operasyonel uygulamaların, "Adalet" (Fairness) ve "Hesap Verebilirlik" gibi etik TAI (Güvenilir YZ) ilkeleriyle entegrasyonu ile ilgili ampirik çalışmalarda halen büyük bir boşluk bulunmaktadır. Teknolojinin algoritmik verimliliği yoğun biçimde incelenirken, bu sistemlerin işyeri psikolojik güvenliğine etkisi ve gözetim baskısının çalışanlarının psikolojisine ve sosyal haklarına etkisi üzerine uzun vadeli sonuçları nicel olarak daha fazla test edilmelidir [23].

V. SONUÇLAR

5.1. Genel Değerlendirme

Veri odaklı inovasyon; bir yazılım veya donanım alımı değil, etik yönetişimi, esnek insan-makine iş birliğini, Yeşil İnsan Sermayesini ve kurumsal çevikliği gerektiren çok boyutlu bir sosyo-teknik ekosistemdir. Teknolojik determinizmin sınırlarına dayanan Endüstri 4.0'ın ardından, Endüstri 5.0 ile "bilişsel, sürdürülebilir ve güvenilir" yeni bir paradigma başlamıştır. YZ'nin kurumsal performansına olan tartışılmaz katkısı; ancak çalışanların yeniden eğitilmesi, bilgi şeffaflığının sağlanması ve iş modellerinin teknolojiyle uyumlu olarak yeniden yapılandırılması halinde tam potansiyeline ulaşabilmektedir.

5.2. Politika ve Yönetim Önerileri

Teknolojik dönüşümün yaygınlaşabilmesi için devletlerin çevik devlet modellerini benimsemesi ve dijital hükümet birimleri kurması elzemdir [13]. Yapay Zekâ pilot bölgeleri gibi doğrudan politika müdahalelerinin, işletmelerin kurumsal sürdürülebilirlik performanslarını sıçratarak artırdığı kanıtlanmıştır [31]. Pilot bölge ve teşvik politikalarının işletme dayanıklılığına olan doğrudan pozitif etkisi göz önüne alınarak [11],

inovasyon destekleri genişletilmelidir. Teknoloji yöneticileri ve politika yapıcılar; tasarımdan itibaren güvenlik ilkelerini yasalaştırmalı, MLOps (Makine Öğrenimi Operasyonları) süreçlerini entegre etmeli, algoritmik denetim mekanizmalarını kurmalı ve teknolojik altyapıyı yüksek katılımlı dijital İK pratikleriyle YZ Yönetişim çerçevesinde şeffaf bir şekilde planlamalıdır [23].

5.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Gelecek araştırmalar, İşbirlikçi Çeviklik boyutlarının ve Güvenilir YZ ilkelerinin zaman içindeki gelişimini ölçmek adına boylamsal çalışmalara odaklanmalıdır. KOBİ'ler başta olmak üzere inşaat, tarım, turizm ve geriatrik bakım gibi farklı sektörlerin dinamiklerini göz önünde bulunduran sektöre özgü stratejik yol haritaları geliştirilmeli ve yapay zekanın algoritmik adalet boyutu operasyonel uygulamalar üzerinden daha derinlemesine nicel testlere tabi tutulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] M. Abdel-Basset, R. Mohamed, and V. Chang, "A Multi-Criteria Decision-Making Framework to Evaluate the Impact of Industry 5.0 Technologies: Case Study, Lessons Learned, Challenges and Future Directions," *Information Systems Frontiers*, vol. 27, pp. 791–821, 2024.
- [2] Z. Adıgüzel, F. Sonmez Cakir, F. Pinarbasi, D. Guner Gultekin, and M. Yazici, "Examination of the effects of innovation development, technology management and big data analytics capability in information technology companies," *Journal of Advances in Management Research*, vol. 21, no. 5, pp. 689–710, 2024.
- [3] S. Adomako and N. P. Nguyen, "Digitalization, inter-organizational collaboration, and technology transfer," *The Journal of Technology Transfer*, vol. 49, pp. 1176–1202, 2024.
- [4] Z. Ahmed, J. H. H. Kakarla, A. Hazra, and M. Gurusamy, "Quantum machine learning for industry 5.0: Fundamental, applications and research challenges," *Computer Science Review*, vol. 61, paper 100976, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2026.100976>
- [5] F. A. Al-Alshare, E. Alsariera, B. K. Almagharbeh, M. I. A. Allahham, R. N. A. Al-Rawashdeh, and N. H. S. Alfawaerh, "The big data analytics to digital marketing path strengthened by knowledge management," *International Journal of Data and Network Science*, vol. 10, pp. 137–150, 2026.
- [6] B. Alojaiman, "Technological Modernizations in the Industry 5.0 Era: A Descriptive Analysis and Future Research Directions," *Processes*, vol. 11, no. 5, p. 1318, 2023.
- [7] A. Ashour and G. O. Elkhawaga, "Innovations in geriatric care: leveraging technology to meet the needs of an aging world, a narrative review," *Journal of the Egyptian Public Health Association*, vol. 101, no. 2, 2026.
- [8] H. E. Badwy, S. A. Qalati, and M. F. El-Bardan, "Revolutionizing sustainable success: unveiling the power of green human resource management, green innovation

- and green human capital," *Benchmarking: An International Journal*, vol. 33, no. 3, pp. 907–931, 2026.
- [9] H. Cai, T. Dong, P. Zhou, D. Li, and H. Li, "Leveraging text mining techniques for civil aviation service improvement: Research on key topics and association rules of passenger complaints," *Systems*, vol. 13, paper 325, 2025.
- [10] S. Chen, E. W. T. Ngai, Y. Ku, Z. Xu, X. Gou, and C. Zhang, "Prediction of hotel booking cancellations: Integration of machine learning and probability model based on interpretable feature interaction," *Decision Support Systems*, vol. 170, paper 113959, 2023.
- [11] G. Cheng and H. Zhang, "The impact of china's artificial intelligence pilot policies on enterprise supply chain resilience," *Scientific Reports*, vol. 16, paper 5382, 2026.
- [12] N. Dacre, C. A. dos Santos, T. S. Martins, and H. Dong, "Industry 5.0 Imperatives and Project-Based Manufacturing: Collaborative Agility as a Translational Capability," *Project Management Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 260–276, 2026.
- [13] S. Demirkıran, "Avrupa Birliği'nde Kamu Yönetiminin Dijital Dönüşümü: Avrupa Bütünleşmesi Sürecinde Teknoloji ve Yenilik Yönetiminin Rolü ve Gelecek Vizyonları," *Ankara Avrupa Çalışmaları Dergisi*, vol. 24, no. 1, pp. 1–32, 2025.
- [14] F. Gama and S. Magistretti, "Artificial intelligence in innovation management: A review of innovation capabilities and a taxonomy of AI applications," *Journal of Product Innovation Management*, vol. 42, no. 1, pp. 76–111, 2025.
- [15] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, B. Foroughi, A. Rejeb, D. Nikbin, and M.-L. Tseng, "A practical guide on strategic roadmapping for information and operations technology management: a case study on industry 5.0 transformation," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 41, no. 5, pp. 397–421, 2024.
- [16] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M.-L. Tseng, A. Grybauskas, A. Stefanini, and A. Amran, "Behind the definition of Industry 5.0: a systematic review of technologies, principles, components, and values," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 40, no. 6, pp. 432–447, 2023.
- [17] E. Khajeh and Z. Mohammadnazari, Eds., *Smart and Sustainable Gig Economy in the Industrial 5.0 Era: Engineering and Management Aspects*. CRC Press / Taylor & Francis Group, 2026.
- [18] T. Monti, F. Montagna, G. Cascini, and M. Cantamessa, "Data-driven innovation: challenges and insights of engineering design," *Design Science*, vol. 11, paper e26, 2025.
- [19] R. Munawarah, M. R. P. B. Hutapea, S. M. Medina, Khuzaini, and S. Shaddiq, "Information Technology–Based Human Resource Management as a Strategic Response to Industry 4.0 and Society 5.0," *JPIM: Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisipliner*, vol. 3, no. 1, pp. 254–265, 2025.
- [20] I. J. Na and I. H. Park, "Personalized Digital Marketing Strategies: A Data-Driven Approach Using Marketing Analytics," *Journal of Management Information*, vol. 4, no. 4, pp. 668–686, 2025.
- [21] B. Priya, V. Sharma, and R. Sharma, "Industry 5.0 and Artificial Intelligence: A Match Made in Technology Heaven? Unleashing the Potential of Artificial Intelligence in Industry 5.0," in *Distributed Time-Sensitive Systems*. Scrivener Publishing LLC, 2025, pp. 153–202.
- [22] S. Qadir, A. M. Alawag, A. O. Baarimah, N. Zia, M. Alajmi, H. R. Almujiabah, and H. Alyami, "The role of digital technologies in enhancing construction project management," *Scientific Reports*, vol. 16, paper 1486, 2026.

- [23] K. Raina, G. D. Sharma, B. Taheri, D. Dev, and S. Chavriya, "Artificial intelligence-driven management: Bridging innovation, knowledge creation, and sustainable business practices," *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 11, paper 100860, 2026.
- [24] S. Shao, Z. Shao, and Y. Xiong, "The influence of AI capability on enterprise competitive advantage: the mediating effect of business model innovation," *Journal of Enterprise Information Management*, 2026.
- [25] S. Shaukat, M. U. Nisa, F. E. Alessi Longa, S. K. H. Sherazi, and S. A. Ali, "Organizational Culture and Human Resource Practices under Industry 5.0 across the Asia-Pacific Region," *Journal of Management Science Research Review*, vol. 5, no. 1, pp. 527–556, 2026.
- [26] A. Shrestha and S. K. KC, "Ambidextrous management strategies in the tourism industry: a systematic literature review," *Journal of Hospitality and Tourism Insights*, vol. 9, no. 11, pp. 20–37, 2026.
- [27] T. Singh, D. Singh, C. D. Singh, and K. Singh, "Industry 5.0," in *Factories of the Future*. Wiley, 2023, pp. 21–43.
- [28] M. Terziyska, I. Ilieva, Z. Terziyski, and N. Komitov, "A Review of the Transition from Industry 4.0 to Industry 5.0: Unlocking the Potential of TinyML in Industrial IoT Systems," *Sci*, vol. 8, no. 1, paper 10, 2026.
- [29] L. Theodorakopoulos, A. Theodoropoulou, and C. Klavdianos, "Big data analytics and AI for consumer behavior in digital marketing," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 10, paper 46, 2026.
- [30] E. Vyhmeister and G. G. Castane, "When industry meets Trustworthy AI: a systematic review of AI for Industry 5.0," *AI and Ethics*, vol. 6, paper 200, 2026.
- [31] Q. Wang, Y. Qi, and R. Li, "Artificial Intelligence and Corporate Sustainability: Shaping the Future of ESG in the Age of Industry 5.0," *Sustainable Development*, vol. 34, pp. 1–26, 2026.
- [32] C. M. Witt, J. An, and M. Christen, "AI, digital twins, and healthcare utilization behaviour: evidence from a Swiss population survey," *BMC Health Services Research*, vol. 26, no. 1, 2026.
- [33] G. Xie, Y. Qian, and S. Wang, "Forecasting Chinese cruise tourism demand with big data: An optimized machine learning approach," *Tourism Management*, vol. 82, paper 104208, 2021.

