

FEN VE MÜHENDİSLİKTE YENİ YAKLAŞIMLAR-2025

Editörler:

Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI & Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

ARTİKEL AKADEMİ:406

Fen ve Mühendislikte Yeni Yaklaşımlar-2025

Editörler:

Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI & Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

ISBN 978-625-5674-46-3

Birinci Basım: Aralık- 2025

Ofset Hazırlık: Artikel Akademi

Baskı ve Cilt: Uzunist Dijital Matbaa Anonim Şirketi
Akçaburgaz Mah.1584.Sk.No:21 / Esenyurt

Matbaa Sertifika No: 68922

Artikel Akademi bir Karadeniz Kitap Ltd. Şti. markasıdır.

©Karadeniz Kitap - 2025

Akademik etik kurallara
bağlı kalınarak yapılacak olan alıntılar ve tanıtım maksadıyla yapılacak
olan kısa alıntılar dışında, yazılı izni alınmadan, tümünün veya bir
kısımının elektronik, mekanik ya da fotokopi yoluyla, basımı, yayımı,
kopyalanması, çoğaltımı veya dağıtımı yapılamaz.

KARADENİZ KİTAP LTD. ŞTİ.

Koşuyolu Mah. Mehmet Akfan Sok. No:67/3 Kadıköy-İstanbul

Tel: 0 216 428 06 54 // 0530 076 94 90

Yayıncı Sertifika No: 19708

mail: info@artikelakademi.com

www.artikelakademi.com

FEN VE MÜHENDİSLİKTE YENİ YAKLAŞIMLAR-2025

Editörler:

Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI & Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

YAZARLAR

Alev ER

Ali ŞENOL

Aysel ERSOY

Ayşen E. ÖZEL

Cengiz Polat UZUNOĞLU

Elif IŞIKÇI KOCA

Emrullah AY

Ertuğrul ADIGÜZEL

İnci OKUMUŞ

Mert DİNÇ

Gökhan ÇAYLI

Sefa ÇELİK

Serkan ÖZDEMİR

Sevim AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	7
1. BÖLÜM	
NATUREL ve MODİFİYE KAÜÇUKLARIN UYGULAMALARI	9
Mert DİNÇ & Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI	
2. BÖLÜM	
AKILLI SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA TERFİ MERKEZLERİNDE YÖNTEM VE UYGULAMALAR: İSKİ KÂĞITHANE ESKİ TERFİ MERKEZİ ÖRNEĞİ	39
Emrullah AY & Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU	
3. BÖLÜM	
BOR KATKILI POLYESTER YALITKANLARDA YÜZEY ÖZELLİKLERİ, HİDROFOBİKLİK VE DEGRADASYON MEKANİZMALARI	51
Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ADIGÜZEL & Prof. Dr. Aysel ERSOY	
4. BÖLÜM	
MOBİL ROBOTLARDA KONUM KONTROLÜ VE SİMÜLASYONU.....	75
Gülnaz YÜKSEL & Doç. Dr. Rana ORTAÇ KABAOĞLU	
5. BÖLÜM	
NESTED LEARNING İLE SÜREKLİ ÖĞRENME: CATASTROPHIC FORGETTING'I SIFIRA İNDİREN YAKLAŞIM – FASHION-MNIST ÜZERİNDE DENEYSEL BİR İNCELEME.....	95
Doç.Dr. Abdurrahim AKGÜNDÖĞDU	
6. BÖLÜM	
DOĞAL KAYNAKLI BİR BİLEŞİĞİN ANTİKANSER ETKİNLİĞİNİN İN SİLİCO YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ	111
Doç. Dr. Alev ER & Prof. Dr. Sefa ÇELİK Prof. Dr. Ayşen E. ÖZEL & Prof. Dr. Sevim AKYÜZ	

7. BÖLÜM

BAKTERİYEL PROTEİN HEDEFLERİ İLE ANTİBAKTERİYEL BİR
BİLEŞİĞİN MOLEKÜLER KENETLENME ANALİZİ.....123

Doç. Dr. Alev ER & Prof. Dr. Sefa ÇELİK

8. BÖLÜM

ANTİVİRAL MOLEKÜLÜN ETKİ MEKANİZMASININ İN SİLİCO
HESAPLAMALARI..... 131

Prof. Dr. Sefa CELİK & Prof. Dr. Ayşen E. ÖZEL

9. BÖLÜM

ÇOK YÖNLÜ BİR BİYOPOLİMER OLARAK ALJİNATIN MALZEME BİLİMİ
VE UYGULAMALARDAKİ ROLÜ 137

Asst. Prof. Dr. Elif IŞIKÇI KOCA

10. BÖLÜM

GİYİLEBİLİR SAĞLIK TEKNOLOJİLERİNDE POLİMER BİLİMİNİN
GELECEĞİ 161

Asst. Prof. Dr. Elif IŞIKÇI KOCA

11. BÖLÜM

TiO₂ NANO KATKILI İZOLATÖR YÜZEYİNİN DEŞARJ DAVRANIŞININ IPT
TESTİ İLE İNCELENMESİ 191

Arş. Gör. Dr. Fatih ATALAR & Prof. Dr. Aysel ERSOY

12. BÖLÜM

DİFERANSİYEL DENKLEMLER VE YAPAY ZEKA: KLASİK
YÖNTEMLERDEN MODERN UYGULAMALARA..... 213

Dr. Öğretim Üyesi İnci OKUMUŞ

13. BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ALTINDA ORİGANUM MİNUTİFLORUM’UN ISPARTA
YÖRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ MODELLENMESİ 233

Dr. Öğr. Üyesi Ali ŞENOL & Doç. Dr. Serkan ÖZDEMİR

ÖNSÖZ

Bu kitap, geniş bir yelpazedeki bilimsel ve mühendislik disiplinlerinde ortaya çıkan eğilimleri ve alışılmadık çözümleri yansıtan çağdaş bakış açılarını bir araya getiriyor. Bölümler yeni kavramsal çerçeveler sunan ve geleneksel olarak ayrı alanlar arasındaki boşlukları kapatan dönüştürücü yaklaşımları vurguluyor.

Bu ciltteki katkılar, disiplinlerarası yaklaşımın artan önemini vurguluyor. Malzeme bilimindeki gelişmeler kimya ve fizik tarafından şekillendiriliyor; mühendislik çözümleri giderek veri bilimi ve yapay zekaya dayanıyor ve sürdürülebilir teknolojiler, çevresel, ekonomik ve sosyal faktörlerin bütünsel bir anlayışını gerektiriyor. Çeşitli ancak birbirine bağlı çalışmaları sunarak, bu kitap, alanlarının geleceğini yönlendirmek ve şekillendirmek isteyen araştırmacılar, mühendisler ve uygulayıcılar arasında diyalogu teşvik etmeyi amaçlıyor.

Fen ve Mühendislikte Yeni Yaklaşımlar-2025, ileriye dönük araştırmalar ve yenilikçi uygulamalarla ilgilenen öğrenciler, araştırmacılar ve profesyoneller için tasarlanmıştır. Bu kitabın sadece bilgilendirmekle kalmayıp, okuyucuları mevcut sınırları sorgulamaya, yeni yönler keşfetmeye ve gelişen bilimsel ve mühendislik bilgi birikimine katkıda bulunmaya teşvik etmesini umuyoruz.

Editörler:

Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI

Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

1. BÖLÜM

NATUREL ve MODİFİYE KAUÇUKLARIN UYGULAMALARI

Mert DİNÇ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Mühendislik Bilimleri Bölümü

<https://orcid.org/0000-0003-2411-5534>

Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Mühendislik Bilimleri Bölümü

<https://orcid.org/0000-0002-3395-5642>

1. GİRİŞ

Doğal kauçuk, izopren moleküllerinin bir polimeridir; kauçuk, farklı familyalara ait birçok bitki tarafından lateks formunda üretilmesine rağmen, ticari olarak dünya çapında kauçuk üretimi için yalnızca tek bir bitki olan kauçuk ağacı işletilmektedir, çünkü bu ağaç lateksi büyük miktarlarda üretme yeteneğine sahiptir. Kauçuk lateksi, pıhtılaşma yeteneği sayesinde ağacı böcek zararlılarına karşı korur (Sharples, 1918). Kauçuk lateksi yapışkandır ve bitkinin odun yapısına zarar veren böceklerin ağız kısımlarını yapıştırır, ayrıca zararlıların veya patojenlerin daha fazla zarar vermesini önlemek için yaprak ve kabuktaki yaraları kapatır.

Kauçuk ağacı (*Hevea brasiliensis*, familya-Euphorbiaceae), Brezilya, Venezuela, Peru ve Bolivya'yı içeren Amazon yağmur ormanlarına özgüdür. Yaklaşık 40 m yüksekliğe kadar büyür ve kabuğunda lateks damarları bulunur. Olgun bir ağacın kabuğu kesildiğinde, ticari amaçlar için toplanan süt beyazı bir kauçuk lateksi dışarı sızar. *Hevea brasiliensis*'te, lateks hacminin yaklaşık üçte biri kauçuktan oluşur (Tang ve ark., 2016).

Kullanılabilir formda kauçuk elde etmek için yıllarca süren sürekli deneylerden sonra, Philadelphia'lı bir tüccar olan Charles Goodyear (1800-1860), 1839'da kükürt ile 120-140 °C'de ısıtmanın kauçuğu sıcaklığa ve soğukluğa karşı dirençli hale getirdiğini, esnekliğini, su geçirmezlik yeteneğini ve birçok organik çözücüye, elektriğe ve oksidasyona karşı direncini artırdığını tesadüfen keşfetti. Vulkanizasyon olarak adlandırılan bu işlem, kauçuk moleküllerinin kükürt atomlarıyla çapraz bağlanmasını sağlayarak kauçuğun endüstriyel kalitesini artırdı (Somma, 2014).

2500'den fazla bitki türü doğal kauçuk (DK) üretir (Metcalf, 1967; Bowers, 1990). Ancak, sadece küçük bir alt küme ekonomik olarak uygun, yüksek kaliteli kauçuğun önemli miktarlarını üretir (van Beilen ve Poirier, 2007a, b; Mooibroek ve Cornish, 2000).

DK (cis-1,4-poliizopren), ulaşım, tıp ve savunma gibi endüstriler için hayati öneme sahip, kritik, yeri doldurulamaz bir yüksek molekül ağırlıklı biyopolimerdir. Yüksek elastikiyet, esneklik, darbe ve aşınma direnci, verimli ısı dağılımı ve soğuk sıcaklıklarda şekillendirilebilirlik gibi kendine özgü fiziksel özellikleri, DK'yı birçok farklı kauçuk ve lateks ürününün imalatında önemli bir hammadde yapmaktadır. Bununla birlikte, tohumluk anaçlar üzerine klonal, aşılınmış aşı kalemi olarak tropikal plantasyonlarda yetiştirilen para kauçuk ağacı (*Hevea brasiliensis* Müll, Arg.), ticari olarak üretilen DK'nın tek kaynağıdır (Cornish, 2017).

Sürekli artan endüstriyel DK talebi, *H. brasiliensis* kauçuk üretim sisteminin güvenilirliği (hassasiyeti), mevcut ormansızlaşma moratoryumu ve *H. brasiliensis* lateks ve kauçuk ürünlerinde bulunan proteinlere karşı şiddetli alerjik reaksiyonlar, araştırmacıları ılıman bölgelerde makineleşmiş tarıma uygun alternatif kauçuk ürünlerini evcilleştirmeye ve geliştirmeye teşvik etmiştir (van Beilen ve Poirier, 2007a, b; Cornish, 2001a, 2017; Cornish ve ark., 2015; Schmidt ve ark., 2010 a, b).

Doğal kauçuk, son derece değerli ve stratejik açıdan önemli bir biyomalzemedir; diğer biyopolimerlerin çoğunun aksine, birçok uygulamasında sentetik malzemelerle değiştirilemez. Örneğin, kamyonlar, otobüsler ve uçaklar için ağır hizmet tipi lastikler ve tıp mesleği için birçok lateks ürün, tamamen sentetik kauçuktan yapılamaz veya sadece önemli ölçüde daha yüksek bir maliyetle yapılabilir.

Doğal kauçuğun yaklaşık %10'u, eldiven, prezervatif, kateter ve diğer tıbbi ürünlerin üretimi için lateks olarak kullanılır. Özellikle ABD'de, aynı zamanda Avrupa ve Japonya'da da, *Hevea* kauçuğundaki proteinlere alerjisi olan insan

sayısı artmaktadır. Bu nedenle, doğal kauçuk üretimi için alternatif ürünler sadece arz güvenliğini sağlamaya yardımcı olmakla kalmayacak, aynı zamanda hipoalerjenik kauçuk kaynağı da sağlayabilecektir.

Tüm bu nedenlerden dolayı, ithal doğal kauçuğa bağımlı ülkelerde, büyük ölçekli alternatif (yerel) doğal kauçuk üretimi geliştirmeye ilgi duyulmaktadır (Mooibroek ve Cornish, 2000). Bu durum geçmişte çeşitli zamanlarda fark edilmiş, birçok bitkinin incelendiği araştırma ve geliştirme programlarına yol açmıştır.

Latekslerinde doğal kauçuk üreten sekiz botanik familya, 300 cins ve 1.800 tür tanımlanmıştır, ancak bunlardan sadece birkaçı yüksek molekül ağırlıklı kauçuğu büyük miktarlarda üretmesiyle bilinmektedir (Bushman ve ark., 2006).

Şu anda, bir dizi köklü ve yeni kurulmuş şirket, aşağıdakiler de dahil olmak üzere alternatif kauçuk ürünleri ve mahsulleri ile ilgilenmekte veya son zamanlarda ilgilenmiştir: *P. argentatum* için: Apollo, Bridgestone, Cooper, EnergyEne, Ford, Goodyear, Nokian, PanAridus ve Guayule Australia; *T. kok-saghyz* için: American Sustainable Rubber, Bridgestone, Continental, Ford, Goodyear, KeyGene, Kultivat, Ling-long, NovaBioRubber ve Sumitomo, ve şüphesiz başkaları da vardır (Cherian, 2019). Kauçuk üreten birçok tür arasında, *Parthenium argentatum* (Gray; guayule) ve *Taraxacum kok-saghyz* (Rodin; TK, kauçuk karahindiba, Rus/Sibirya/Kazak karahindibası) son yıllarda potansiyel olarak ticari açıdan uygun kauçuk mahsulleri olarak artan ilgi görmektedir (Arias ve ark., 2016; van Beilen ve Poirier, 2007a,b; Benedict ve ark., 2008; Buranov ve Elmuradov, 2010; Mooibroek ve Cornish, 2000).

Parthenium argentatum, Meksika ve Teksas'ın Chihuahuan çölüne özgü, çok yıllık bir çalıdır (Benedict ve ark., 2008; Coffelt ve Ray, 2010). *P. argentatum* DK'sı yüksek molekül ağırlığına sahiptir ve *H. brasiliensis* kauçuğuna benzer şekilde kullanılabilir, ancak karşılaştırılabilir gücü daha fazla yumuşaklık ve esneklikle birleştirir ve *H. brasiliensis* lateksinde insanlarda ciddi alerjik reaksiyonlara neden olabilen proteinleri içermez (Cornish, 1996; Hamilton ve Cornish, 2010; Siler ve ark., 1996).

Lateksin laticifer'lerinde kauçuk parçacıkları üreten *H. brasiliensis* ve *T. kok-saghyz*'ın aksine, *P. argentatum* kauçuk parçacıkları kabuk parankima hücrelerinde bulunur ve lateks üretmek için mekanik ekstraksiyon ya da kauçuk üretmek için çözücü ekstraksiyonu gerektirir (Cornish ve Schloman, 2004). *P. argentatum*'un ana pazarlarda ticari olarak rekabetçi olabilmesi için DK verimi ve genel üretim sisteminin iyileştirilmesi gerekmektedir (Eranki ve ark., 2017; Soratana ve ark., 2017).

Taraxacum kok-saghyz, Kazakistan ve Özbekistan'a özgü otsu bir bitkidir ve kauçuğu, kalite açısından *H. brasiliensis* kauçuğuna çok benzerdir (Cornish ve ark., 2015). Fide aktarımı veya doğrudan tohum ekimi yoluyla kurulabilir, yıllık bir mahsul olarak yetiştirilebilir ve ılıman bölgelere geniş ölçüde adapte olmuştur (Luo ve ark., 2017; McAssey ve ark., 2016; Ramirez-Cadavid ve ark., 2017; Whaley ve Bowen, 1947). Ancak, *T. kok-saghyz* büyük ölçüde evcilleştirilmiştir ve çimlenme sırasında sabit nem içeriğine ihtiyaç duyması, yavaş büyüme hızı, yabancı otlarla rekabette zayıflığı, anlamlı kauçuk veriminin ancak olgunlukta ölçülebilir olması, yüksek düzeyde heterozigotluk ve kendine uyumsuzluk gibi bazı doğal sorunları vardır (Hodgson-Kratky ve Wolyn, 2015; Warmke, 1943).

Doğal kauçuğun küresel tüketimi istikrarlı bir şekilde artmaktadır ve talebi karşılamak için üretim de artırılmıştır. Hevea ıslahının temel amacı, yüksek başlangıç canlılığı, iyi lateks damar sistemine sahip pürüzsüz ve kalın kabuk, iyi kabuk yenilenmesi, lateks hasadı başladıktan sonra yüksek büyüme hızı, ana hastalıklara ve rüzgâra karşı tolerans gibi arzu edilen ikincil özelliklerle birleştirilmiş yüksek kauçuk verimine sahip potansiyel klonlar geliştirmektir (Annamma ve ark., 1990). Son zamanlarda, kuraklık, yüksek sıcaklık, soğuk vb. gibi abiyotik streslere toleranslı klonlar geliştirmeye de önem verilmektedir (Thulaseedharan ve ark., 2000). Erken vurum (tapping) çevresine ulaşan ve sonraki aşamada daha yüksek verime sahip klonlara kıyasla yüksek başlangıç verimine sahip klonlar tercih edilmektedir (Lim ve ark., 1973). İş gücünün ucuz olduğu ve küçük holding sektörünün baskın olduğu ülkelerde, yüksek vurum yoğunluklarına dayanabilen klonlar tercih edilmektedir. Yüksek kauçuk veriminin yanı sıra, üstün teknolojik kauçuk özellikleri, kereste ve kalitesi (lateks-kereste klonları) ve düşük vurum paneli kuruluğu (TPD) insidansı da başlıca ıslah hedefleridir (Venkatachalam ve ark., 2007, 2009). TPD, kauçuk ağacında lateks verimini engelleyen temel sorundur ve yakın zamanda, TPD'nin başlangıcıyla ilişkili birkaç gen rapor edilmiştir.

Parthenium argentatum, biyomedikal uygulamalar için doğal kauçuğun alternatif bir kaynağıdır. Guayule'de olgun gövde kabuğu yüksek kauçuk içeriği ve kauçuk üretme potansiyeli içerirken, daha genç gövde düşük kauçuk içeriği ve daha düşük kauçuk üretme potansiyeli içerir. Şu anda, *P. argentatum* doğal kauçuğun alternatif kaynağı olarak kullanılmaktadır çünkü DNA barkod analizi için çok az miktarda gerekmektedir ve ayrıca ıslah hatlarının saflığı da fide büyümesinin erken aşamasında belirlenmektedir.

Barkodlar, tohum üreticilerine ve ıslahçılara, lateks üretimi için ileri ıslah hatlarından önce tohum partisi kontaminasyonunu keşfetme imkanı sunacaktır.

Özellikle düşük kauçuk içeriğine sahip hatları temsil ettiklerinde, kirlетici hatları çıkarma yeteneğine sahip olması, ıslah çabalarının etkinliğini artıracaktır.

Asteraceae familyasındaki çeşitli cinsler, *Lactuca sativa* ve *Taraxacum kok-saghyz* dahil olmak üzere sitozolde yüksek molekül ağırlıklı kauçuk üretir ve bu, çalışmalarımızın ilgi odağındaki türlerdir. *P. argentatum*, biyomedikal uygulamalar için ticari açıdan önemli doğal kauçuk lateks hatlarının genetik tanımlanmasının temelini oluşturan DNA barkodlama çalışmasıyla belirlenmiştir (Kumar ve ark., 2009).

2. DOĞAL KAUÇUĞUN BİYOSENTEZİ

Kauçuk oluşumunun temel mekanizması bitki türleri arasında korunmuştur, ancak doku lokalizasyonu, kauçuk sentezinin düzenlenmesi ve üretilen kauçuk molekül ağırlığı ile bileşiminde türe özgü farklılıklar mevcuttur (Cornish ve ark., 2000, Cornish, 2001a, b). Nonallilik IPP'nin ve allilik pirofosfatların (APP'ler) sentezi de yaygındır (Chen ve ark., 2011). Biyokimyasal çalışmalar, kauçuk biyosentezinin bir divalent katyon kofaktörü (in vivo magnezyum, ancak in vitro manganez de işe yarar) ve entegre veya bağlı zar lokalizasyonu gerektirdiğini göstermiştir (Cornish, 2001a, b). Genel olarak, DK biyosentezi için iki mekanizma önerilmiştir: (i) Bir karbokatyonik reaksiyon yoluyla (Puskas ve ark., 2006), kısa zincirli allilik pirofosfatlar üzerine astar substratlar olarak IPP'nin ardışık cis-1,4-kondenzasyonu yoluyla DK'nın de novo oluşumu ve (ii) Kısmen polimerize olmuş kauçuk moleküllerinin veya poliprenil pirofosfatların alfa-ucuna IPP eklenmesi (Cornish, 2001a,b) Uzatılmakta olan bir kauçuk molekülünün aktif ucunun bir APP kısmı olduğu unutulmamalıdır.

3. KAUÇUK PARÇACIĞI MİMARİSİ

DK'nın biyosentezi, ister *H. brasiliensis* kabuğunda ve *T. kok-saghyz* köklerinde olduğu gibi özelleşmiş lateks damarları (laticifer'ler) olsun, ister *P. argentatum*'daki gibi adapte olmuş kabuk parankima hücreleri olsun, hücrelerin sitozolünde üretilen kauçuk parçacıklarının yüzeyinde gerçekleşir. Kauçuk, bitkinin ömrü boyunca katabolize edilemeyen bir son ürün olarak kauçuk parçacığının içinde bölümlere ayrılır (Cornish, 2001a, b; Schmidt ve ark., 2010b). Kauçuk parçacığının lipit-protein yüzey zarını tanımlamak için üç model önerilmiştir: (i) Tüm kauçuk parçacıklarının, proteinler ve lipitlerden oluşan, bitişik, tek tabakalı bir biyozarla çevrili homojen bir kauçuk çekirdeğinden oluştuğu genel bir model (Cornish, 2001a,b; Cornish ve ark., 1999). Burada, hidrofilik amino asitler, glikosillenmiş kısımlar ve polar lipit baş grupları sulu

sitozol ile etkileşime girerken, hidrofobik protein bölgeleri ve lipid zincirleri tek tabakalı zarın iç kısmını oluşturur ve hidrofobik kauçuk polimerleri ile uyumludur. Kabuk arayüz modeli, temel olarak bu genel modelle aynıdır (Rochette ve ark., 2013); (ii) Genel modele benzer, ancak zarın kauçuk polimeri yamalarını içerdiği karışık tek tabaka (yamaçlı) modeli (Berthelot ve ark., 2014); ve (iii) Sürekli bir yağ asidi tek tabakasının lipid zincirlerinin kauçuk çekirdek ile etkileşime girdiği, polar baş gruplarının amfilik proteinlerle etkileşime girdiği ve bu proteinlerin hidrofilik bölgelerinin sitozol ile etkileşime girdiği *H. brasiliensis*'e özgü protein filmi modeli (Wadeesirisak ve ark., 2017). Bu model, yüksek protein içeriğine sahip parçacıklar için doğru olabilir, ancak bitişik bir katman oluşturacak yeterli protein bulunmaması nedeniyle *P. argentatum*'a uygulanamaz (Siler ve ark., 1997).

4. KAÜÇUK BİLEŞİK OLUŞTURMA (COMPOUNDİNG)

“Elastik polimer” teriminden türetilen ve genellikle “kauçuk” ile birbirinin yerine kullanılan bir terim olan elastomerler, yüksek esneklik, esneklik, tokluk ve dayanıklılık ile karakterize edilen malzemelerdir. Bunlar, zayıf kuvvetlerle tutulan uzun polimer zincirlerinden oluşur, bu da onların gerilmesine ve orijinal şekillerine geri dönmesine olanak tanır. Doğal kauçuk, silikon ve neopren gibi bu malzemeler düşük bir camsı geçiş sıcaklığına sahiptir ve imalat, sağlık hizmetleri ve BT gibi endüstrilerde ekonomik olarak hayati öneme sahiptir.

Başlıca *Hevea brasiliensis* bitkisinden elde edilen doğal kauçuk, özellikle otomobil lastikleri için—hafifçe çapraz bağlı yapısından kaynaklanan mükemmel aşınma direnci ve yüksek çekme mukavemeti nedeniyle değerli olan—önemli bir endüstriyel polimer olmaya devam etmektedir. (Omar ve ark., 2025).

Ham elastomerlerin özelliklerini geliştirmek için, bu malzemeler çeşitli bileşik oluşturunca bileşenlerle karıştırılır ve vulkanizasyon işleminden geçirilir. Bu kimyasal süreç, polimer zincirleri arasında güçlü çapraz bağlar oluşturmak amacıyla en yaygın olarak kükürt gibi vulkanize edici ajanları kullanır. Bu dönüşüm, kauçuğu dayanıklı, ısıya, kimyasallara ve mekanik strese karşı dirençli hale getirerek lastikler, contalar ve hortumlar gibi ürünler için uygun olmasını sağlar. Tiyazoller, tiuramlar veya guanidinler gibi hızlandırıcılar, vulkanizasyon reaksiyonunun hızını artırmak için eklenir ve malzemenin nihai mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını iyileştirir. Aktivasyon ajanları, dolgu maddeleri ve antioksidanlar gibi diğer bileşenler de istenen performans özelliklerini elde etmek için belirli oranlarda karışıma dahil edilir. (Omar ve ark., 2025).

Aktivasyon ajanları (aktivatörler), vulkanizasyon sırasında hızlandırıcıların

etkinliğini artıran temel bileşik oluşturma bileşenleridir. En yaygın kullanılan ikili, inorganik aktivasyon ajanı olan çinko oksit (ZnO) ve organik aktivasyon ajanı olan stearik asittir. Bunlar birlikte, kürlenme hızını önemli ölçüde artıran ve kauçuğun son özelliklerini iyileştiren çinko bazlı kompleksler oluşturur. Ancak, geleneksel bileşik oluşturmada kullanılan yüksek miktardaki ZnO , çevresel endişeler yaratmaktadır. Araştırmalar, MgO gibi alternatifleri incelemiştir ve ikili bir aktivasyon ajanı sisteminin MgO 'e ZnO oranı 3:2 çinko içeriğini en aza indirirken, aynı zamanda kompozitin vulkanizasyon hızını, mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini iyileştirebileceğini bulmuştur. (Omar ve ark., 2025).

Dolgu maddeleri, kompoziti güçlendirmek ve mekanik, termal ve işlenme özelliklerini iyileştirmek için kauçuğa eklenir. Bunlar, çekme mukavemetini, sertliği, modül ve aşınma direncini artırır. Bir dolgu maddesinin etkinliği, parçacık boyutuyla ters orantılıdır; daha ince parçacıklar daha iyi takviye sağlar. Ancak, bu daha ince parçacıkların işlenmesi daha zordur ve uygun dağılımı sağlamak için daha yüksek enerji tüketimi gerektirir.

Dolgu maddeleri genel olarak organik (pirinç kabuğu veya kenaf gibi doğal liflerden elde edilen, yüksek elektriksel direnç sunan) ve inorganik (karbon veya cam elyafı gibi sentetik malzemeler, takviyeyi iyileştirmek için kimyasal modifikasyon gerektirebilir) olarak sınıflandırılır. (Omar ve ark., 2025).

Doğal kauçuk, saf haliyle genellikle yumuşak ve yapışkan olduğu için, elastomer ürünlerinde kullanılmadan önce katkı maddeleriyle bileşik oluşturulması (compounding) gereklidir. İşte bu noktada vulkanizasyon süreci zorunlu hale gelir. Vulkanizasyon, polimer zincirleri arasında “köprüler” (çapraz bağlar) oluşturan ve kauçuğun yapısını güçlendiren kimyasal bir süreçtir. Bu işlem, ham kauçuğun çekme mukavemeti, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerini önemli ölçüde iyileştirerek onu dayanıklı bir malzemeye dönüştürür.

Vulkanizasyonun kinetiği ve ortaya çıkan mekanik özellikler, birkaç kritik faktörden etkilenir. Kürleşme sıcaklığı, oluşan sülfürlü bağların türünü belirler; yüksek sıcaklıklar daha kısa (mono- ve di-sülfürlü) bağları teşvik ederken, düşük sıcaklıklar daha az stabil, daha uzun (poli-sülfürlü) bağları destekler. Kürleşme süresi, çapraz bağ yoğunluğu için optimize edilmelidir; yetersiz süre (eksik kürleşme) zayıf özelliklere yol açarken, aşırı süre (fazla kürleşme) malzemenin bozulmasına neden olabilir. Benzer şekilde, kürleşme basıncı yapısal bütünlük için hayati öneme sahiptir; çok düşük basınç zayıf yapışmaya neden olurken, çok yüksek basınç deformasyona neden olabilir.

Kimyasal açıdan, en belirleyici faktörlerden biri kükürt/hızlandırıcı oranı-

dır. Bu oran kürleşme sistemini tanımlar:

- Geleneksel (CV) Sistem: Düşük kükürt/hızlandırıcı oranı. Yüksek oranda poli-sülfürlü bağlar oluşturur. Sonuç: Yüksek mekanik mukavemet ve esneklik, ancak düşük ısı direnci.
- Verimli (EV) Sistem: Yüksek kükürt/hızlandırıcı oranı. Başta mono- ve di-sülfürlü bağlar oluşturur. Sonuç: Yüksek ısı direnci ve modül, ancak daha düşük mekanik mukavemet ve esneklik.
- Yarı-EV (Semi-EV) Sistem: İki sistem arasında dengeli bir profil sunar.

Kauçuk Bazlı Sürdürülebilir Tekstiller ve Potansiyel Endüstriyel Uygulamaları

Adak ve arkadaşlarının yaptığı derlemede (Adak ve ark. 2025), sürdürülebilir tekstil imalatının ve kauçuk endüstrilerinin kesişim noktasında bulunan kauçuk bazlı sürdürülebilir tekstil malzemeleri ve bunların potansiyel endüstriyel uygulamaları ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Çevresel kaygılar ve karbon ayak izini düşürme gerekliliği neticesinde, her iki sektörde de çevre dostu uygulamalara doğru bir geçişin gözlemlendiği belirtilmiştir.

Sürdürülebilir malzeme seçimine yönelik yaklaşımlar, endüstriyel kullanıma uygun eco-friendly lifler ve elastomer kaynakları ekseninde toplanmıştır. Keten, jüt ve kenevir gibi doğal liflerin, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve gelişmiş mekanik özellikler sunmaları nedeniyle tercih edildikleri aktarılmıştır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş polyester (RPET) gibi geri dönüştürülmüş malzemelerin de endüstriyel kumaş uygulamalarında kullanımı artan bir eğilim sergilemektedir. Elastomer kaynaklarında ise, Hevea brasiliensis'ten elde edilen doğal kauçuğun (NR) yanı sıra, Guayule ve Rus karahindibası gibi alternatif bitkisel kaynaklar ile terpenler ve biyokütle bazlı biyobazlı sentetik kauçuklar ele alınmıştır. Bu alternatifler sayesinde, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir. Kauçuk ürünlerinin performansını iyileştirmek ve çevresel etkilerini azaltmak amacıyla sürdürülebilir katkı maddeleri üzerinde de durulmuştur. Geleneksel karbon siyahı yerine, özellikle lastik üretiminde yuvarlanma direncini düşürerek yakıt verimliliğini artıran silika dolgu maddelerinin kullanımı öne çıkarılmıştır. Ayrıca, biyo-bazlı yağlar gibi sürdürülebilir plastikleştiriciler ve bitki polifenollerinden türetilen antioksidanlar da araştırılan alternatifler arasında yer almıştır.

Tekstil-kauçuk kompozit malzemeler, yüksek esneklik ve darbe dayanımı aranan uygulamalarda, geleneksel termoset matrisli fiber takviyeli polimerlere göre daha maliyet-etkin bir çözüm olarak sunulmuştur. Kauçuk matrislerin

döngüsel yükleme altında yorulma ömrünü artırdığı ve jüt gibi sürdürülebilir tekstillerin kompozitin çevresel ayak izini düşürebildiği bildirilmiştir. Bu kompozitlerin imalat süreci; kauçuk hazırlama, kompozit montajı (kalenderleme, ekstrüzyon, laminasyon), konsolidasyon ve kürleme (sıcaklık ve basınç kontrolünün kritik olduğu) ve post-proses işlemlerini içermektedir.

Bu kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamaları geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. En yaygın ve önemli uygulama alanı olarak lastikler belirtilmiştir; burada polyester ve naylon gibi tekstil takviyelerin kullanıldığı, bu sayede mukavemet-ağırlık oranının iyileştirildiği ve yakıt verimliliğinin artırıldığı vurgulanmıştır. Konveyör bantları, kauçuğun esnekliği ile tekstillerin mukavemetini birleştirerek yüksek yük taşıma kapasitesi, darbe ve yırtılma direnci sunan bir diğer kritik endüstriyel uygulama alanıdır. Ayrıca, savunma sanayisinde (kurşun geçirmez yelekler, şişirilebilir botlar) ve uçak yapılarında (kapı yapıları) da bu kompozitlerden faydalandığı aktarılmıştır.

Döngüsel ekonomiye geçiş kapsamında, tekstil ve kauçuk bazlı malzemele- rin geri dönüşüm ve ileri dönüşüm (upcycling) girişimleri incelenmiştir. Tekstil geri dönüşümünde mekanik ve kimyasal süreçler yer alırken, kauçuk geri dönüşümünde en önemli teknoloji, vulkanize kauçuktaki kükürt çapraz bağlarını kıran devulkanizasyon olarak belirtilmiştir. Devulkanizasyonun termal, mekanik, kimyasal ve mikrobiyal yöntemlerle gerçekleştirilebildiği rapor edilmiştir. Ancak, malzeme karmaşıklığı, geri dönüştürülmüş kauçuğun orijinaline kıyasla genellikle daha düşük mekanik özellikler sergilemesi ve ileri proseslerin yüksek maliyeti gibi zorlukların devam ettiği kaydedilmiştir. Sonuç olarak, kauçuk bazlı sürdürülebilir tekstillerin geliştirilmesi, çevresel etkiyi azaltma hedefine yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmiş

5.SÜLFÜR VE PEROKSİT VULKANİZASYONU

Kauçuk teknolojisinde, ticari ve yüksek performanslı uygulamalar için yeni özellik kombinasyonları elde etmek amacıyla farklı elastomerlerin harmanlanması yaygın bir stratejidir. Stiren-Bütadien Kauçuğu (SBR), yüksek doyumluk derecesi nedeniyle sınırlı yaşlanma direnci sergileyen, ancak iyi genel amaçlı özelliklere sahip, oldukça doymamış bir elastomerdir. Etilen-Propilen-Dien Monomer Kauçuğu (EPDM) ise, doymuş ana zinciri sayesinde mükemmel termo-oksidatif ve ozon yaşlanma direncine sahip bir özel kauçuktur. Kruželák ve ark., SBR'nin yüksek mekanik özelliklerini EPDM'nin üstün yaşlanma direnciyle birleştiren hibrit kauçuk karışımlarının, farklı kükürt ve peroksit kürleme sistemleri altında kürlenme kinetiği, çapraz bağlanma yoğunluğu ve nihai fi-

ziko-mekanik/dinamik-mekanik özellikleri üzerindeki etkileşimini derinlemesine incelemektir. Bu çalışma, özellikle SBR/EPDM karışımlarında peroksit kürlleme sistemlerinin (yardımcı ajanlarla birlikte) uygulanmasının, literatürde daha önce rapor edilmemiş kritik yapısal ve performans sonuçlarını ortaya koymaktadır Beş farklı SBR/EPDM oranı (S100-E0'dan S0-E100'e kadar) kükürt ve peroksit bazlı kürlleme sistemleri ile hazırlanmıştır. Kükürt sistemlerinde, Gecikmeli Etkili Hızlandırıcı olan N-sikloheksil-2-benzotiyazol sülfenamit (CBS), Çok Hızlı Hızlandırıcı olan tetrametiltiuram disülfid (TMTD) ve bunların kombinasyonu (CBS-TMTD) kullanılmıştır. Peroksit sistemlerinde ise dikümil peroksit (DCP) tek başına veya çinko diakrilat (ZDA) ve çinko dimektakrilat (ZDMA) gibi yardımcı ajanlarla kombine edilmiştir. Çapraz bağlanma yoğunluğu Flory-Rehner denklemi kullanılarak denge şişmesi yöntemiyle belirlenmiş; kürlenme karakteristikleri osilasyonlu reometre ile, dinamik-mekanik özellikler ise Dinamik-Mekanik Analiz (DMA) ile (gerilim modunda) analiz edilmiştir

Stiren-Bütadien (SBR) ve Etilen-Propilen-Dien Monomer (EPDM) kauçuğu karışımlarının kükürt ve peroksit sistemleri ile vulkanizasyonunun incelendiği bu çalışmada; kükürtlü sistemlerde CBS ve TMTD kombinasyonu ile optimum kürlenme dengesi ve yüksek çapraz bağ yoğunluğu sağlanırken, peroksit sistemlerinde ZDA yardımcı ajanının kullanımıyla polimer zincirleri arasında etkin bağlanma gerçekleştirilerek çapraz bağ yoğunluğu önemli ölçüde artırılmıştır. Mekanik testler sonucunda, kükürtlü sistemlerin esnek polisülfür bağları sayesinde genellikle saf peroksit sistemlerinden daha yüksek dayanım sunduğu görüldü de, özellikle %25 SBR ve %75 EPDM (S25-E75) karışımında ZDA ile güçlendirilmiş peroksit kürlmesinin 13 MPa çekme dayanımına ulaşarak kükürtlü sistemleri geride bıraktığı ve belirgin bir sinerji oluşturduğu tespit edilmiştir. Dinamik-mekanik analizlerle fazların genel olarak uyumlu olduğu ve peroksit kaynaklı rijit C-C bağlarının modülü artırdığı belirlenen çalışmada, yardımcı ajanların stratejik kullanımıyla peroksit sistemlerinin mekanik dezavantajlarının aşılabildiği ve hibrit karışımların üstün performans özellikleri sergilediği ortaya konulmuştur (Kruželák ve ark. 2024).

6. DOĞAL KAUÇUK LATEKS (C-NRL) NANOKOMPOZİT ELYAF ÜRETİMİ VE ÖN KARAKTERİZASYONU

Jasni ve ekibi (Jasni ve ark. 2019), kauçuk ağacı odunundan (Hevea brasiliensis) ekstrakte edilen selülozun doğal kauçuk lateks (NRL) ile birleştirilmesiyle oluşturulan (C-NRL) nanokompozit elyafların elektro-eğirme yoluyla

üretimi ve ön karakterizasyonu üzerine odaklanmıştır. Bu ultra ince elyaf-
ların, esneklik ve ayarlanabilir sertlik özellikleri sayesinde, askeri koruyucu
donanım imalatı gibi uygulamalarda yeni malzemeler yaratma potansiyelinin
olduğu belirtilmiştir.

Kauçuk ağacı odunundan selüloz ekstraksiyonu, şişme, asit hidrolizi, alkali
muamele ve beyazlatma aşamalarını içeren kimyasal-mekanik bir yöntem kul-
lanılarak gerçekleştirilmiştir. C-NRL öncü çözeltisinin, ekstrakte edilmiş se-
lüloz hamurunun NRL ile karışık bir çözücü içinde çözünmesiyle hazırlandığı
bildirilmiştir. Elektro-eğirme deneyleri 10kV ve 20 kV gerilimlerde ve çeşitli
akış hızlarında yürütülmüştür.

Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) analizi ile saf selüloz nanolifle-
rinin ortalama çaplarının 100-300 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. Ancak,
C-NRL nanokompozit elyaflarının elektro-eğilmesi sırasında önemli zorluk-
larla karşılaşıldığı bildirilmiştir. NRL'nin kohezif yapısı nedeniyle, çözeltinin
iğneden akışının kontrol edilemez hale geldiği ve bu durumun elektro-eğirme
yerine elektro-püskürtme morfolojisine yol açtığı tespit edilmiştir. Elde edilen
yapıların, elyaf formunda olmadığı, aksine ortalama çapı 458.74 nm olan bü-
yük damlacıklar (beads) olarak görüldüğü gösterilmiştir. Fourier Dönüşümlü
Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) karakterizasyonu ise, C-NRL kompozit elya-
fında kauçuk ağacı selülozuna özgü hidroksil, metil ve polisakkarit zincirleri
gibi fonksiyonel grupların varlığını doğrulamıştır.

Jasni ve ekibi bize, nanokompozit elyaf üretimi için NRL kullanımının elyaf
morfolojisini sürdürme açısından zorluklar içerdiğini açıkça göstermiştir. Elde
edilen morfolojik başarısızlığa rağmen, kauçuk ağacı odunundan nanokompo-
zit elyaf üretimi için selüloz ekstraksiyonunun fizibilitesinin kanıtlandığı belir-
tilmiştir (Jasni, 2019).

7. DOLGULU VE DOLGUSUZ KAUÇUKLAR

Kauçuk bileşikleri genellikle dolgusuz ve dolgulu kauçuk olarak sınıflandı-
rılır. Dolgu maddesi içermeyen dolgusuz kauçuk, tipik olarak gıda sınıfı con-
talar, tıbbi cihazlar ve otomotiv bileşenleri gibi uygulamalarda kullanılır. Öte
yandan, dolgulu kauçuk, özelliklerini geliştirmek için çeşitli dolgu maddesi
türlerini içeren kauçuk kompozitleri ifade eder.

Dolgu maddelerinin konsantrasyonu, kauçuk kompozitlerin mekanik özel-
liklerini belirlemede kritik bir rol oynar ve bu nedenle, dolgu maddesi ile matris
arasındaki ara yüzey bağ optimal performans için dikkate alınması gereken bir
diğer temel faktördür.

Ayrıca, kauçuk kompozitler, dolgu maddesi veya takviye malzemesinin türüne göre kategorize edilebilir. Tipik olarak sürekli lifli kompozitler, kısa lifli kompozitler ve parçacık dolgulu kompozitler olarak ayrılırlar. Her dolgu maddesi türü için, optimal takviye sağlamak amacıyla farklı özellikler gereklidir. Örneğin, parçacık bazlı kompozitlerde, performansı etkileyen önemli faktörler arasında parçacık boyutu, yüzey alanı, yüzey aktivitesi, agregasyon yapısı, dolgu maddesi konsantrasyonu, dağılım ve dolgu maddesi-matris etkileşimleri bulunur. Benzer şekilde, lifli dolgu maddelerinin özellikleri, liflerin en/boy oranı, konsantrasyonu, dağılımı ve yöneliminin yanı sıra lif ile matris arasındaki etkileşim gibi faktörlerden etkilenir (Wong, D. ve ark., 2024.)

8. KARBON SİYAHİ İLE DOLGU

Kauçuk endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir takviye edici dolgu maddesi olan karbon siyahı (carbon black), yılda 15 milyon ton üretilmektedir. Bunun yaklaşık %93'ü kauçuk uygulamalarında, kalan %7'si ise boyalar, kaplamalar, matbaa mürekkepleri ve plastik bileşiklerinde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, karbon siyahının kauçuk kompozitlerinin mekanik performansını nasıl iyileştirdiğini araştırmıştır.

Rattanasom ve ark. (Rattanasom ve ark., 2009), takviye edici dolgu maddelerinin (silika, karbon siyahı ve kil) doğal kauçuk kompozitlerindeki mekanik özellikler, ısı yaşlanma direnci, kesik büyüme davranışı ve morfoloji üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Karbon siyahı, silikaya kıyasla daha iyi mekanik özellikler (sertlik, %300 modülü, çekme mukavemeti ve yırtılma mukavemeti) sergilemiştir; bu durum, morfolojik analizlerle kanıtlandığı üzere, karbon siyahının matris içinde daha yüksek dispersiyonuna bağlanmıştır.

Karbon siyahı dolgulu kompozitler, silika dolgulu kompozitlere kıyasla daha pürüzsüz bir yüzeye ve homojen olarak dağılmış dolgu maddesi parçacıklarına sahipti. Öte yandan, kil ve karbon siyahı bazlı kompozitlerle aynı sertliğe ulaşmak için daha yüksek bir silika konsantrasyonu gerekiyordu. Kil, silika ve karbon siyahından daha düşük bir yüzdeyle rekabetçi, cazip özellikler elde etmiştir.

Karbon siyahı, kauçuk bileşiklerinin üretiminde yıllardır kullanılmaktadır. Ancak, kauçuk kompozitlerdeki karbon siyahının zayıf dağılımı, yüksek performanslı karbon siyahı dolgulu kauçuk kompozitlerinin üretimini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, yüzey modifikasyonu, bağlama ajanlarının dahil edilmesi, polimer matrisinin işlevselleştirilmesi ve çeşitli nano dolgu maddelerinin dahil edilmesi dahil olmak üzere karbon siyahı dağılımını iyileştirmek

için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Karbon siyahı dağılımını artırmaya yönelik yaklaşımlardan biri, kauçuğun yüzeyini modifiye etmektir. Fang ve ark. (Fang ve ark., 2020), değişen oranda urazol grupları içeren bir dizi doğal kauçuk aşısı üretmek için TAD click kimyasını (triazolinedione click chemistry) kullandılar. Bu reaktif urazol grubu, karbon siyahı/doğal kauçuk kompozitlerinde arayüzey etkileşimlerini teşvik ederek karbon siyahı dağılımını ve kompozit performansını artırabilir.

Bu gözlem, SEM morfolojisinden gösterilmiştir. SEM morfolojisi, kauçuk matris içinde karbon siyahının düzensiz dağılımını ve belirgin kümelenmelerini gösterdi. Ancak, urazol grubu miktarı arttıkça, karbon siyahının dağılımı daha tekdüze hale gelir ve kümelenme azalır. Bu durum, urazolün DK zincirleri ile KB arasındaki etkileşimi artırarak KB'nin kendi kendine kümelenmesini azalttığını göstermektedir. Buna ek olarak, TAD ile modifiye edilmiş DK zincirlerinin KB ile kovalent etkileşimi, vulkanizasyon sırasında KB'nin termodinamik olarak avantajlı yeniden kümelenmesini engelleyebilir.

Sattayanurak ve arkadaşları karbon siyahı ve silikanın birleşiminin doğal kauçuk kompozitlerinin özellikleri üzerindeki sinerjik etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, karbon siyahı ve silika arasındaki oran değiştirilmiş, karbon siyahı içeriği ağırlıkça %0 ile %36 arasında değişmiştir. Ağırlıkça %18'lik optimum bir karbon siyahı içeriğinin, kauçuk kompozitlerinin bağlı kauçuk içeriğinde, mekanik özelliklerinde ve aşınma direncinde iyileşmeye yol açtığını bulmuşlardır (Sattayanurak ve ark., 2020).

Ancak, karbon siyahı üretiminin önemli bir karbon ayak izine yol açması, doğal kaynaklara, atık malzemelere ve endüstriyel veya tarımsal yan ürünlere odaklanarak kauçuk takviyesi için çevre dostu dolgu maddeleri araştırmasına odaklanılmasına neden olmuştur (Fan ve ark., 2020). Sürdürülebilir çözümlerden biri, kullanılmış lastikleri kullanmak ve piroliz süreçleri yoluyla onları gaz, sıvı ve karbon açısından zengin katı fraksiyonlara (RCB- Geri Kazanılmış Karbon Siyahı) dönüştürmek veya geri dönüştürmektir. RCB, geleneksel karbon siyahının yerini alma potansiyeline sahiptir ve kirlilik gibi birçok çevresel sorunu ele alabilir.

Dwivedi ve ark. (Dwivedi ve ark., 2020), doğal kauçuk kompozitler için alternatif ve çevre dostu bir takviye olarak RCB kullanımını araştırmışlardır. RCB kullanımının, saf doğal kauçuğa kıyasla kürleşme ve kavrulma süresini kısaltmak gibi işleme parametrelerini iyileştirebileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, RCB parçacıklarının kauçuk bileşikleriyle zayıf etkileşimi nedeniyle çekme mukavemeti ve kopma uzaması artarken, çekme modülü, basma mukavemeti

ve yırtılma mukavemeti azalmıştır (Dwivedi ve ark., 2020).

Urrego-Yepes ve ark. (Urrego-Yepes ve ark., 2021) tarafından da benzer bulgular bildirilmiş olup, RCB'nin doğal kauçuğun özelliklerini iyileştirdiğini ve sürdürülebilir bir çözüm olabileceğini bulmuşlardır. Ancak, saf karbon siyahına kıyasla RCB, daha yüksek uçucu madde ve kül içeriği, daha yüksek görünür Parçacık Boyutu Dağılımı (PSD), daha düşük asidik fonksiyonel grup varlığı ve daha düşük BET (yüzey alanı) nedeniyle daha düşük takviye özellikleri sunar. (Masa ve ark., 2023), geri dönüştürülmüş nitril eldiven atığının doğal kauçuk ve epoksitlenmiş doğal kauçukta harmanlama bileşeni olarak kullanılmasının etkisini incelemişlerdir. Geri dönüştürülmüş nitril eldiven atığının artmasının, çekme özelliklerinde ve kopma uzamasında artışa ve bozunma sıcaklığında yükselmeye yol açtığını bulmuşlardır.

9. NANOSELÜLOZ DOLGU

Noguchi ve ekibinin (2025) çalışmalarında, lastik endüstrisinin temel yapı taşı olan doğal kauçuğun (NR) mekanik dayanımını ve termal kararlılığını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan petrol türevi karbon siyahının (CB), çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda biyobozunur TEMPO-oksitlenmiş selüloz nanolifleri (TOCN) ile ikame edilmesi sürecinde, hidrofilik dolgu maddesi ile hidrofobik polimer matrisi arasındaki termodinamik uyumsuzluğun giderilmesi malzeme biliminin en kritik problemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda yürütülen ileri seviye karakterizasyon çalışmalarında, Karbon Siyahı ile endüstriyel standartlarda performans gösteren geleneksel kükürt vulkanizasyonunun, nanolif içeren sistemlerde zayıf bir ara yüzey etkileşimi ve gevşek bir ağ yapısı oluşturarak mekanik özellikleri baskıladığı saptanmış; bu yapısal yetersizliği aşmak için radikal mekanizmalarla işleyen peroksit (PO) bazlı çapraz bağlama sistemlerinin kullanımı bir zorunluluk olarak belirlenmiştir. Noguchi ve ekibi tarafından, nanoliflerin kauçuk matrisi içerisinde homojen dispersiyonunu ve arayüzeyde kovalent bağ oluşumunu azami miktara çıkarmak amacıyla sıvı faz karıştırma ve katı faz yoğurma teknikleri entegre edilerek, 5 phr TOCN, 60 phr Silika ve 3 phr Silan bağlayıcı ajan (SC) içeren optimize edilmiş hibrit bir nanokompozit mimarisi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu peroksit kürelemesi esaslı hibrit sistemin mekanik test sonuçları incelendiğinde, numunelerin %20, %50, %100 ve %300 gerinim (strain) seviyelerinde sergilediği stres değerlerinin, referans alınan Karbon Siyahı takviyeli numunelerin (CB40 ve CB60) performansını aştığı; endüstriyel uygulanabilirlik açısından belirleyici olan DIN aşınma testlerinde ise spesifik

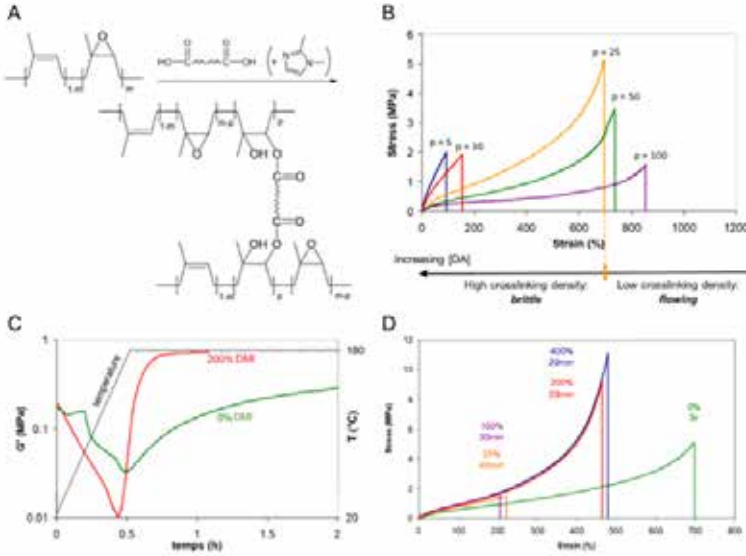
aşınma hacminin $0.4 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ seviyesine indirgenerek, petrol türevi dolguların standartlarına ($0.30\text{--}0.38 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) eşdeğer bir dayanıklılık elde edildiği rapor edilmiştir. Makroskobik düzeyde gözlemlenen bu üstün mekanik performansın moleküler kökeni Pulsed NMR spektroskopisi ile analiz edildiğinde, kükürt ile hazırlanan nanolifli numunelerin yüksek spin-spin gevşeme sürelerine (T_2) sahip olduğu, buna karşın peroksit ile kürlenmiş hibrit yapıların, tıpkı Karbon Siyahı içeren numuneler gibi son derece düşük T_2 değerleri sergilediği tespit edilmiştir. Düşük T_2 değerlerinin, polimer zincirlerinin hareketliliğinin kısıtlandığı yoğun, sıkı ve homojen bir çapraz bağ ağına işaret ettiği doğrulanmış ve bu ağ yoğunluğu ile aşınma direnci arasında güçlü bir korelasyon (0.75 gibi) bulunduğu istatistiksel olarak kanıtlanarak, doğal kauçuğun fonksiyonel nanoliflerle modifikasyonunda peroksit/silika/silan kombinasyonunun en etkin strateji olduğu ortaya konmuştur.

10. EPOKSİTLENMİŞ DOĞAL KAÜÇÜK

Epoksitlenmiş Doğal Kauçuk (EDK), benzersiz ikili fonksiyonelliği (elastisite ve epoksit gruplarının kimyasal reaktivitesi) sayesinde öne çıkmaktadır (Akiba, 1997). EDK'nin yapısındaki polar epoksit grupları, malzemeye geleneksel kükürt vulkanizasyonunu atlayan yenilikçi çapraz bağlama stratejileri uygulama imkanı sunmaktadır (Bibi, 1988; Johnson 1999).

10.1. Kendinden Vulkanize ENR/Dikarboksilik Asit (DA) Harmanları

Araştırmanın başlangıç noktası, EDK'nin dodesanedioik asit (DA) gibi dikarboksilik asitlerle ek katkı maddeleri olmadan çapraz bağlanmasıyla oluşan "kendinden vulkanize" harmanlardır. Bu sistem, geleneksel kauçuklarda sıklıkla karşılaşılan yorulma direnci ve yaşlanma direnci arasındaki uyumsuzluğa yeni bir çözüm getirmeyi hedeflemiştir (Akiba 1997). Dikarboksilik asitler, EDK'deki epoksit fonksiyonelliğini kullanarak esnek ve termal olarak stabil alifatik ester köprüleri oluşturur (Şekil 1) (M. Pire, (2013).



Şekil 1. Dikarboksilik asitle kürlenmiş epoksida doğal kauçuğun termal ve mekanik özellikleri (M. Pire, (2013).

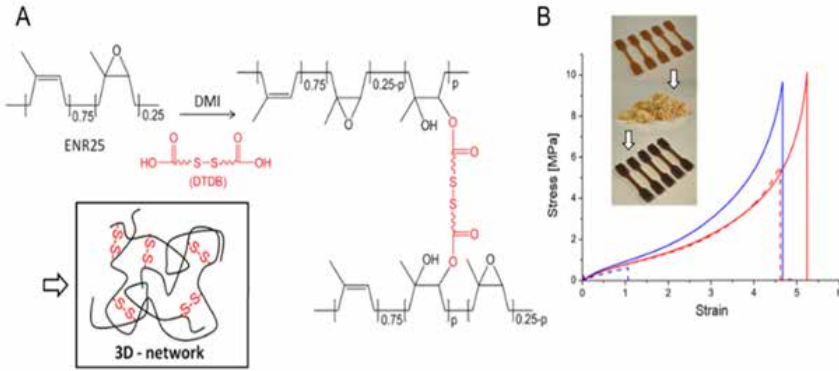
Çalışma, epoksitleme oranının (özellikle EDK 25 için) ve epoksit/diasit oranının (% 25 bulunmuştur) mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiş, solvent kullanılmadan, toplu (bulk-yığın) sentez yöntemiyle çevresel etkiyi minimuma indirmiştir.

10. 2. İmidazol Bileşikler ile Kürleme Kinetiğinin Hızlandırılması

Başlangıçtaki uzun kürleme süreleri ve yüksek sıcaklık gereksinimi, 1,2-dimetilimidazol (DMI) bileşiklerinin hızlandırıcı olarak kullanılmasıyla aşılmıştır (M. Pire,). Kaolin gibi inert dolgu maddeleriyle homojen dispersiyonu sağlanan DMI, kürleme sürelerini önemli ölçüde kısaltmış ve sıcaklık gereksinimini düşürmüştür. Mekanik testler, her bir karbonil grubuna bir DMI molekülü oranının (stokiyometrik oran) optimal çekme özelliklerini sağladığını göstermiştir. Katı-hal NMR analizleri, imidazolün reaksiyon hızlandırıcı olarak rolünü; imidazolium karboksilatlar adı verilen reaktif ara ürünler oluşturarak epoksit halka açılmasını kolaylaştırması hipotezi ile doğrulamıştır (M. Pire 2012). Bu yenilik, EDK'nin endüstriyel çekiciliğini artırırken, geleneksel kükürt vulkanizasyonuna kıyasla daha yeşil ve enerji verimli bir alternatif sunmuştur. Ticari kıyaslama testleri, EDK-DA-DMI sisteminin, kükürt (CV, SEV, EV) ve peroksit kürlenmiş sistemler arasında orta düzeyde yorulma-yaşlanma dengesi sağladığını göstermiştir (M. Pire, 2011.)

10.3. Değiştirilebilir Bağlar Kullanılarak Termal Olarak Geri Dönüştürülebilir Kimyasal Ağlar

Kauçuk geri dönüşüm sorunlarına çözüm olarak, çapraz bağ ağına termal olarak tersine çevrilebilir bağlar, yani disülfür bağları eklenmiştir üzerindeki disülfür düzenlemesi sayesinde malzemeye geri dönüştürülebilirlik özelliği kazandırılmıştır (Şekil 2A). DTDB ile kürlenmiş ENR, öğütülüp sıcak presle yeniden şekillendirildikten sonra başlangıçtaki mekanik özelliklerinin çoğunu korumuştur (Şekil 2B) (L. Imbernon, 2015).



Şekil 2. Epokside Edilmiş Kauçukta disülfür bağlanması

ENR/DTDB, yorulma direnci sağlayan polisülfid köprülerini destekleyen konvansiyonel kükürt vulkanizasyonu (CV) ile kıyaslanmıştır.

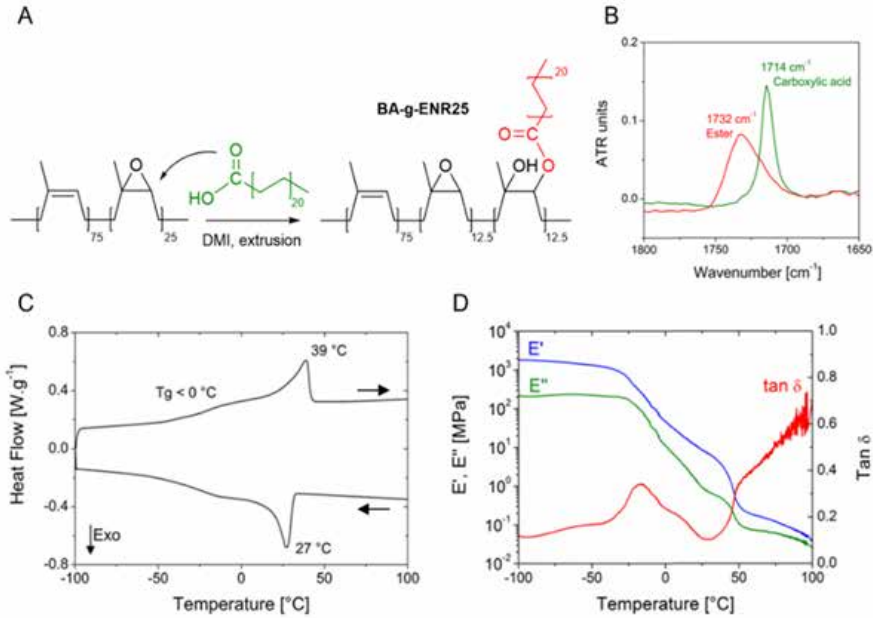
- Kıyaslama Sonuçları: İki sistem de benzer çapraz bağ yoğunlukları ve stres gevşeme davranışları sergilemesine rağmen, ENR/DTDB, termal bozulmaya karşı daha düşük reaktivite göstermiştir.
- Geri Dönüştürülebilirlik: Her iki sistem de geri dönüştürülebilirlik açısından karşılaştırılabilir performans (uzamada %80, çekme dayanımında %50 geri kazanım) sunmuştur (L. Imbernon, 2015.) Ancak ENR/DTDB, kükürt vulkanizasyonunda gerekli olan toksik hızlandırıcıları (CBS, ZnO) ortadan kaldırarak çevresel üstünlüğünü kanıtlamıştır.

10.4. Kristalize Edilebilir Aşılar Kullanılarak Termal Olarak Geri Dönüştürülebilir Fiziksel Ağlar

ENR geliştirme çabaları, Behenik Asit (BA) gibi kristalize edilebilir monoasitlerin graftlanmasıyla fiziksel çapraz bağlanmaya odaklanmıştır. Bu, elastomerin ortam sıcaklıklarında elastik (kauçuksu) ve BA'nın erime nokta-

sının üzerinde (yaklaşık 40-50 °C) plastik (ergiyebilir) özellikler sergilemesini sağlayarak termoplastik elastomer (TPE) davranışını hedeflemiştir (Imbernon, 2025).

- DA ile Çaprazlanmış ENR’de Gerilme Kaynaklı Kristalizasyon (SIC): Önceki çalışmalar DA-çaprazlanmış ENR’nin, doğal kauçuğa benzer şekilde, yüksek çatlak ilerlemesi direncine katkıda bulunan SIC özelliğini koruduğunu göstermiştir (Pire, (2014). Bu bulgu, DA bazlı kimyasal ağın doğal kauçuğun mekanik sağlamlığını koruduğunu teyit etmiştir.
- BA-Graftlanmış ENR’de Fiziksel Ağ Oluşumu: BA, DMI hızlandırıcı eşliğinde çözücü gerektirmeyen reaktif ekstrüzyon ile ENR25’e graftlanmıştır (Şekil 3). DSC analizi, graftlanmış BA kristallerinin erime noktasının saf BA’ya göre önemli ölçüde düşük olduğunu ve 39 °C de ortaya çıktığını göstermiştir. DMA tekniği ile BA erime noktası arasında malzemenin elastomerik davrandığını, 50 °C üzerinde ise termoplastik özellikler sergilediğini doğrulamıştır (Şekil 3).
- Mikro Yapı ve Mekanik Davranış: TEM görüntüleri, 12 nm aralığa sahip kristal lamellerinin oluştuğunu göstermiştir. In situ WAXS deneyleri (10 °C’de), bir ön-gerilme adımının BA kristallerini parçalayıp yönlendirdiğini, sonraki döngülerde ise bu kristallerin fiziksel çapraz bağlar gibi davranarak elastomerik özellik sağladığını ortaya koymuştur
- Kimyasal ve Fiziksel Ağların Kıyaslanması: Fiziksel ağ (BA-g-ENR25), kimyasal ağa (DA-ENR25) kıyasla gerilim-gerinim davranışları benzer olsa da daha iyi son mekanik özellikler sergilemiştir. BA-graftlanmış ENR, hem SIC’den kaynaklanan yüksek mekanik sağlamlığı hem de termoplastik elastomerlerin geri dönüştürülebilirliğini bir araya getirmiştir.



Şekil 3. Epokside doğal Kauçuğun BA (behenik asit) ile reaksiyonu ve elde edilen ürünün spektral ve termal karakterizasyonu.

Bu kapsamlı çalışma, ENR'nin sürdürülebilir kauçuk çözümleri için ne kadar çok yönlü bir platform olduğunu kanıtlamıştır. Kendinden vulkanize harmanlardan başlayarak, DMI hızlandırıcılar, geri dönüştürülebilir disülfid bağları ve termoplastik özellikler sağlayan kristalize edilebilir aşılar kullanılarak ENR'nin fonksiyonelliği sürekli olarak artırılmıştır. Özellikle BA-graftlanmış ENR'de gözlemlenen SIC yeteneği ile geri dönüştürülebilirliğin birleşimi, bu malzemeyi geleneksel doğal kauçuğa sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir alternatif olarak konumlandırmaktadır. Gelecekteki çalışmalar için, BA-g-ENR'nin düşük erime noktasını yaklaşık 40 °C aşmak amacıyla, kimyasal geri dönüştürülebilirlik (DTDB) ile fiziksel çapraz bağlanmanın (BA aşıları) birleştirildiği ikili çapraz bağlı ağların geliştirilmesi önerilmiştir (Imbernon, 2025).

10.5. Lignin/Epoksidize Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk (NR), yüksek elastikiyeti, eşsiz mekanik özellikleri ve zorlanma kaynaklı kristallenme (SIC) kapasitesi sayesinde endüstriyel uygulamalarda stratejik bir polimer olmaya devam etmektedir (Zheng, 2025). Geleneksel olarak, DK'nin mekanik performansını maksimize etmek için karbon siyahı (CB) gibi petrol türevi dolgular kullanılmaktadır. Ancak, sürdürülebilirlik he-

defleri ve çevresel kaygılar, biyo-bazlı, yenilenebilir ve bol kaynaklı takviye dolgularına yönelik bilimsel ilgiyi artırmıştır (Roy, 2021).

Lignin, selüloz ve hemiselülozdan sonra doğada en çok bulunan üçüncü polimer olup, kâğıt ve biyorafineri endüstrilerinin büyük bir yan ürünüdür (Ragauskas, 2014). Yapısındaki fenolik ve alkollü hidroksil grupları (Parvathy, 2021) sayesinde antioksidan ve UV emici özelliklere sahiptir ve bu da onu NR takviyesi ve yaşlanma karşıtı koruma için cazip bir aday yapar (Barana, 2016; Košíková, 2007)

Lignin, polar yapısıyla, polar olmayan DK matrisi arasında ciddi bir ara yüzey uyumsuzluğu sergiler. Bu uyumsuzluk, lignin partiküllerinin kauçuk matrisi içinde büyük agregatlar oluşmasına yol açar (Hosseinmardi, 2021). Aglomere olmuş dolgular, harici gerilimi matrise etkin bir şekilde transfer edemez, bu da kompozitin nihai mekanik özelliklerini ciddi ölçüde düşürür (Aini, 2020). Bu kritik sorunu çözmek için literatürde lignin modifikasyonu (amin bağlama, silan bağlama) ve matris modifikasyonu gibi çeşitli stratejiler denenmiştir (Qiu, J, 2023, Jiang, C.2015,) Zheng ve ekip arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın temelini, matrisin yüzey enerjisini polar lignin ile uyumlu hale getirmek üzere Doğal Kauçuk'un epoksitlemesi (EDK) oluşturmaktadır. Epoksi gruplarının (—O—) varlığı, NR zincirinin polaritesini artırarak lignin ile hidrojen bağı oluşumunu ve hatta reaktif çapraz bağlanmayı teşvik edebilir (Jiang 2025) ENR'nin avantajı, düşük epoksitleme derecelerinde NR'nin üstün mekanik özelliklerinin kaynağı olan kritik zorlanma kaynaklı kristallenme (SIC) etkisini büyük ölçüde korumasıdır (Burfield, 1984). Ayrıca, dolgunun dispersiyonunu maksimize etmek için geleneksel kuru karıştırmanın (dry mixing) aksine, partikül aglomerasyonunu en aza indiren ve arayüzey bağınyı güçlendiren ıslak karıştırma yöntemi benimsenmiştir Farklı epoksitleme derecelerine sahip ENR'ler (E-25% ve E-45%), formik asit ve hidrojen peroksit kullanılarak NR lateksinin yerinde (in situ) modifikasyonu ile sentezlenmiştir (Zheng 2025).

Islak Karıştırma Yöntemi: Kompozitler, %20 oranında (20 phr) sodyum liginosülfonatın sulu çözeltisinin ENR emülsiyonu ile karıştırılması ve ardından uygun pH koşullarında (pH=10) ve etanol flokülasyonu ile çöktürülmesi ile hazırlanmıştır. Bu yöntem, kuru karıştırmaya kıyasla dolgunun nano/submikron ölçekte matris içinde homojen dağılımını sağlamayı amaçlamıştır.

Karşılaştırmalı analiz amacıyla geleneksel çift merdaneli karıştırıcıda hazırlanan kuru karıştırma numunelerinin (d-NR-L, d-E-25%-L, d-E-45%-L) de değerlendirildiği çalışmada, epoksidasyon dereceleri H1 NMR spektroskopisi kullanılarak epoksi ve olefin protonlarının sinyal oranları üzerinden hassasiyet-

le tespit edilmiştir. Kompozitlerin yapısal bütünlüğü, mekanik direnci ve viskoelastik özellikleri, sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), standart çekme testleri ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Özellikle SEM analizleri, epoksidasyon derecesindeki artışın lignin dispersiyonu üzerindeki belirleyici etkisini somutlaştırmış; modifiye edilmemiş NR matrisinde (w-NR-L) zayıf uyumluluktan kaynaklanan mikrometre boyutunda düzensiz agregatlar gözlemlenirken, %25 epoksidasyon seviyesinde partikül boyutlarının belirgin şekilde küçüldüğü, %45 seviyesinde (w-E-45%-L) ise artan polarite ve güçlenen arayüzey etkileşimleri sayesinde ligninin matris içerisinde sub-mikron ölçeğinde tam ve homojen bir dağılım sergilediği saptanmıştır.

Islak karıştırma, kuru karıştırmaya göre üstün bir morfoloji sağlamıştır. Kuru karıştırma ile hazırlanan numunelerde (d-NR-L, d-E-25%-L), geniş lignin toprakları ve kauçuk matrisinde çatlaklar gözlemlenmiş, bu da zayıf arayüzey bağını ve makro yapıya verilen zararı işaret etmektedir. Çekme testleri de, kompozit performansında bir optimizasyon noktası olduğunu göstermiştir:

Örnek	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)
w-NR-L	\$27.5 \pm 0.6\$	\$598.8 \pm 19.3\$
w-E-25%-L	\$36.2 \pm 0.5\$	\$703.3 \pm 25.4\$
w-E-45%-L	\$35.0 \pm 0.7\$	\$644.5 \pm 17.6\$

Elde edilen deneysel bulgular, ıslak karıştırma yöntemiyle hazırlanan w-E-25%-L numunesinin, saf doğal kauçuğa (NR) kıyasla çekme mukavemetinde yaklaşık %31.6'lık bir artışla 36.2 MPa değerine ulaşarak, lignin aglomerasyonundan kaynaklı yapısal kusurlar nedeniyle sınırlı performans (maksimum 22.9 MPa) sergileyen kuru karıştırma numunelerine belirgin bir üstünlük sağladığını göstermiştir. En homojen lignin dağılımının w-E-45%-L numunesinde gözlemlenmesine karşın optimum mekanik özelliklerin %25 epoksidasyon seviyesinde elde edilmesi, yüksek epoksidasyon derecesinin lignini daha iyi disperse etmesine rağmen doğal kauçuğun temel güçlendirme mekanizması olan Zorlanma Kaynaklı Kristallenme (SIC) yeteneğini baskıladığı hipotezini doğrulamaktadır. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) verileri de bu güçlendirilmiş arayüzey etkileşimlerini desteklemekte olup, epoksidasyon derecesindeki artışla birlikte camsı geçiş sıcaklığının -44.9'dan -9.8'e yükselmesi ve başlangıç depolama modülünün artması, oluşan sıkı çapraz bağ ağının ve gelişmiş uyumluluğun polimer zincir hareketliliğini kısıtladığına işaret etmektedir. Sonuç olarak, matris polaritesinin optimizasyonu ve yaş karıştırma stratejisinin entegrasyonu sayesinde, ligninin karbon karasına sürdürülebilir bir alternatif

olarak yüksek performanslı elastomer kompozitlerde etkin bir şekilde kullanılabilceği kanıtlanmış; E-25% seviyesinin, ideal dispersiyon ile SIC mekanizmasının korunması arasındaki kritik denge noktası olduğu ortaya konulmuştur.

11. SONUÇ (DOĞAL KAUÇUĞUN GELECEĞİ)

Doğal kauçuk tedariğinde istikrarı sağlamak ve petrol bazlı sentetiklere olan bağımlılığı azaltmak için ikili bir strateji izlenmektedir: Geleneksel Hevea brasiliensis ağacını iyileştirmek ve alternatif kaynaklar geliştirmek. Hevea'yı geliştirmeye yönelik çabalar, geleneksel ıslahı modern biyoteknoloji ile birleştirmeyi içermektedir. 1981 IRRDB koleksiyonu gibi geleneksel ıslah, genetik tabanı genişletmeyi amaçlasa da yeni genetik materyallerin düşük verimleri nedeniyle yavaş bir süreçtir.

Eş zamanlı olarak, biyoteknoloji mikro çoğaltma (klonlama) ve genetik transformasyon gibi umut verici yollar sunmaktadır, ancak bu teknikler kauçuk için hala başlangıç aşamasındadır ve ticari olarak henüz rafine edilmemiştir. In vitro klonlamanın ticari uygulanabilirliğini belirlemek için büyük ölçekli saha denemeleri devam ederken, moleküler çalışmalar kauçuk biyosentezindeki temel genleri tanımlamaktadır. Bununla birlikte, bu biyoteknolojik yaklaşımlar, genetik istikrarsızlık ve transgen kaçışı gibi potansiyel riskler hakkında daha fazla araştırma gerektirmektedir.

Buna paralel olarak, bilim insanları incir ağaçları, guayule ve Rus karahindibas (T. koksaghyz) gibi alternatif kauçuk üreten bitkileri keşfetmektedirler. Rus karahindibas, hızlı yaşam döngüsü ve genetik transformasyon kolaylığı ile özellikle dikkat çekmektedir, ancak kauçuk üretimine dair moleküler verileri sınırlı kalmaktadır.

KAYNAKÇA

- Adak, B., Chatterjee, U., & Joshi, M. (2025). Rubber-based sustainable textiles and potential industrial applications. *Textiles*, 5(2), 17.
- Akiba, M., & Hashim, A. S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers. *Progress in Polymer Science*, 22(3), 475–521.
- Annamma, Y., Marattukalam, J. G., Premakumari, D., Saraswathy Amma, C. K., Licy, J., & Panikkar, A. O. N. (1990). Promising rubber planting materials with special reference to Indian clones. In *Proceedings of Planters Conference*, Kottayam, India.
- Arias, M., Herrero, J., Ricobaraza, M., Hernandez, M., & Ritter, E. (2016). Evaluation of root biomass, rubber and inulin contents in nine *Taraxacum koksaghyz* Rodin populations. *Industrial Crops and Products*, 83, 316–321.
- Barana, D., Ali, S. D., Salanti, A., Orlandi, M., Castellani, L., Hanel, T., & Zoia, L. (2016). Influence of lignin features on thermal stability and mechanical properties of natural rubber compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(10), 5258–5267.
- Benedict, C. R., Greer, P. J., & Foster, M. A. (2008). The physiological and biochemical responses of guayule to the low temperature of the Chihuahuan Desert in the biosynthesis of rubber. *Industrial Crops and Products*, 27(2), 225–235.
- Berthelot, K., Lecomte, S., Estevez, Y., Zhendre, V., Henry, S., Thévenot, J., ... & Peruch, F. (2014). Rubber particle proteins, HbREF and HbSRPP, show different interactions with model membranes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1838(1), 287–299.
- Bibi, A. N., Boscott, D. A., Butt, T., & Lehrle, R. S. (1988). Improving the adhesion between rubber and nylon by either epoxidation of the rubber or chemical pre-treatment of the nylon. *European Polymer Journal*, 24(12), 1127–1131.
- Buranov, A. U., & Elmuradov, B. J. (2010). Extraction and characterization of latex and natural rubber from rubber-bearing plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(2), 734–743.
- Burfield, D. R., Lim, K. L., & Law, K. S. (1984). Epoxidation of natural rubber latices: Methods of preparation and properties of modified rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 29(5), 1661–1673.
- Bushman, B. S., Scholte, A. A., Cornish, K., Scott, D. J., Brichta, J. L., Vederas, J. C., ... & Knapp, S. J. (2006). Identification and comparison of natural rubber from two *Lactuca* species. *Phytochemistry*, 67(23), 2590–2596.

- Chen, F., Tholl, D., Bohlmann, J., & Pichersky, E. (2011). The family of terpene synthases in plants: A mid-size family of genes for specialized metabolism that is highly diversified throughout the kingdom. *The Plant Journal*, 66(1), 212–229.
- Cherian, S., Ryu, S. B., & Cornish, K. (2019). Natural rubber biosynthesis in plants, the rubber transferase complex, and metabolic engineering progress and prospects. *Plant Biotechnology Journal*, 17(11), 2041–2061.
- Coffelt, T. A., & Ray, D. T. (2010). Cutting height effects on guayule latex, rubber, and resin yields. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 264–268.
- Cornish, K. (1996). Hypoallergenic natural rubber products from *Parthenium argentatum* (Gray) and other non-*Hevea brasiliensis* species. U.S. Patent 5,580,942.
- Cornish, K. (2017). Alternative natural rubber crops: Why should we care? *Technology & Innovation*, 18(3), 245–256.
- Cornish, K., & Schloman, W. W., Jr. (2004). Rubber, Guayule. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst486>
- Cornish, K., Brichta, J. L., Yu, P., Wood, D. F., McGlothlin, M. W., & Martin, J. A. (2001). Guayule latex provides a solution for the critical demands of the non-allergenic medical products market. *Agro-Food-Industry Hi-Tech*, 12, 27–31.
- Cornish, K., Wood, D. F., & Windle, J. J. (1999). Rubber particles from four different species, examined by transmission electron microscopy and electron-paramagnetic-resonance spin labeling, are found to consist of a homogeneous rubber core enclosed by a contiguous, monolayer biomembrane. *Planta*, 210(1), 85–96.
- Cornish, K., Xie, W., Kostyal, D., Shintani, D., & Hamilton, R. G. (2015). Immunological analysis of the alternate natural rubber crop *Taraxacum koksaghyz* indicates multiple proteins cross-reactive with *Hevea brasiliensis* latex allergens. *Journal of Biotechnology & Biomaterials*, 5, 201–207.
- Dwivedi, C., Manjare, S., & Rajan, S. K. (2020). Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108346.
- Eranki, P. L., El-Shikha, D., Hunsaker, D. J., Bronson, K. F., & Landis, A. E. (2017). A comparative life cycle assessment of flood and drip irrigation for guayule rubber production using experimental field data. *Industrial Crops and Products*, 99, 97–108.

- Fan, Y., Fowler, G. D., & Zhao, M. (2020). The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler—A review. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119115.
- Fang, S., Wu, S., Huang, J., Wang, D., Tang, Z., Guo, B., & Zhang, L. (2020). Notably improved dispersion of carbon black for high-performance natural rubber composites via triazolinedione click chemistry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(48), 21047–21057.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Hamilton, R. G., & Cornish, K. (2010). Immunogenicity studies of guayule and guayule latex in occupationally-exposed Yulex plant workers. *Industrial Crops and Products*, 31(1), 197–201.
- Hodgson-Kratky, K. J. M., & Wolyn, D. J. (2015). Cytoplasmic male sterility in Russian dandelion. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 140(6), 580–586.
- Hosseinmardi, A., Amiralian, N., Hayati, A. N., Martin, D. J., & Annamalai, P. K. (2021). Toughening of natural rubber nanocomposites by the incorporation of nanoscale lignin combined with an industrially relevant leaching process. *Industrial Crops and Products*, 159, 113063.
- Imbernon, L. (2015). Chemically crosslinked yet reprocessable epoxidized natural rubber (Doctoral dissertation, Pierre-et-Marie-Curie University).
- Imbernon, L., Oikonomou, E. K., Norvez, S., & Leibler, L. (2015). Chemically cross-linked yet reprocessable epoxidized natural rubber via thermo-activated disulfide rearrangements. *Polymer Chemistry*, 6(23), 4271–4278.
- Imbernon, L., Pire, M., Oikonomou, E. K., Karpati, S., Tencé-Girault, S., & Norvez, S. (2025). Highlights of epoxidized natural rubber: From self-vulcanizing blends to reprocessable chemical or physical networks. *Comptes Rendus Chimie*, 28, 171–184.
- Jasni, A. H., Salleh, E. M., Zakaria, F. Z., Razali, N. A. M., Ya'acob, W. H. W., & Aziz, F. H. A. (2019). Fabrication and preliminary characterization of rubber cellulose/natural rubber latex (C-NRL) nanocomposite fibers. *AIP Conference Proceedings*, 2068(1), 020063.
- Jiang, C., He, H., Yao, X., Yu, P., Zhou, L., & Jia, D. (2015). In situ dispersion and compatibilization of lignin/epoxidized natural rubber composites: Reactivity, morphology and property. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(21), 42044.

- Jiang, C., Shen, H., Bi, X., Wang, Z., Yao, M., Wu, Y., Zhang, L., & Yu, P. (2022). A green dual-phase carbon-silica nanohybrid derived from black liquor lignin for reinforcing styrene-butadiene rubber. *Composites Science and Technology*, 230, 109775.
- Johnson, T., & Thomas, S. (1999). Nitrogen/oxygen permeability of natural rubber, epoxidised natural rubber and natural rubber/epoxidised natural rubber blends. *Polymer*, 40(11), 3223–3228.
- Košíková, B., Gregorová, A., Osvald, A., & Krajčovičová, J. (2007). Role of lignin filler in stabilization of natural rubber-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(2), 1226–1231.
- Kruželák, J., Kvasničáková, A., Džuganová, M., Hanzlik, J., Bednarik, M., Chodák, I., & Hudec, I. (2024). Sulfur and peroxide vulcanization of the blends based on styrene–butadiene rubber, ethylene–propylene–diene monomer rubber and their combinations. *Materials*, 17(11), 2718.
- Kumar, S., Hahn, F. M., McMahan, C. M., Cornish, K., & Whalen, M. C. (2009). Comparative analysis of the complete sequence of the plastid genome of *Parthenium argentatum* and identification of DNA barcodes to differentiate *Parthenium* species and lines. *BMC Plant Biology*, 9, 131.
- Luo, Z., Iafaldano, B. J., Zhuang, X., Fresnedo-Ramirez, J., & Cornish, K. (2017). Analysis of the first *Taraxacum kok-saghyz* transcriptome reveals potential rubber yield related SNPs. *Scientific Reports*, 7, 9939.
- Masa, A., Hayeemasae, N., Ahmad, H. S., & Ismail, H. (2023). Nitrile glove waste as blending component for natural rubber and epoxidized natural rubber: Functionality and thermal stability. *Malaysian Journal of Chemistry*, 25(4), 135–143.
- McAssey, E. V., Gudger, E. G., Zuellig, M. P., & Burke, J. M. (2016). Population genetics of the rubber-producing Russian dandelion (*Taraxacum kok-saghyz*). *PLOS One*, 11(1), e0146417.
- Mohamad Aini, N. A., Othman, N., Hussin, M. H., Sahakaro, K., & Hayeemasae, N. (2020). Lignin as alternative reinforcing filler in the rubber industry: A review. *Frontiers in Materials*, 6, 329.
- Mooibroek, H., & Cornish, K. (2000). Alternative sources of natural rubber. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53, 355–365.
- Narasimhan, K., Thulaseedharan, A., & Kothandaraman, R. (2000). Detection of pathogenesis related proteins in *Hevea brasiliensis* infected by *Phytophthora meadii*. *Journal of Biosciences*, 25.

- Noguchi, T., Bamba, Y., Odaka, I., Sakurai, J., Endo, M., & Isogai, A. (2025). Improving abrasion resistance of rubber/nanocellulose composite sheets. *Polymer Engineering & Science*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/pen.70154>
- Omar, M. F., Ali, F., Jami, M. S., Azmi, A. S., Ahmad, F., Marzuki, M. Z., ... & Kim, M. P. (2025). A comprehensive review of natural rubber composites: Properties, compounding aspects, and renewable practices with natural fibre reinforcement. *Journal of Renewable Materials*, 13(3).
- Parvathy, G., Sethulekshmi, A. S., Jayan, J. S., Raman, A., & Saritha, A. (2021). Lignin based nano-composites: Synthesis and applications. *Process Safety and Environmental Protection*, 145, 395–410.
- Pire, M. (2011). Self-vulcanizing blends of epoxidized natural rubber and dicarboxylic acids (Doctoral dissertation, Pierre-et-Marie-Curie University).
- Pire, M., Lorthioir, C., Oikonomou, E. K., Norvez, S., Iliopoulos, I., Le Rossignol, B., & Leibler, L. (2012). Imidazole-accelerated crosslinking of epoxidized natural rubber by dicarboxylic acids: A mechanistic investigation using NMR spectroscopy. *Polymer Chemistry*, 3(4), 946–953.
- Pire, M., Norvez, S., Iliopoulos, I., Le Rossignol, B., & Leibler, L. (2011). Imidazole-promoted acceleration of crosslinking in epoxidized natural rubber/dicarboxylic acid blends. *Polymer*, 52(23), 5243–5249.
- Pire, M., Norvez, S., Iliopoulos, I., Le Rossignol, B., & Leibler, L. (2014). Silica reinforced self-vulcanizing epoxidized natural rubber. *Composite Interfaces*, 21(1), 45–50.
- Pire, M., Oikonomou, E. K., Imbernon, L., Lorthioir, C., Iliopoulos, I., & Norvez, S. (2013). Crosslinking of epoxidized natural rubber by dicarboxylic acids: An alternative to standard vulcanization. *Macromolecular Symposia*, 331-332(1), 89–96.
- Puskas, J. E., Gautriaud, E., Deffieux, A., & Kennedy, J. P. (2006). Natural rubber biosynthesis—a living carbocationic polymerization? *Progress in Polymer Science*, 31(6), 533–548.
- Qiu, J., Yuan, S., Xiao, H., Liu, J., Shen, T., Tan, Z., ... & Zhu, C. (2023). Study on lignin amination for lignin/SiO₂ nano-hybrids towards sustainable natural rubber composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123547.
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., ... & Wyman, C. E. (2014). Lignin valorization: Improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843.

- Ramirez-Cadavid, D. A., Cornish, K., & Michel, F. C., Jr. (2017). *Taraxacum koksaghyz* (TK): Compositional analysis of a feedstock for natural rubber and other bioproducts. *Industrial Crops and Products*, 107, 624–640.
- Rochette, C. N., Crassous, J. J., Drechsler, M., Gaboriaud, F., Eloy, M., de Gaudemaris, B., ... & Duval, J. F. (2013). Shell structure of natural rubber particles: Evidence of chemical stratification by electrokinetics and cryo-TEM. *Langmuir*, 29(47), 14655–14665.
- Roy, K., Debnath, S. C., Pongwisuthiruchte, A., & Potiyaraj, P. (2021). Recent advances of natural fibers based green rubber composites: Properties, current status, and future perspectives. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(34), 50866.
- Sattayanurak, S., Sahakaro, K., Kaewsakul, W., Dierkes, W. K., Reuvekamp, L. A., Blume, A., & Noordermeer, J. W. (2020). Synergistic effect by high specific surface area carbon black as secondary filler in silica reinforced natural rubber tire tread compounds. *Polymer Testing*, 81, 106173.
- Schmidt, T., Hillebrand, A., Wurbs, D., Wahler, D., Lenders, M., & Gronover, C. S. (2010a). Molecular cloning and characterization of rubber biosynthetic genes from *Taraxacum koksaghyz*. *Plant Molecular Biology Reporter*, 28, 277–284.
- Schmidt, T., Lenders, M., Hillebrand, A., van Deenen, N., Munt, O., Reichelt, R., ... & Gronover, C. S. (2010b). Characterization of rubber particles and rubber chain elongation in *Taraxacum koksaghyz*. *BMC Biochemistry*, 11, 11.
- Sharples, A. (1918). The laticiferous system of *Hevea brasiliensis* and its protective function. *Annals of Botany*, 32(126), 247–251.
- Siler, D. J., Cornish, K., & Hamilton, R. G. (1996). Absence of cross-reactivity of IgE antibodies from *Hevea brasiliensis* latex allergic subjects with a new source of natural rubber latex from guayule (*Parthenium argentatum*). *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 98(5), 895–902.
- Siler, D. J., Goodrich-Tanrikulu, M., Cornish, K., Stafford, A. E., & McKeon, T. A. (1997). Composition of rubber particles of *Hevea brasiliensis*, *Parthenium argentatum*, *Ficus elastica*, and *Euphorbia lactiflua* indicates unconventional surface structure. *Plant Physiology and Biochemistry*, 36, 881–890.
- Somma, A. M. (2014). Charles Goodyear and the vulcanization of rubber. *Connecticut History Review*, 53(2).
- Soratana, K., Rasutis, D., Azarabadi, H., Eranki, P. L., & Landis, A. E. (2017). Guayule as an alternative source of natural rubber: A comparative life cycle assess-

- ment with Hevea and synthetic rubber. *Journal of Cleaner Production*, 159, 271–280.
- Tang, C., Yang, M., Fang, Y., Luo, Y., Gao, S., Xiao, X., ... & Huang, J. (2016). The rubber tree genome reveals new insights into rubber production and species adaptation. *Nature Plants*, 2, 16073.
- Urrego-Yepes, W., Cardona-Urbe, N., Vargas-Isaza, C. A., & Martínez, J. D. (2021). Incorporating the recovered carbon black produced in an industrial-scale waste tire pyrolysis plant into a natural rubber formulation. *Journal of Environmental Management*, 287, 112292.
- van Beilen, J., & Poirier, Y. (2007a). Guayule and Russian dandelion as alternative sources of natural rubber. *Critical Reviews in Biotechnology*, 27(4), 217–231.
- van Beilen, J., & Poirier, Y. (2007b). Establishment of new crops for the production of natural rubber. *Trends in Biotechnology*, 25(11), 522–529.
- Venkatachalam, P., Thulaseedharan, A., & Raghothama, K. G. (2007). Identification of expression profiles of tapping panel dryness (TPD) associated genes from the latex of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Planta*, 226, 499–515.
- Venkatachalam, P., Thulaseedharan, A., & Raghothama, K. G. (2009). Molecular identification and characterization of a gene associated with the onset of tapping panel dryness (TPD) syndrome in rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) by mRNA differential display. *Molecular Biotechnology*, 41, 42–52.
- Wadeesirisak, K., Castano, S., Berthelot, K., Vaysse, L., Bonfils, F., Peruch, F., ... & Bottier, C. (2017). Rubber particle proteins REF1 and SRPP1 interact differently with native lipids extracted from *Hevea brasiliensis* latex. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 1859(2), 201–210.
- Warmke, H. E. (1943). Macrosporogenesis, fertilization, and early embryology of *Taraxacum kok-saghyz*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 70(2), 164–173.
- Wastie, R. L., Chee, K. H., & Lim, T. M. (1973). Screening clones of *Hevea brasiliensis* for disease resistance—a review. *International Rubber Conference*.
- Whaley, W. G., & Bowen, J. S. (1947). Russian dandelion (*kok-saghyz*): An emergency source of natural rubber. *U.S. Department of Agriculture*.
- Wong, D., Fabito, G., Debnath, S., Anwar, M., & Davies, I. J. (2024). A critical review: Recent developments of natural fiber/rubber reinforced polymer composites. *Cleaner Materials*, 13, 100261.
- Zheng, H., & Yue, D. (2025). Lignin/epoxidized natural rubber compounds based on wet mixing: Impact of epoxidation degree on the interface of compounds. *Materials*, 18, 37.

2. BÖLÜM

AKILLI SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA TERFİ MERKEZLERİNDE YÖNTEM VE UYGULAMALAR: İSKİ KÂĞITHANE ESKİ TERFİ MERKEZİ ÖRNEĞİ

Emrullah AY

İSKİ, Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı

Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,

Mühendislik Fakültesi,

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

<https://orcid.org/0000-0002-4891-3963>

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun yarısı şehirlerde yaşamaktadır. Çok gelişmiş bölgelerde nüfusun yüzde 75'i, az gelişmiş bölgelerde ise yüzde 45'i şehirde bulunmaktadır. BM Nüfus Fonuna göre, Türkiye'de ise şehirleşme oranı yüzde 70 düzeyinde bulunuyor. 2050 yılına gelindiğinde dünya nüfusunun yaklaşık %70'inin şehirlerde yaşayacağını öngörülmektedir (Dunya, 2010). Hızla artan kentleşme, iklim değişikliği ve su kaynaklarının azalması, su yönetimi alanında daha verimli, sürdürülebilir ve dijital odaklı sistemlere duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Akıllı şehir uygulamalarının önemli bileşenlerinden biri olan akıllı su yönetimi, su dağıtımının izlenmesi, yönetilmesi ve optimize edilmesi süreçlerine gelişmiş bilgi teknolojilerini entegre etmektedir. Bu yaklaşım, su şebekelerinin performansını artırmak, kayıpları azaltmak ve enerji tüketimini optimize etmek amacıyla IoT sensörleri, veri analitiği, yapay zekâ modelleri, hidrolik optimizasyon yöntemleri ve SCADA tabanlı kontrol altyapılarını içermektedir.

Terfi merkezleri, içme suyunun şehirlere iletilmesinde kritik bir rol oynayan altyapılardır. Özellikle topoğrafik açıdan karmaşık şehirlerde, suyun barajlardan ve arıtma tesislerinden tüketim noktalarına taşınmasında pompa istasyonları vazgeçilmez bir unsurdur. Elektrik motorları ve pompa sistemleri, bu süreçte en yüksek enerji tüketen bileşenlerdir. Bu nedenle terfi merkezlerinde yapılacak modernizasyon ve enerji verimliliği uygulamaları, su idarelerinin operasyonel maliyetlerini doğrudan etkilemekte ve çevresel etkiler üzerinde belirleyici olmaktadır.

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) bünyesindeki Kağıthane Eski Terfi Merkezi'nde (Şekil 1) yürütülen revizyon çalışmaları örnek alınarak akıllı su yönetimi kapsamında uygulanan yöntemler ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı, yeni nesil yüksek verimli elektrik motorlarının entegrasyonu, SCADA tabanlı dijital izlemenin terfi merkezlerinde enerji verimliliğine katkısını değerlendirmektir. Bölümde kullanılan yöntem ve uygulamalar hem literatür hem de sahadan toplanan verilerle desteklenmiştir.



Şekil 1. Kağıthane Eski Terfi Merkezi Pompa Grubu.

Çalışma, mühendislik temelli bir vaka analizi (case study) yaklaşımıyla tasarlanmıştır. Yöntem, Kağıthane Eski Terfi Merkezi'nin 2021–2024 yılları arasındaki modernizasyon sürecine odaklanmakta; saha incelemeleri, işletme kayıtları, SCADA verileri (Şekil 2) ve enerji tüketim istatistikleri temel veri kaynakları olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2. Kâğıthane Eski Terfi Merkezi SCADA Ekranı.

Çalışmanın veri seti dört temel kaynaktan elde edilmiştir:

- SCADA verileri: Debi, basınç, akım, gerilim ve çalışma saatleri gibi parametreler.
- Elektrik tüketim kayıtları: Aylık toplam tüketim (kWh) ve basılan su miktarları (m³).
- Saha gözlemleri: Motor-pompa yapıları, vibrasyon ve mekanik entegrasyon süreçleri.
- İşletme dokümantasyonu: Motor etiket bilgileri, pompa eğrileri ve bakım kayıtları.

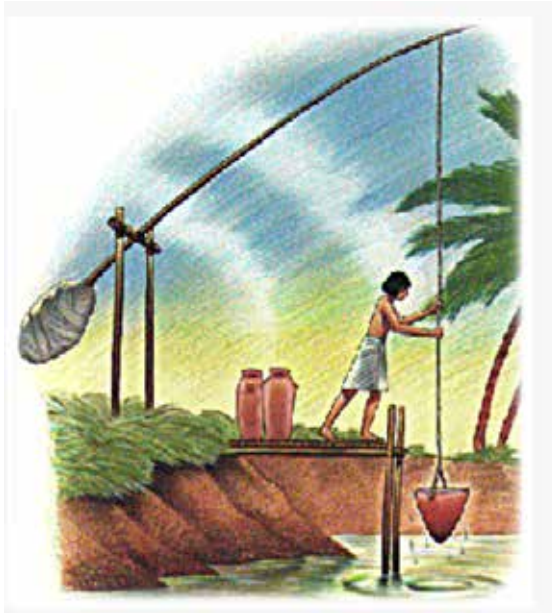
Araştırma modeli, modernizasyon öncesi ve sonrası enerji tüketimi arasındaki farkın hesaplanması, motor verimliliğinin değerlendirilmesine dayanmaktadır.

2. İÇME SUYU YÖNETİMİ

İçme suyu yönetimi, insanlık tarihi boyunca medeniyetlerin yaşamını sürdürabilmesi için geliştirdiği en önemli mühendislik ve altyapı uygulamalarından biridir. Su kaynaklarının yerleşim yerlerine uzak olması, suyun taşınması ve depolanması için farklı dönemlerde çeşitli teknolojilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Anglelakis vd., 2013; Mays, L. W. 2010).

Antik Dönemde, Mezopotamya ve Mısır uygarlıkları kanallar, bentler ve sulama sistemleri inşa ederek hem içme suyunu hem de tarımsal sulamayı sağlayan ilk su altyapılarını kurmuştur. Doğal cazibenin yeterli olmadığı durumlarda, shaduf (Şekil 3) gibi insan gücüyle çalışan su kaldırma mekanizmaları kulla-

nılmıştır (Ann, C. 2024). Roma ve Bizans Dönemi, su yönetim teknolojilerinin en ileri seviyeye ulaştığı dönemlerden biridir. Roma su kemerleri uzun mesafelerden su taşıyabilmiş, gelişmiş kanalizasyon sistemleri kurulmuş ve bazı yapılar günümüze kadar ulaşmıştır (Hodge, A. T. 2002). Bizans'ta ise özellikle İstanbul'da büyük sarnıçlar inşa edilerek yağmur ve yüzey suları depolanmıştır. Roma İmparatorluğu'nun çöküşüyle birlikte su yönetim kalitesi Avrupa'da gerilese de temel bilgi tamamen yok olmamıştır (Angelakis vd. 2005; Burian vd. 2002). Orta Çağ'da, su kirliliği ve yetersiz altyapılar sebebiyle ciddi sağlık sorunları ortaya çıkmış, şehirler suyu genellikle kuyu ve çeşmelerden temin etmiştir. 14. yüzyıldaki veba salgınlarının kirli suyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Rönesans ve Endüstri Devrimi ile birlikte modern su ve kanalizasyon sistemleri yeniden gelişmiş, buhar gücü ve pompa teknolojileri içme suyu dağıtımında büyük ilerleme sağlamıştır. Santrifüj ve sürgülü kanatlı pompaların temelleri de bu dönemde atılmıştır (Van Esch, B. P. M. 1997; Pumps&Systems. 2011). Genel olarak, içme suyu yönetimi tarih boyunca teknolojik gelişmelere paralel olarak büyük değişim geçirmiş; basit mekanik sistemlerden karmaşık hidrolik altyapılara evrilmiştir. Temel amaç, her dönemde suyu güvenli, sürekli ve yeterli miktarda temin etmek olmuştur.



Şekil 3. Shaduf.

Akıllı su yönetimi; modern teknolojilerin su kaynaklarının verimli, sürdürülebilir ve güvenli bir şekilde yönetilmesi için kullanıldığı bütünleşik bir yaklaşımı ifade eder (Kim, J. H. 2019). IoT sensörleri, SCADA sistemleri, dijital izleme, büyük veri analitiği ve uzaktan kontrol mekanizmaları, su kayıplarının tespiti ve enerji tüketiminin azaltılmasında önemli rol oynar. Bu yaklaşım sayesinde arızalar erken tespit edilebilir, su dağıtımı gerçek zamanlı koşullara göre optimize edilebilir ve operasyonel maliyetler düşürülür. Ayrıca karar vericiler, su arz-talep dengelerini daha doğru yöneterek uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlar.

3. AKILLI SU YÖNETİMİ İLE TERFİ MERKEZLERİ

Terfi merkezleri, suyu bir noktadan başka bir noktaya iletmek veya yükseltmek amacıyla kullanılan önemli altyapı tesisleridir. Bu merkezler iki ana çalışma yöntemine dayanır:

Cazibe ile terfi, suyun yerçekimiyle doğal akışına dayanır; kot farkının yeterli olduğu bölgelerde enerji maliyeti yoktur (Aslan, K. 2018; Çelik, S. 2020).

Pompa ile terfi ise suyu istenen basınç ve yüksekliğe taşımak için mekanik pompalar ve elektrik motorları kullanır; bu yöntem enerji tüketimi açısından daha maliyetlidir fakat modern şehirlerde genellikle zorunludur. Pompa seçiminde hidrolik hesaplar, sürtünme kayıpları, sistem eğrileri ve pompaların çalışma karakteristikleri dikkate alınır. Bu yapılar, şebeke güvenliği ve su iletiminin sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Akıllı su yönetimi kavramının terfi merkezlerine uygulanması, enerji tasarrufu ve operasyonel verimlilik açısından büyük bir dönüşüm yaratır. Geleneksel terfi merkezleri sabit çalışma prensipleriyle yönetilirken, akıllı terfi merkezleri gerçek zamanlı veri analizine dayalı adaptif kontrol yapılarıyla çalışır (Şekil 4). SCADA sistemleri, sensörlerden alınan basınç, debi, motor akımı, arıza sinyalleri gibi verileri merkeze iletir. Böylece pompaların çalışma süreleri optimize edilir, su kayıpları azaltılır, gereksiz enerji tüketimi engellenir ve bakım süreçleri öngörülebilir hâle gelir. Bu dönüşüm, hem maliyet tasarrufu sağlar hem de çevresel sürdürülebilirliği destekler (Karaca, G. 2020).

Özellik	Geleneksel Terfi Merkezleri	Akıllı (Yenilikçi) Terfi Merkezleri
Veri Toplama ve İzleme	Basit analog cihazlar; manometreler ve kısıtlı SCADA altyapısı ile sınırlı.	IoT tabanlı sensörler, bulut veya entegre SCADA sistemleriyle gerçek zamanlı ve sürekli veri izleme.
Kontrol ve Otomasyon	Genellikle sabit hızda çalışan pompalar ve manuel ayarlamalar (on/off, vana ayarları).	Değişken hızlı sürücüler (VFD), otomatik basınç/debi ayarı, yapay zeka destekli optimizasyon ve uzaktan kontrol imkânı.
Bakım Yaklaşımı	Kestirimden ziyade periyodik veya arıza olduğunda müdahale (reaktif bakım).	Öngörücü bakım (predictive maintenance), arıza oluşmadan veri analitiği ile sorun tespiti.
Enerji Verimliliği	Hedeflenmiş bir optimizasyon olmaksızın sabit çalışma; çoğu zaman gereksiz enerji tüketimi.	Pompa çalışma noktaları sürekli optimize edilir; enerji tüketimi istatistikleri anlık izlenerek maliyetler düşürülür.
Esneklik ve Uyum	Talep dalgalanmalarına hızlı yanıt veremez, manuel müdahale gerektirir.	Sensör ve kontrol birimleri sayesinde anlık (otonom veya yarı otonom) uyarılma; kesintisiz ve doğru basınç/debi yönetimi.
Maliyet Etkinliği	Başlangıç yatırımı daha düşük gibi görünse de zamanla enerji ve bakım maliyetleri yüksek olabilir.	Başlangıç maliyeti daha yüksek, ancak enerji, bakım ve işletme giderleri uzun vadede daha düşük; toplam sahip olma maliyeti avantajlı.

Şekil 4. Geleneksel Terfi Merkezleri ve Akıllı Terfi Merkezleri Karşılaştırması.

4. KÂĞITHANE ESKİ TERFİ MERKEZİ ENERJİ VERİLERİ TAKİBİ

Kâğıthane Eski Terfi Merkezi 1974 yılında Devlet Su İşleri(DSİ) tarafından Kâğıthane ilçe sınırları içerisinde yapılmış ardından işletilmesi İSKİ'ye devredilmiştir. Terfi merkezi Kâğıthane İçme Suyu Arıtma Tesisinden beslenip 6.000m³ depo ve 3.150 kVA kurulu güce sahiptir. Bu tesis, İstanbul'un önemli bölgelerine su iletimi sağlayan merkezi bir pompa istasyonudur. Çalışmada, Tesisin mevcut motor/pompa yapısı, Hat basınçları ve debi profilleri, Kullanılan motorların verim durumu, Arızalar, titreşim sorunları ve enerji kayıpları detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Revizyon kapsamında eski elektrik motorları sökülmüş, yüksek verimli yeni motorlar ve sürücüler devreye alınmış, mekanik montaj ve SCADA bağlantıları tamamlanmıştır. Bu süreç, enerji tüketimi ve sistem performansı açısından önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Terfi merkezinin 2021, 2022, 2023 ve 2024 yılı enerji tüketim ve basılan su miktarı verileri incelenmiştir.

Tablo 1'de pandemi sonrası normalleşme döneminin başladığı yıl olan 2021 yılı verileri verilmiştir.

Tablo 1. 2021 yılı basılan suya göre enerji tüketim tablosu.

AYLAR	AYLIK BASILAN SU(m ³)	AYLIK ENERJİ TÜKETİMİ(kWh)	BİRİM BAŞINA BASILAN ENERJİ TÜKETİMİ(kWh/m ³)
OCAK	5.101.836	1.162.529,25	0,228
ŞUBAT	4.689.590	1.097.445,00	0,234
MART	5.307.498	1.246.950,75	0,235
NİSAN	5.107.570	1.192.898,00	0,234
MAYIS	5.433.000	1.266.133,00	0,233
HAZİRAN	5.473.362	1.268.850,00	0,232
TEMMUZ	5.815.856	1.347.898,00	0,232
AĞUSTOS	6.304.216	1.484.664,00	0,236
EYLÜL	5.820.216	1.392.058,00	0,239
EKİM	5.714.584	1.318.150,00	0,231
KASIM	5.424.740	1.243.492,13	0,229
ARALIK	5.519.164	1.328.517,37	0,241

Tablo 2’de 2022 yılı verileri verilmiştir. Revize çalışmaları 2022 yılında tamamlanmıştır.

Tablo 2. 2022 yılı basılan suya göre enerji tüketim tablosu.

AYLAR	AYLIK BASILAN SU(m ³)	AYLIK ENERJİ TÜKETİMİ(kWh)	BİRİM BAŞINA BASILAN ENERJİ TÜKETİMİ(kWh/m ³)
OCAK	5.313.976	1.239.723	0,233
ŞUBAT	4.705.936	1.103.103	0,234
MART	5.546.167	1.238.024	0,223
NİSAN	5.460.873	1.198.513	0,219
MAYIS	6.141.716	1.374.170	0,224
HAZİRAN	6.288.492	1.145.055	0,182
TEMMUZ	6.255.749	1.127.426	0,180
AĞUSTOS	6.528.922	1.184.999	0,181
EYLÜL	6.260.967	1.143.116	0,183
EKİM	6.419.119	1.117.462	0,174
KASIM	6.015.730	1.028.811	0,171
ARALIK	5.996.710	1.055.465	0,176

Tablo 3'te 2023 verileri ve Tablo 4'te 2024 verileri verilmiştir.

Tablo 3. 2023 yılı basılan suya göre enerji tüketim tablosu.

AYLAR	AYLIK BASILAN SU(m ³)	AYLIK AKTİF ENERJİ TÜKETİMİ(kWh)	BİRİM BAŞINA BASILAN ENERJİ TÜKETİMİ(kWh/m ³)
OCAK	5.861.355	1.284.237	0,219
ŞUBAT	5.198.688	1.141.225	0,220
MART	5.961.808	1.276.733	0,214
NİSAN	5.627.936	1.235.592	0,220
MAYIS	6.104.518	1.340.817	0,220
HAZİRAN	6.030.360	1.047.206	0,174
TEMMUZ	6.528.884	1.137.755	0,174
AĞUSTOS	6.589.234	1.151.720	0,175
EYLÜL	6.178.758	1.083.065	0,175
EKİM	6.294.167	1.107.002	0,176
KASIM	5.945.113	1.047.144	0,176
ARALIK	6.094.144	1.071.404	0,176

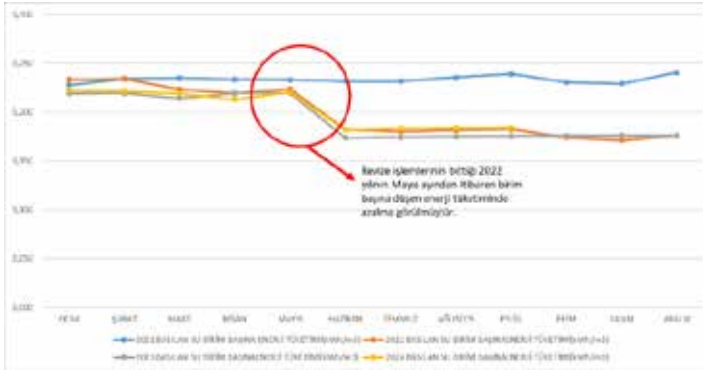
Tablo 4: 2024 yılı basılan suya göre enerji tüketim tablosu.

AYLAR	AYLIK BASILAN SU(m ³)	AYLIK AKTİF ENERJİ TÜKETİMİ(kWh)	BİRİM BAŞINA BASILAN ENERJİ TÜKETİMİ(kWh/m ³)
OCAK	6.050.305	1.345.077	0,222
ŞUBAT	5.687.980	1.260.958	0,222
MART	6.087.135	1.334.684	0,219
NİSAN	5.941.748	1.266.185	0,213
MAYIS	6.444.808	1.422.918	0,221
HAZİRAN	6.568.709	1.194.404	0,182
TEMMUZ	6.945.966	1.275.237	0,184
AĞUSTOS	6.767.386	1.243.863	0,184
EYLÜL	6.477.575	1.191.726	0,184

Aylık basılan su miktarı başına düşen enerji miktarının yaz aylarına doğru azalmasının bir diğer nedeni kış ve bahar aylarında yağışlarında etkisiyle barajların dolması ve suyun cazibesinden faydalanılmasıdır. Ayrıca terfi merkezinin beslediği bölgeler, şehrin nüfus yoğunluğunun gün içerisinde artış gösteren

bölgelerden olmasından kaynaklı basılan su miktarlarının arttığı görülmektedir.

Şekil 5’de görüldüğü üzere motor değişimi sonrası enerji tüketiminde özellikle yaz aylarında %20 civarında azalma tespit edilmiştir. “Kâğıthane Eski Terfi Merkezi Revizyon İşlerinin Yapılması” adıyla 15.543.550,10 Türk Lirası yaklaşık maliyeti ile çıkan ihale 10.964.471,00 Türk Lirası sözleşme bedeliyle ihale tamamlanmıştır. 2021 yılı enerji birim fiyatıyla 5 senede kendini amorti etmesi beklenirken artan enerji maliyetleri sebebiyle 3 senede amorti etmesi beklenmektedir. Ayrıca, sistemin sürekli izlenebilirliği ve otomasyon altyapısıyla entegre çalışabilmesi, arızaların önceden tespit edilip giderilmesine olanak tanımıştır. Böylece, bakım maliyetlerinde ve beklenmeyen kesinti sürelerinde belirgin azalma sağlanmıştır.



Şekil 5: 2021,2022,2023 ve 2024 yılları arasında basılan su birim başına enerji tüketim grafiği.

Şekil 6a’da revizyon işlemleri sonucu terfi merkezinde motor/pompa gruplarının görünümü verilmiştir. Ayrıca Şekil 6b’de de revizyon işlemleri sonrası pano odasından orta gerilim modüler hücreler görülmektedir.



Şekil 6. Revizyon çalışmalarından sonra motor/pompa yapısının dışarıdan görünümü(a), Revizyon sonrası pano odası görünümü(b)

Eski ve yeni motorların enerji tüketimlerinin karşılaştırmalı analizleri sunulmuştur. 2021–2024 yılları arasında, m^3 başına enerji tüketimi ölçülmüştür. Revizyon öncesi ortalama $0.23 \text{ kWh}/m^3$ olan tüketim, revizyon sonrası $0.18 \text{ kWh}/m^3$ seviyesine düşmüştür. Ayrıca, motorların değiştirilmesi TEİAŞ karbon emisyon faktörleri (CO_2/kWh) verilerine göre basılan su miktarına (m^3) göre yaklaşık $0,013 \text{ kgCO}_2/kWh$ bir azalma tespit edilmiştir. Bu sonuç, IPCC raporundaki enerji verimliliği artırıcı önlemlerin iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araç olduğuna dair bulguları desteklemektedir (Chen vd. 2021).

Yaklaşık %20 birim başına enerji tasarrufu sağlanan çalışma da ayrıca pompa çalışma süreleri, motor sıcaklıkları, basınç değerleri ve debi profilleri incelenmiş; revizyon sonrası sistem kararlılığının arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen verimlilik sonuçları literatürle karşılaştırılmış, enerji tasarrufunun nedenleri analiz edilmiştir (Brown vd. 2019; Lopes vd. 2016) Yeni motorların yüksek verim sınıfı, Sürücü kontrollü çalışma, Hidrolik kayıpların azalması, gibi etkenlerin tasarrufa katkı sağladığı değerlendirilmiştir.

Ayrıca modernizasyonun sadece enerji değil, arıza risklerinde azalma, bakım sıklığında düşüş ve operasyonel kontrol kolaylığı gibi ek yararlar sağlamıştır (IPCC. 2018).

SONUÇ

Çalışmada; Yeni nesil motorların kullanımının enerji verimliliğini önemli ölçüde artırdığı, SCADA ve akıllı kontrol sistemleriyle birleştiğinde işletme maliyetlerinin düştüğü, Kâğıthane Eski Terfi Merkezi özelinde elde edilen başarıların diğer terfi merkezlerine de uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Özetle, Uygun terfi merkezlerinde benzer modernizasyon çalışmalarının yapılması, Enerji verimliliği göstergelerinin düzenli izlenmesi, Yoğun tüketimli tesislerde motor revizyonlarının önceliklendirilmesi, SCADA veri analitiğinin daha güçlü kullanılması enerji verimliliğini arttıracaktır.

KAYNAKÇA

- Angelakis, A., De Feo, G., Laureano, P., & Zourou, A. (2013). Minoan and Etruscan Hydro-Technologies, *Water*, 5(3), 972–987.
- Angelakis, A. N., Koutsoyiannis, D., Tchobanoglous, G., 2005, Urban wastewater and stormwater technologies in ancient Greece, *Water Research*, 39(1), 210–220.
- Ann, C. History of water pumps. eHow. Retrieved from https://www.ehow.com/facts_5031932_history-water-pumps.html.
- Aslan, K. (2018). Cazibe esaslı su terfi sistemlerinin akış verimliliğinin değerlendirilmesi [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi].
- Brown, A., Green, J., & Smith, R. (2019). Energy efficiency in water utilities: Best practices and strategies. *Journal of Environmental Engineering*, 145(5), 45–57.
- Burian, S. J., & Edwards, F. G. (2002). Historical perspectives of urban drainage. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage* (pp. 1–16).
- Chen, H., Zhang, Y., & Liu, Z. (2021). Digital solutions for energy optimization in water management. *Renewable Energy Systems*, 32(4), 123–136.
- Çelik, S. (2020). Doğal cazibe sistemleriyle su transferinin ekonomik ve çevresel etkileri [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Dunya. (2010). Retrieved from <https://www.dunya.com/gundem/dunya-nufusunun-yarisi-sehirlerde-haberi-131076>.
- Hodge, A. T. (2002). Wells and cisterns. In A. T. Hodge (Ed.), *Roman aqueducts and water supply* (pp. 48–67). Duckworth.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C: An

IPCC special report. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Karaca, G. (2020). Akıllı su yönetimi ve IoT tabanlı pompa istasyonlarının karşılaştırılmalı analizi [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Kim, J. H. (2018). What is smart water management [Blog post]. Development Asia. Retrieved from <https://development.asia/explainer/what-smart-water-management>.
- Lopes, A., Pereira, J., & Martins, F. (2016). Economic benefits of high-efficiency motors in water pumping systems. *Energy Economics*, 54, 80–90.
- Mays, L. W. (2010). A brief history of water technology during antiquity: Before the Romans. In L. W. Mays (Ed.), *Ancient water technologies* (pp. 1–28). Springer.
- Pumps&Systems. (2011). The history of pumps: Through the years. Pumps & Systems. Retrieved from <https://www.pumpsandsystems.com/history-pumps-through-years>.
- Van Esch, B. P. M. (1997). Simulation of three-dimensional unsteady flow in hydraulic pumps, In: Van Esch, B. P. M. (ed), Chapter 1 , 12–15.

3. BÖLÜM

BOR KATKILI POLYESTER YALITKANLARDA YÜZEY ÖZELLİKLERİ, HİDROFOBİKLİK VE DEGRADASYON MEKANİZMALARI

Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ADIGÜZEL

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
<https://orcid.org/0000-0003-0687-2267>

Prof. Dr. Aysel ERSOY

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
<https://orcid.org/0000-0003-1164-7187>

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin güvenli, kesintisiz ve sürdürülebilir bir biçimde iletilmesi ve dağıtılması, modern güç sistemlerinin temel gereksinimlerinden biridir. Artan enerji talebi, yüksek gerilim seviyelerinde çalışan iletim ve dağıtım sistemlerinin yaygınlaşmasına yol açarken; bu sistemlerde kullanılan yalıtım malzemelerinin performansı, sistem güvenilirliği açısından kritik bir parametre haline gelmiştir. Yalıtım sistemlerinde meydana gelen arızalar yalnızca ekonomik kayıplara değil, aynı zamanda can ve mal güvenliği açısından ciddi risklere de neden olmaktadır (ERSOY et al., 2008).

Geleneksel olarak elektrik enerji sistemlerinde cam ve porselen esaslı yalıtkanlar tercih edilmiştir. Bu yalıtkanlar yüksek mekanik dayanım ve çevresel kararlılık gibi avantajlara sahip olmakla birlikte; yüksek ağırlıkları, kırılğan

yapıları ve üretim-taşıma maliyetleri önemli dezavantajlar oluşturmaktadır. Bu nedenlerle son yıllarda polimerik yalıtkanlar, özellikle orta ve yüksek gerilim uygulamalarında giderek daha yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Ugur et al., 2003).

Polimerik yalıtkanlar; düşük yoğunluk, yüksek mekanik dayanım, tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı gibi avantajları sayesinde enerji sistemlerinde önemli bir alternatif haline gelmiştir. Bununla birlikte, polimer esaslı yalıtkanların performansını sınırlayan en önemli faktörlerden biri yüzeyde iz oluşumu (tracking) ve erozyon olgusudur. Bu problemler, polimerik yalıtkanların uzun süreli elektriksel stres altında çalışma ömürlerini doğrudan etkilemektedir (Risino Beng, 1994).

Yüzey iz oluşumu, elektrik alan etkisi altında yalıtkan yüzeyinde meydana gelen lokal yüzey deşarjları, elektro-termal reaksiyonlar ve karbonlaşma süreçlerinin birleşimi sonucu oluşmaktadır. Nemli ve kirli çevre koşullarında yalıtkan yüzeyinde oluşan ince iletken film, kaçak akımın artmasına neden olmakta; bu durum mikro deşarjların başlama koşullarını kolaylaştırmaktadır. Zamanla bu mikro deşarjlar yüzeyde karbon açısından zengin iletken yolların oluşmasına yol açmakta ve yalıtkanın yüzey direncini ciddi biçimde düşürmektedir (Dutta and Dwivedi, 2010).

Yüzey iz oluşumu ilerledikçe, yalıtkan yüzeyinde oluşan karbon izleri elektrotlar arasında sürekli bir iletken yol oluşturabilmekte ve bu durum ani elektriksel delinmelere neden olabilmektedir. Bu nedenle yüzey iz oluşumu, polimerik yalıtkanların servis ömrünü belirleyen en kritik yaşlanma mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir (Ersoy et al., 2004; Risino Beng, 1994).

Polyester esaslı yalıtkanlar, düşük maliyetleri, iyi dielektrik özellikleri ve kimyasal dayanımları nedeniyle küçük ve orta ölçekli elektrikli ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doymamış polyester reçineler, çapraz bağlanabilir yapıları sayesinde mekanik olarak kararlı ve elektriksel açıdan yeterli performans sunmaktadır. Ancak literatürde yapılan çok sayıda çalışma, polyester esaslı yalıtkanların yüzey iz oluşumuna karşı sınırlı direnç gösterdiğini ve uzun süreli elektriksel stres altında karbonlaşma eğiliminin belirgin olduğunu ortaya koymaktadır (ERSOY et al., 2008; Malik et al., 2018).

Bu sınırlamaların aşılabilmesi için polyester reçinelere çeşitli katkı malzemeleri ilave edilmesi yaygın bir yaklaşım olarak benimsenmiştir. Katkı malzemeleri; polimer matrisin elektriksel, termal ve yüzey özelliklerini iyileştirerek iz oluşum süresini uzatmayı ve degradasyon mekanizmasını daha kontrollü hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda bor bileşikler, polimerik yalıtkan sistemlerde son yıllarda dikkat çeken katkı malzemeleri arasında yer almaktadır

(Ersoy et al., 2004).

Bor bileşikler; yüksek ısıl kararlılıkları, alev geciktirici özellikleri ve elektrik alan altında enerji absorplama kapasiteleri nedeniyle polimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle boraks (tinkal) minerali, polimer matrislerle uyumlu yapısı ve yüksek polarizasyon kabiliyeti sayesinde elektriksel yalıtım uygulamalarında önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde bor katkısının polyester esaslı yalıtkanların yanmazlık özelliklerini iyileştirdiği, yüzey iz oluşum süresini uzattığı ve sistem güvenilirliğini artırdığı rapor edilmiştir (ERSOY et al., 2008; Ersoy et al., 2004; Malik et al., 2018).

Ersoy ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bor katkılı polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumu davranışının katkısız sistemlere kıyasla belirgin biçimde farklılaştığını göstermektedir. Bu çalışmalarda bor katkısının yüzeydeki elektriksel enerji yoğunlaşmasını azalttığı, karbonlaşma sürecini zamana yaydığı ve ani arıza riskini düşürdüğü ortaya konmuştur (ERSOY et al., 2008; Malik et al., 2018). Ayrıca bor katkısının yüzey hidrofobikliğin korunmasına katkı sağladığı ve elektrolit film oluşumunu sınırlandırdığı belirtilmiştir.

Bununla birlikte literatürdeki mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, bor katkılı polimerik yalıtkanları ya yalnızca mekanik özellikler ya da yalnızca elektriksel performans açısından ele almaktadır. Yüzey hidrofobik davranışı, kaçak akım karakteristikleri, degradasyon mekanizmaları ve istatistiksel güvenilirlik analizlerini birlikte değerlendiren bütüncül çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle yüzey iz oluşumu sürecinin yalnızca deneysel gözlemlerle değil, aynı zamanda Weibull istatistiksel dağılımı gibi güvenilirlik temelli yöntemlerle değerlendirilmesi literatürde önemli bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır (Risino Beng, 1994; Ugur et al., 2003).

Bu kitap bölümünün amacı, bor katkılı polyester yalıtkanlarda yüzey özellikleri, hidrofobiklik davranışı ve degradasyon mekanizmalarını ASTM D2303 eğik düzlem yüzey iz oluşumu testleri, yüzey gözlemleri ve Weibull istatistiksel analizleri ile birlikte değerlendirerek literatürdeki bu boşluğu doldurmaktır. Çalışma kapsamında bor katkısının yalnızca iz oluşum süresini uzatıcı bir etki sunup sunmadığı değil; aynı zamanda degradasyon mekanizmasının karakterini nasıl değiştirdiği ve sistem güvenilirliğine nasıl yansıdığı da bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmaktadır.

Bu yönüyle kitap bölümü, bor katkılı polyester yalıtkanların güç sistemlerinde kullanım potansiyelini hem deneysel hem de istatistiksel açıdan değerlendiren kapsamlı bir kaynak niteliği taşımaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Polyester Reçine ve Bor Katkı Malzemesi

Bu çalışmada matris malzemesi olarak doymamış polyester (UP – Unsaturated Polyester) reçine kullanılmıştır. Doymamış polyester reçineler, ana zincir yapılarında bulunan doymamış çift bağlar sayesinde çapraz bağlanabilen termoset polimerler sınıfına girmektedir. Bu özellikleri sayesinde mekanik dayanım, ısıl kararlılık ve elektriksel yalıtım performansı açısından elektrik ve elektronik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Lv et al., 2005; Petreus et al., 2005).

Doymamış polyesterlerin kimyasal yapısı; glikol, doymamış dikarboksilik asit ve doymuş dikarboksilik asit bileşenlerinden oluşmaktadır. Zincir boyunca yer alan C=C çift bağları, sertleştirici sistemler yardımıyla üç boyutlu bir ağ yapısına dönüşmekte ve bu durum malzemenin mekanik ve dielektrik özelliklerini belirgin biçimde etkilemektedir. Kürlenmiş polyester reçineler, düşük dielektrik kayıp faktörü, yeterli dielektrik dayanım ve iyi yüzey sertliği gibi özellikler sunmaktadır (ERSOY et al., 2007).

Bununla birlikte, polyester reçinelerin elektriksel stres altında yüzey iz oluşumuna karşı sınırlı direnç gösterdiği bilinmektedir. Elektrik alan etkisi altında yüzeyde oluşan mikrodeşarjlar, zamanla polimer zincirlerinde kopmalara, serbest radikal oluşumuna ve karbonlaşmaya neden olmaktadır. Bu durum, yüzey direncinin azalmasına ve iletken izlerin oluşmasına yol açmaktadır (Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bu dezavantajları azaltmak amacıyla polyester reçinelere inorganik katkı malzemeleri ilave edilmesi yaygın bir yaklaşımdır. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak boraks (tinkal) minerali tercih edilmiştir. Tinkal minerali, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kimyasal formülüne sahip olup yüksek bor içeriği, iyi ısıl kararlılığı ve uygun partikül morfolojisi sayesinde polimer matrislerle uyumlu bir yapı sergilemektedir (Ersoy et al., 2004).

Boraksın elektriksel yalıtım uygulamalarında tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, yüksek bağl dielektrik sabitine sahip olmasıdır. Polyester reçinelerin bağl dielektrik sabiti genellikle 3–4 aralığında iken, bor içeren minerallerin bu değeri belirgin biçimde daha yüksektir. Bu fark, elektrik alan altında katkılı kompozit yapı içerisinde farklı bir polarizasyon davranışının ortaya çıkmasına neden olmaktadır (ERSOY et al., 2007; Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bor katkısı, elektrik alan altında yüzeyde biriken enerjinin lokal bölgelerde yoğunlaşmasını engelleyerek daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktadır.

Bu durum, iz oluşum mekanizmasını doğrudan etkilemekte; ani karbonlaşma yerine daha kontrollü bir enerji dağılımı ve erozyon karakterli bir yüzey bozunması ortaya çıkmaktadır. Literatürde bor katkılı polyester sistemlerin hem alev geciktirici özellikler hem de elektriksel dayanım açısından avantaj sağladığı rapor edilmiştir (ERSOY et al., 2007; Ersoy et al., 2004; Mukden Ugur JUSc, 1997).

2.2. Numune Hazırlama Prosedürü

Deneysel çalışmalarda kullanılan polyester kompozit numuneler, katkısız (%0 bor) ve ağırlıkça %1.0 ile %1.5 bor katkılı olacak şekilde üç farklı grup halinde hazırlanmıştır. Bor katkı oranları, literatürde önerilen ve yüzey iz oluşumu üzerinde anlamlı etki gösterdiği bilinen değerler dikkate alınarak seçilmiştir (Dutta and Dwivedi, 2010; ERSOY et al., 2008).

Numune hazırlama sürecinde öncelikle doymamış polyester reçine, oda sıcaklığında kontrollü koşullar altında tartılmış ve içerisine belirlenen oranlarda boraks minerali kademeli olarak ilave edilmiştir. Bor partiküllerinin polimer matris içerisinde homojen şekilde dağılması, yüzey iz oluşumu davranışının doğru biçimde değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle karıştırma işlemi, düşük hızda mekanik karıştırıcı kullanılarak ve topaklanma oluşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Katkı malzemesinin homojen dağılımının ardından sertleştirici sistem ilave edilmiştir. Sertleştirici olarak metil etil keton peroksit (MEKP), hızlandırıcı olarak ise kobalt esaslı bileşikler kullanılmıştır. Sertleştirici ve hızlandırıcı oranları, üretici firma önerileri ve daha önce yapılan deneysel çalışmalar dikkate alınarak sabit tutulmuştur (ERSOY et al., 2008).

Hazırlanan karışımlar, yüzey pürüzlülüğü minimum olacak şekilde cam kaplılar arasına dökülmüş ve hava kabarcığı oluşumunu önlemek amacıyla kontrollü biçimde yerleştirilmiştir. Numune boyutları ASTM D2303 standardına uygun olacak şekilde yaklaşık 100–120 mm uzunluk, 50–55 mm genişlik ve 9 mm kalınlıkta seçilmiştir (Dutta and Dwivedi, 2010).

Kürleme işlemi, 45 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık, polyester reçinenin tam kürlenmesini sağlarken bor katkısının termal bozunmaya uğramasını engelleyecek şekilde belirlenmiştir. Kürleme sonrası numuneler oda sıcaklığında soğutulmuş ve deneyler öncesinde yüzey temizliği yapılmıştır.

Numune hazırlama sürecinde tüm gruplar için aynı prosedür uygulanarak deneysel sonuçların karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Böylece elde edilen fark-

ların yalnızca bor katkı oranına bağlı olduğu garanti altına alınmıştır.

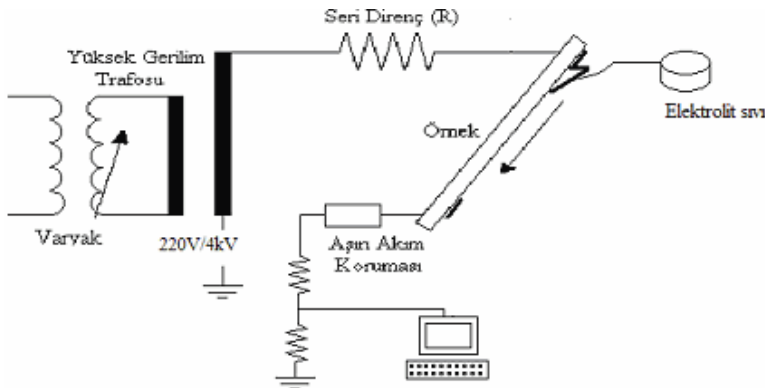
2.3 ASTM D2303 Eğik Düzlem Yüzey İz Oluşumu Test Düzeneği

Polyester ve bor katkılı polyester numunelerin yüzey iz oluşumu davranışını değerlendirmek amacıyla ASTM D2303 standardına uygun eğik düzlem yüzey iz oluşumu testi uygulanmıştır. Bu test yöntemi, sıvı kontaminasyon koşulları altında polimerik yalıtkanların yüzey dayanımını değerlendirmek için en yaygın kullanılan standartlardan biridir (Dutta and Dwivedi, 2010).

Test düzeneğinde numuneler belirli bir açıyla yerleştirilmiş ve üst elektrot ile alt elektrot arasında alternatif akım (AC) gerilimi uygulanmıştır. Bu çalışmada uygulanan test gerilimi 4 kV AC olarak seçilmiştir. Elektrolit olarak %0.1 amonyum klorür (NH_4Cl) içeren çözelti kullanılmış ve akış hızı 36 ml/saat olarak ayarlanmıştır. Bu parametreler, literatürde polyester esaslı yalıtkanlar için önerilen ve iz oluşumunu hızlandıran koşulları temsil etmektedir (Dutta and Dwivedi, 2010; ERSOY et al., 2008).

Elektrolit akışı, numune yüzeyinde iletken bir film oluşturarak yüzey deşarjlarının başlamasına neden olmaktadır. Elektrik alan etkisi altında bu film üzerinde oluşan mikro deşarjlar, zamanla karbonlaşma ve iz oluşumuna yol açmaktadır. İz oluşumu kriteri, yüzeyde oluşan karbonlaşmanın elektrotlar arasındaki mesafeyi köprülemesi veya sürekli iletken bir yol oluşturması olarak tanımlanmıştır.

Deneyler sırasında yüzeyde meydana gelen iz oluşumu, akım dalga şekilleri ve deney süresi sürekli olarak izlenmiştir. Her bir bor katkı oranı için birden fazla numune test edilerek istatistiksel değerlendirme yapılmasına olanak sağlanmıştır.



Şekil 1. ASTM D2303 eğik düzlem yüzey iz oluşumu test düzeneğinin şematik görünümü(Ersoy et al., 2007).

3. YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE HİDROFOBİKLİK

Polimerik yalıtkan malzemelerde yüzey özellikleri, elektriksel performansı belirleyen en kritik parametreler arasında yer almaktadır. Özellikle dış ortam koşullarında çalışan yalıtkanlarda yüzeyin hidrofobik veya hidrofilik karakteri; yüzeyde elektrolit film oluşumu, kaçak akım davranışı ve yüzeydeşarjlarının başlama koşulları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Gubanski, 2005; Lv et al., 2005). Bu nedenle yüzey enerjisi dağılımı ve hidrofobiklik davranışının doğru şekilde anlaşılması, yüzey iz oluşumu (tracking) ve erozyon mekanizmalarının açıklanmasında temel bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.1 Polimerik Yalıtkanlarda Yüzey Enerjisi ve Islanabilirlik

Polimer yüzeylerinde yüzey enerjisi, yüzeydeki moleküllerin bağlanma durumları ve polarizasyon özellikleri tarafından belirlenmektedir. Düşük yüzey enerjisine sahip yüzeyler genellikle hidrofobik davranış sergilerken, yüksek yüzey enerjisine sahip yüzeyler hidrofilik karakter göstermektedir. Hidrofobik yüzeylerde sıvılar damlacık formunda kalmakta, elektrolit film oluşumu sınırlanmakta ve yüzeyde sürekli bir iletken yol oluşması geciktirilmektedir (Easterling, 1972).

Polyester esaslı yalıtkanlar, başlangıçta orta düzeyde hidrofobik özellik göstermekle birlikte elektriksel stres, UV ışınımı ve çevresel kirleticiler etkisi altında bu özelliklerini zamanla kaybedebilmektedir. Elektrik alan etkisi altında yüzeyde meydana gelen mikrodeşarjlar, polimer zincirlerinde oksidasyon ve bağ kopmalarına yol açarak yüzey enerjisinin artmasına neden olmaktadır. Bu süreç sonucunda yüzey hidrofilik karakter kazanmaya başlamakta ve iz oluşumu için uygun koşullar oluşmaktadır (Gubanski, 2005; Tokoro et al., 2005).

Bor katkısının bu noktadaki rolü, yüzey enerjisi dağılımını değiştirmesi ve elektrik alan altında farklı bir polarizasyon davranışı oluşturmasıdır. Bor içeren minerallerin yüksek dielektrik sabiti, kompozit yapı içerisinde elektrik alan çizgilerinin yeniden dağılımına neden olmakta ve yüzeyde lokal enerji yoğunlaşmalarını azaltmaktadır.

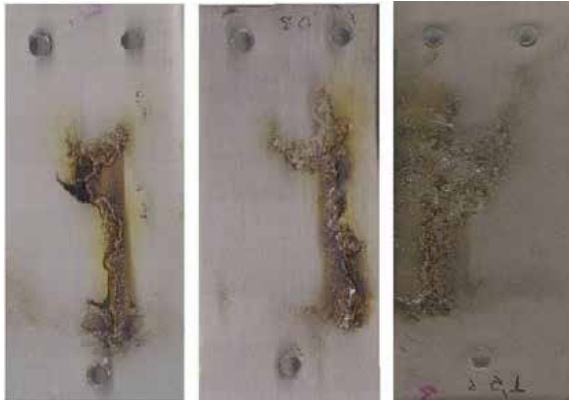
3.2 Hidrofobik–Hidrofilik Dönüşüm Mekanizması

Polimerik yalıtkanlarda hidrofobik–hidrofilik dönüşüm, genellikle elektriksel yaşlanma sürecinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Başlangıçta hidro-

fobik olan bir yüzey, elektriksel stres altında zamanla hidrofilik hale gelmekte; bu durum kaçak akımın artmasına ve yüzey deşarjlarının süreklilik kazanmasına neden olmaktadır (“IEC 60112:2003+AMD1:2009 CSV | IEC,” n.d.).

Katkısız polyester numunelerde yapılan deneyler, yüzey iz oluşumunun genellikle dar bir bölgede yoğunlaştığını ve karbonlaşmanın lokal olarak geliştiğini göstermektedir. Bu durum, yüzey enerjisinin belirli noktalarda yoğunlaştığını ve hidrofobik özelliğin hızla kaybolduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık bor katkılı polyester numunelerde yüzey iz oluşumunun daha geniş bir alana yayıldığı, ancak karbonlaşmanın daha sınırlı ve kontrollü gerçekleştiği gözlemlenmiştir (ERSOY et al., 2008, 2007).

Bu davranış, bor katkısının yüzeydeki elektriksel enerjiyi daha geniş bir alana yayarak ani hidrofilik dönüşümü geciktirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla bor katkısı, yüzeyde iz oluşumuna neden olan elektro-kimyasal reaksiyonların hızını düşürmekte ve yüzey bozunmasını zamana yaymaktadır.



Şekil 2. Katkısız ve bor katkılı polyester numunelerde yüzey iz oluşumu sonrası yüzey görüntüleri[(Ersoy et al., 2007)].

3.3 Bor Katkısının Yüzey Polarizasyonuna Etkisi

Bor katkısının yüzey özellikleri üzerindeki etkisi yalnızca mekanik veya kimyasal değil, aynı zamanda elektriksel polarizasyon temellidir. Bor minerallerinin yüksek polarizasyon kabiliyeti, alternatif elektrik alan altında yüzeyde biriken yüklerin yeniden dağılımına neden olmaktadır. Bu durum, yüzeydeki elektrik alan şiddetinin lokal olarak aşırı yükselmesini engellemektedir (“D257 Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials,” n.d.; Malik et al., 2018).

Elektrik alan altında bor katkılı polyester yüzeylerde gözlenen bu yeniden

dağılım, kaçak akımın zamana bağlı değişimini de etkilemektedir. Katkısız numunelerde kaçak akım genellikle ani artışlar göstermekte ve bu artışlar iz oluşumunun başlangıcı ile doğrudan ilişkilidir. Buna karşılık bor katkılı numunelerde kaçak akım artışı daha yumuşak ve kademeli bir karakter sergilemektedir (ERSOY et al., 2007; Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bu durum, bor katkısının yüzey iz oluşumu sürecini doğrudan etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda degradasyon mekanizmasını iz oluşumundan erozyon karakterine doğru kaydırıldığını göstermektedir. Erozyon karakterli yüzey bozunması, ani arıza riskini azaltan daha güvenli bir yaşlanma süreci olarak değerlendirilmektedir.

3.4 Yüzey İz Oluşumu ve Hasar Dağılımının Karşılaştırılması

Bor katkılı ve katkısız polyester numunelerde yüzey iz oluşumunun nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla iz boyu ve hasar alanı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bor katkısının iz boyunu artırmasına rağmen hasar alanını önemli ölçüde genişlettiğini göstermektedir.

Bu durum ilk bakışta olumsuz gibi görünse de, yüzey hasarının daha geniş bir alana yayılması, enerji yoğunluğunun azalması anlamına gelmektedir. Lokal ve derin karbonlaşma yerine yüzeysel ve yaygın bir bozunma oluşması, yalıtkanın ani elektriksel delinmeye uğrama riskini azaltmaktadır (ERSOY et al., 2008, 2007).

Tablo 1. Bor katkılı ve katkısız polyester numunelerde iz boyu ve hasar alanı karşılaştırması[(Ersay et al., 2007)].

Numune Türü	İz Boyu (mm)	Hasar Alanı (mm ²)
Katkısız	41	82
%1 Bor	48	230
%1.5 Bor	44	435

3.5 Yüzey Özellikleri Açısından Genel Değerlendirme

Bu bölümde elde edilen bulgular, bor katkısının polyester yalıtkanların yüzey özelliklerini çok boyutlu olarak etkilediğini ortaya koymaktadır. Bor katkısı, yüzey hidrofobikliğin korunmasına katkı sağlamakta, hidrofilik dönüşümü geciktirmekte ve yüzey iz oluşumunu daha kontrollü bir sürece dönüştürmektedir.

Yüzey enerjisi dağılımının homojenleşmesi, iz oluşum mekanizmasının değişmesi ve hasarın geniş bir alana yayılması, bor katkılı polyester yalıtkanların uzun süreli kullanımda daha güvenilir bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, bir sonraki bölümde ele alınacak olan degradasyon mekanizmaları ve istatistiksel güvenilirlik analizleri için güçlü bir fiziksel temel oluşturmaktadır.

4. DEGRADASYON MEKANİZMALARI

Polimerik yalıtkanlarda degradasyon, tek bir fiziksel ya da kimyasal süreçten ziyade; elektriksel, termal, kimyasal ve elektro-kimyasal mekanizmaların eşzamanlı etkileşimi sonucu ortaya çıkan çok boyutlu bir bozulma sürecidir. Özellikle dış ortam koşullarında çalışan polyester esaslı yalıtkanlar, elektrik alan, nem, kirleticiler ve sıcaklık değişimleri altında yüzeyden başlayarak ilerleyen karmaşık bir yaşlanma sürecine maruz kalmaktadır(ERSOY et al., 2008; Risino Beng, 1994).

Bu bölümde, bor katkılı polyester yalıtkanlarda meydana gelen degradasyon mekanizmaları; elektriksel stres etkisi, yüzey deşarjları, karbonlaşma, termal bozunma ve enerji yayılımı açısından ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca bor katkısının bu mekanizmalar üzerindeki düzenleyici ve geciktirici etkileri deneysel bulgular ve literatür verileri ışığında tartışılmaktadır.

4.1. Elektriksel Stres Altında Yüzey Deşarjları

Elektriksel stres, polimerik yalıtkanlarda degradasyonun başlatıcı unsurlarından biridir. Alternatif elektrik alan altında yalıtkan yüzeyinde biriken yükler, özellikle yüzeyin nemli veya kirli olduğu durumlarda mikro deşarjların oluşmasına neden olmaktadır. Bu deşarjlar genellikle yüzey üzerinde lokal bölgelerde meydana gelmekte ve zamanla yüzey yapısında geri dönüşü olmayan hasarlara yol açmaktadır(Dutta and Dwivedi, 2010; Gubanski, 2005).

Katkısız polyester yalıtkanlarda yüzey deşarjları, çoğunlukla belirli noktalarda yoğunlaşmakta ve bu bölgelerde yüksek enerji yoğunluğu oluşmaktadır. Bu durum, polimer zincirlerinde ani bağ kopmalarına, yüzey sertliğinin azalmasına ve karbonlaşmanın lokal olarak başlamasına neden olmaktadır. Bor katkılı polyester yalıtkanlarda ise yüzey deşarjlarının daha geniş bir alana yayıldığı ve enerji yoğunluğunun lokal olarak aşırı yükselmediği gözlemlenmiştir (Gubanski, 2005; Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bu davranış, bor minerallerinin yüksek polarizasyon kabiliyeti ile ilişkilendirilmektedir. Elektrik alan altında bor katkılı kompozit yapı içerisinde oluşan farklı polarizasyon bölgeleri, elektrik alan çizgilerinin yeniden dağılımına neden olmakta ve yüzeydeki mikro deşarjların şiddetini azaltmaktadır.

4.2. Karbonlaşma Mekanizması ve İz Oluşumu

Yüzey deşarjlarının süreklilik kazanması, polimerik yalıtkanlarda karbonlaşma sürecini başlatmaktadır. Karbonlaşma, polimer zincirlerinin termal ve elektriksel etki altında parçalanması ve karbon açısından zengin iletken kalıntıların yüzeyde birikmesiyle gerçekleşmektedir. Bu iletken kalıntılar, zamanla elektrotlar arasında sürekli bir iletken yol oluşturarak yüzey iz oluşumuna (tracking) neden olmaktadır (Lv et al., 2005; Risino Beng, 1994).

Katkısız polyester numunelerde karbonlaşma genellikle dar ve derin bir iz şeklinde gelişmektedir. Bu durum, elektrik alanın belirli bir bölgede yoğunlaşmasıyla ilişkilidir. Oluşan karbon izi, yüzey direncini hızla düşürmekte ve ani elektriksel delinmelere yol açmaktadır.

Bor katkılı polyester yalıtkanlarda ise karbonlaşma davranışı belirgin biçimde farklıdır. Bor katkısı, yüzeydeki enerji dağılımını homojenleştirerek karbonlaşmanın geniş bir alana yayılmasına neden olmaktadır. Bu sayede lokal ve derin karbon izleri yerine daha yüzeysel ve yaygın bir bozunma gözlenmektedir. Bu mekanizma, iz oluşum süresinin uzamasına ve yalıtkanın ani arıza riskinin azalmasına katkı sağlamaktadır (ERSOY et al., 2008, 2007).



Şekil 3. Polyester yalıtkanlarda yüzey iz oluşumu degradasyon mekanizmasının şematik gösterimi[(An et al., 2024)].

4.3. Termal Bozunma ve Isı Etkisi

Elektriksel deşarjlar ve yüzey akımları, polimerik yalıtkan yüzeylerinde lokal sıcaklık artışlarına neden olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, yüzey deşarjlarının meydana geldiği bölgelerde sıcaklığın kısa süreli olarak birkaç yüz dereceye kadar çıkabildiği rapor edilmiştir (Easterling, 1972). Bu sıcaklık artışı, polimer zincirlerinin termal bozunmasını hızlandırmakta ve karbonlaşma sürecini desteklemektedir.

Polyester esaslı yalıtkanlar, belirli bir sıcaklığa kadar kararlı olmakla birlikte, lokal aşırı ısınma durumlarında yapısal bütünlüklerini kaybetmektedir. Termal bozunma, polimer zincirlerinde kopmalar, uçucu gazların açığa çıkması ve yüzey sertliğinin azalması gibi sonuçlar doğurmaktadır.

Bor katkılı polyester numunelerde termal bozunmanın daha kontrollü gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bor bileşiklerinin ısı absorplama ve dağıtma kabiliyeti, lokal sıcaklık artışlarını sınırlamakta ve termal stresin daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktadır. Bu durum, bor katkısının yalnızca elektriksel değil, aynı zamanda termal açıdan da koruyucu bir rol üstlendiğini göstermektedir (Ersoy et al., 2004; Malik et al., 2018).

4.4. Bor Katkısının Enerji Yayılımına Etkisi

Bor katkısının degradasyon mekanizmaları üzerindeki en belirgin etkilerinden biri, yüzeydeki elektriksel ve termal enerjinin yayılım biçimini değiştirmesidir. Katkisız polyester yalıtkanlarda enerji genellikle belirli bir noktada yoğunlaşmakta ve bu durum hızlı bir degradasyon sürecine yol açmaktadır. Buna karşılık bor katkılı yalıtkanlarda enerji, daha geniş bir yüzey alanına yayılmakta ve bozunma süreci zamana yayılmaktadır (ERSOY et al., 2007; Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bu enerji yayılımı, degradasyon mekanizmasının karakterini de değiştirmektedir. Katkisız sistemlerde iz oluşumu baskın bir mekanizma iken, bor katkılı sistemlerde erozyon karakterli yüzey bozunması ön plana çıkmaktadır. Erozyon karakterli bozunma, yüzeyde iletken bir yolun hızlı biçimde oluşmasını engelleyerek yalıtkanın servis ömrünü uzatmaktadır.

4.5. İz Oluşumundan Erozyona Geçişin Değerlendirilmesi

Bor katkılı polyester yalıtkanlarda gözlenen iz oluşumundan erozyona geçiş, degradasyon mekanizmalarının evrimini göstermesi açısından önemlidir. İz

oluşumu, genellikle ani ve geri dönüşü olmayan bir arıza mekanizması olarak kabul edilirken, erozyon daha yavaş ve kontrollü bir yaşlanma sürecini temsil etmektedir (Tokoro et al., 2005).

Bu çalışmada elde edilen bulgular, bor katkısının degradasyon sürecini ani arıza karakterinden uzaklaştırarak daha güvenli bir yaşlanma davranışına dönüştürdüğünü göstermektedir. Bu durum, bor katkılı polyester yalıtkanların özellikle zorlu çevresel koşullarda çalışan güç sistemi bileşenleri için avantajlı bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

4.6. Degradasyon Mekanizmalarının Genel Değerlendirmesi

Bu bölümde incelenen degradasyon mekanizmaları, bor katkısının polyester yalıtkanların elektriksel ve termal yaşlanma davranışını çok boyutlu olarak etkilediğini göstermektedir. Elektriksel stres altında yüzey deşarjlarının dağılımı, karbonlaşma davranışı, termal bozunma ve enerji yayılımı birlikte değerlendirildiğinde, bor katkısının degradasyon sürecini yavaşlattığı ve daha kontrollü hale getirdiği açıkça görülmektedir.

Bu sonuçlar, bir sonraki bölümde ele alınacak olan istatistiksel ve güvenilirlik analizlerinin fiziksel temelini oluşturmakta ve bor katkılı polyester yalıtkanların uzun vadeli performansının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

5. İSTATİSTİKSEL VE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Polimerik yalıtkanların elektriksel performansının değerlendirilmesinde yalnızca anlık deney sonuçları yeterli değildir. Yalıtım sistemlerinin gerçek çalışma koşullarında maruz kaldığı rastlantısal etkiler, çevresel değişkenler ve malzeme içi heterojenlikler nedeniyle güvenilirlik temelli istatistiksel yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda Weibull istatistiksel dağılımı, polimerik yalıtkanların yüzey iz oluşumu ve yaşlanma davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan en etkili yöntemlerden biridir (ERSOY et al., 2008; Ugur et al., 2003).

Bu bölümde, bor katkılı polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumu süreleri Weibull dağılımı kullanılarak analiz edilmiş; bor katkı oranının güvenilirlik fonksiyonu, ortalama ömür ve yaşlanma karakteri üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

5.1. Weibull Dağılımının Teorik Temeli

Weibull dağılımı, zamanla değişen arıza oranlarını tanımlayabilen esnek bir istatistiksel modeldir. Polimerik yalıtkanlar gibi yaşlanma davranışı sergileyen sistemler için Weibull dağılımı, arıza mekanizmasının doğasını anlamada önemli bilgiler sunmaktadır (Easterling, 1972).

Weibull dağılımı iki temel parametre ile tanımlanmaktadır:

- **Şekil parametresi (β):** Yaşlanma mekanizmasının karakterini belirler
- **Ölçek parametresi (α):** Sistemin karakteristik ömrünü temsil eder

Şekil parametresi $\beta < 1$ olduğunda erken arıza (infant mortality), $\beta \approx 1$ olduğunda rastlantısal arızalar ve $\beta > 1$ olduğunda yaşlanmaya bağlı arızalar söz konusudur. Polimerik yalıtkanlarda yüzey iz oluşumu genellikle $\beta > 1$ koşulunda gerçekleşmekte ve bu durum elektriksel yaşlanma mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir (ERSOY et al., 2008; Risino Beng, 1994).

5.2. Weibull Dağılımının Teorik Temeli

Weibull dağılımına dayalı güvenilirlik fonksiyonu, belirli bir zaman aralığında sistemin arızasız çalışma olasılığını tanımlamaktadır. Güvenilirlik fonksiyonu, yüzey iz oluşumu testleri sonucunda elde edilen zaman verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

Bor katkılı polyester yalıtkanlarda güvenilirlik fonksiyonunun zamanla daha yavaş azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bor katkısının yüzey iz oluşum süresini uzattığını ve sistemin daha uzun süre güvenilir biçimde çalışabildiğini göstermektedir. Özellikle %1.0 ve %1.5 bor katkılı numunelerde güvenilirlik eğrilerinin katkısız numunelere kıyasla belirgin biçimde sağa kaydığı görülmektedir (ERSOY et al., 2008).

Ortalama ömür (Mean Time to Failure – MTTF), Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanan ve sistemin beklenen çalışma süresini ifade eden önemli bir parametredir. Bor katkılı polyester yalıtkanlarda MTTF değerlerinin belirgin biçimde arttığı belirlenmiştir.

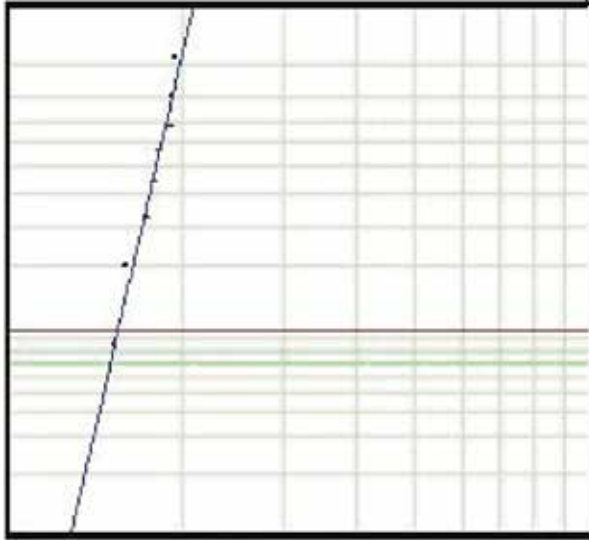
Tablo 2. Bor katkı oranına göre Weibull ölçek (α) ve şekil (β) parametreleri [(Ersoy et al., 2007)].

Bor Oranı (%)	Ölçek Parametresi α (dk)	Şekil Parametresi β
0	18.5	12.9
1.0	67.2	3.8
1.5	59.6	1.2

5.3. Bor Katkısı – Ömür İlişkisinin Değerlendirilmesi

Bor katkı oranı ile yüzey iz oluşumu süresi arasındaki ilişki, Weibull parametreleri yardımıyla nicel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, bor katkısının belirli bir orana kadar iz oluşumu süresini artırdığını göstermektedir. Ancak katkı oranının aşırı artırılması durumunda, partikül aglomerasyonu ve yüzey pürüzlülüğündeki artış nedeniyle bu olumlu etkinin sınırlanabileceği de literatürde rapor edilmiştir (ERSOY et al., 2007; Mukden Ugur JUSc, 1997).

Bu çalışmada %1.0–%1.5 bor katkı aralığının hem güvenilirlik hem de yüzey bozunma karakteri açısından optimum bir aralık olduğu görülmüştür. Bu oranlarda iz oluşumu süresi uzamakta, ancak yüzeyde ani karbonlaşma meydana gelmemektedir.



Şekil 4. Katkısız ve bor katkılı polyester numuneler için Weibull olasılık grafiği[(ERSOY et al., 2008)].

5.4. Güven Aralıkları ve İstatistiksel Belirsizlik

Güvenilirlik analizlerinde yalnızca ortalama değerlerin değil, aynı zamanda güven aralıklarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada Weibull parametreleri için %90 güven aralıkları hesaplanmıştır. Bor katkılı numunelerde güven aralıklarının daha dar olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bor katkısının yalnızca ortalama performansı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda deneysel sonuçların tekrarlanabilirliğini de iyileştirdiğini göstermektedir (ERSOY et al., 2008; Ugur et al., 2003).

Güven aralıklarının daralması, sistem davranışının daha öngörülebilir hale geldiğini ve tasarım aşamasında daha güvenli tahminler yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu özellik, güç sistemlerinde kullanılan yalıtkanlar açısından son derece önemlidir.

5.5. İstatistiksel Bulguların Fiziksel Yorumlanması

Weibull istatistiksel analiz sonuçları, önceki bölümlerde tartışılan yüzey özellikleri ve degradasyon mekanizmaları ile doğrudan ilişkilidir. Bor katkısı ile şekil parametresinin azalması, degradasyon mekanizmasının ani arıza karakterinden uzaklaştığını göstermektedir. Bu durum, yüzey iz oluşumunun daha kontrollü bir erozyon süreci ile gerçekleştiği fiziksel gözlemlerle de uyumludur (ERSOY et al., 2007; Risino Beng, 1994).

Dolayısıyla istatistiksel analizler, bor katkısının yüzey enerji dağılımı, hidrofobiklik ve degradasyon mekanizmaları üzerindeki etkilerini nicel olarak doğrulamakta ve bu etkinin sistem güvenilirliğine doğrudan yansıdığını ortaya koymaktadır.

5.6. Bölümün Genel Değerlendirmesi

Bu bölümde gerçekleştirilen istatistiksel ve güvenilirlik analizleri, bor katkılı polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumu davranışının yalnızca deneysel gözlemlerle değil, aynı zamanda matematiksel modellerle de açıklanabileceğini göstermiştir. Weibull dağılımı, bor katkısının yalıtkanların servis ömrünü uzattığını ve yaşlanma sürecini daha öngörülebilir hale getirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, bir sonraki bölümde ele alınacak olan Sonuçlar ve Tartışma bölümünün temelini oluşturmakta ve bor katkılı polyester yalıtkanların güç sis-

temleri için sunduğu avantajları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

6. İSTATİSTİKSEL VE GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Bu çalışmada elde edilen deneysel ve istatistiksel bulgular, bor katkılı polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumu, hidrofobiklik davranışı ve elektriksel degradasyon mekanizmaları üzerinde belirgin ve çok yönlü etkiler yarattığını açıkça ortaya koymaktadır. ASTM D2303 eğik düzlem yüzey iz oluşumu testleri, yüzey morfolojisi gözlemleri ve Weibull istatistiksel analizleri birlikte değerlendirildiğinde, bor katkısının yalnızca iz oluşumu süresini uzatmakla kalmadığı; aynı zamanda degradasyon mekanizmasının doğasını da değiştirdiği görülmektedir.

Bu bölümde, elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde sunulan yüzey özellikleri, degradasyon mekanizmaları ve güvenilirlik analizleri ile ilişkilendirilerek kapsamlı biçimde tartışılmaktadır.

6.1. Bor Katkısının Yüzey İz Oluşumu Süresine Etkisi

ASTM D2303 testleri sonucunda elde edilen veriler, bor katkılı polyester numunelerde yüzey iz oluşumu süresinin katkısız numunelere kıyasla önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Özellikle %1.0 ve %1.5 bor katkılı numunelerde iz oluşumunun daha geç başladığı ve ilerleme hızının daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Bu durum, Tablo 2’de sunulan Weibull ölçek parametresi (α) değerleri ile de nicel olarak doğrulanmaktadır. Katkısız polyester numunelerde α değerinin düşük olması, iz oluşumunun daha erken gerçekleştiğini gösterirken; bor katkılı numunelerde bu değer belirsiz biçimde artması, sistemin karakteristik ömrünün uzadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, Ersoy ve arkadaşlarının daha önce rapor ettiği bulgularla yüksek düzeyde uyumludur (ERSOY et al., 2008).

Bor katkısının iz oluşumu süresini uzatmasının temel nedenlerinden biri, yüzeydeki elektriksel enerji yoğunlaşmasını azaltmasıdır. Katkısız polyester yüzeylerde elektrik alan çizgileri belirli noktalarda yoğunlaşırken, bor katkılı sistemlerde bu yoğunlaşma daha homojen bir dağılım göstermektedir. Bu durum, yüzeydeşarjlarının şiddetini düşürmekte ve karbonlaşma sürecini geciktirmektedir.

6.2.Hidrofobiklik Davranışı Ve Yüzey Enerjisi Açısından Değerlendirme

Üçüncü bölümde detaylı biçimde ele alındığı üzere, yüzey hidrofobikliği polimerik yalıtkanların yüzey iz oluşumuna karşı direncinde belirleyici bir faktördür. Katkısız polyester numunelerde elektriksel stres altında hidrofobik–hidrofilik dönüşümün hızlı gerçekleştiği ve bu dönüşümün yüzey iz oluşumunu hızlandırdığı gözlemlenmiştir.

Buna karşılık bor katkılı polyester numunelerde hidrofobik özelliğin daha uzun süre korunduğu belirlenmiştir. Şekil 2’de verilen yüzey iz görüntüleri incelendiğinde, katkısız numunelerde iz oluşumunun dar ve derin bir karbonlaşma bölgesi şeklinde geliştiği; bor katkılı numunelerde ise yüzey hasarının daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir.

Bu durum, bor katkısının yüzey enerjisi dağılımını değiştirdiğini ve yüzeyde ani hidrofilik dönüşümü geciktirdiğini göstermektedir. Hidrofobik özelliğin daha uzun süre korunması, elektrolit filminin süreklilik kazanmasını engellemekte ve yüzeyde iletken yol oluşumunu geciktirmektedir(ERSOY et al., 2007; Mukden Ugur JUSc, 1997).

6.3. Degradasyon Mekanizmasının İz Oluşumundan Erozyona Kayması

Bu çalışmanın en önemli bulgularından biri, bor katkısının degradasyon mekanizmasının karakterini değiştirmesidir. Katkısız polyester yalıtkanlarda degradasyon genellikle klasik yüzey iz oluşumu (tracking) şeklinde gerçekleşmekte ve bu durum ani elektriksel arızalara yol açmaktadır. Buna karşılık bor katkılı polyester yalıtkanlarda degradasyonun daha çok erozyon karakterli bir yüzey bozunması şeklinde ilerlediği gözlemlenmiştir.

Bu farklılık, Şekil 3’te sunulan degradasyon mekanizması şeması ile birlikte değerlendirildiğinde daha net anlaşılmaktadır. Bor katkılı sistemlerde karbonlaşma daha yüzeysel ve yaygın bir biçimde gelişmekte, derin ve iletken izlerin oluşumu geciktirilmektedir. Bu durum, yalıtkanın ani delinme riskini azaltmakta ve daha güvenli bir yaşlanma süreci ortaya koymaktadır(Lv et al., 2005; Risino Beng, 1994).

Erozyon karakterli degradasyon, yüzeyin kademeli olarak aşınması anlamına gelmekte ve sistemin çalışma süresi boyunca performans kaybının daha öngörülebilir olmasını sağlamaktadır. Güç sistemleri açısından bu tür bir yaş-

lanma davranışı, ani ve beklenmedik arızalara kıyasla çok daha kabul edilebilir bir durumdur.

6.4. Kaçak Akım Ve Harmonik Bileşenlerin Yorumlanması

Bor katkılı polyester yalıtkanlarda gözlenen yüzey degradasyon davranışı, kaçak akım sinyallerinin harmonik bileşenleri ile de uyumludur. Literatürde, yüzey iz oluşumu sürecinde kaçak akımın temel bileşeninin yanı sıra üçüncü ve beşinci harmoniklerin de önemli bilgiler sunduğu rapor edilmiştir (Mukden Ugur JUSc, 1997; Tokoro et al., 2005).

Bu çalışmada bor katkılı numunelerde kaçak akım artışının daha yumuşak ve kademeli olduğu, harmonik bileşenlerin ise degradasyonun erken evrelerinde belirginleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, bor katkılı sistemlerde yüzey iz oluşumunun ani bir süreçten ziyade zamana yayılan bir mekanizma ile gerçekleştiğini göstermektedir.

Dolayısıyla kaçak akım harmonik analizi, bor katkılı polyester yalıtkanlarda degradasyonun izlenmesi ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araç olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, yalnızca deneysel analizlerde değil, aynı zamanda saha uygulamalarında da potansiyel bir izleme yöntemi sunmaktadır.

6.5. İstatistiksel Bulguların Fiziksel Mekanizmalarla Tutarlılığı

Beşinci bölümde sunulan Weibull istatistiksel analizleri, bu bölümde tartışılan fiziksel mekanizmalarla yüksek düzeyde tutarlılık göstermektedir. Bor katkılı polyester yalıtkanlarda şekil parametresinin (β) azalması, degradasyon mekanizmasının ani arıza karakterinden uzaklaştığını ve daha kontrollü bir yaşlanma sürecine dönüştüğünü göstermektedir.

Ölçek parametresinin (α) artması ise bor katkısının sistemin karakteristik ömrünü uzattığını nicel olarak doğrulamaktadır. Bu istatistiksel sonuçlar, yüzey iz görüntüleri, hidrofobiklik davranışı ve degradasyon mekanizmaları ile birlikte değerlendirildiğinde, bor katkısının çok boyutlu bir iyileştirici etki sunduğu açıkça görülmektedir (ERSOY et al., 2008; Ugur et al., 2003).

6.6. Literatürle Karşılaştırmalı Tartışma

Elde edilen bulgular, literatürde rapor edilen bor katkılı polimer yalıtkan çalışmalarının büyük bir bölümüyle uyumludur. Ersoy ve arkadaşları, bor kat-

kısının polyester yalıtkanların güvenilirliğini artırdığını ve iz oluşumu süresini uzattığını rapor etmişlerdir (ERSOY et al., 2008, 2007). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, söz konusu bulguları yalnızca doğrulamakla kalmamış; aynı zamanda yüzey hidrofobikliği, enerji yayılımı ve degradasyon mekanizması açısından daha ayrıntılı bir fiziksel açıklama sunmuştur.

Buna ek olarak, bu çalışma bor katkısının degradasyon mekanizmasını iz oluşumundan erozyona kaydırduğuna dair güçlü kanıtlar sunmakta ve bu yönüyle literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

6.7. Bölümün Genel Değerlendirmesi

Sonuçlar ve tartışmalar birlikte değerlendirildiğinde, bor katkılı polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumuna karşı daha dirençli, daha öngörülebilir ve daha güvenli bir yaşlanma davranışı sergilediği açıkça görülmektedir. Bor katkısı, yüzey hidrofobikliğini desteklemekte, enerji yoğunlaşmasını azaltmakta ve degradasyon sürecini zamana yaymaktadır.

Bu bulgular, bir sonraki ve son bölümde sunulacak olan Genel Sonuçlar kısmının temelini oluşturmakta ve bor katkılı polyester yalıtkanların güç sistemleri için sunduğu avantajları bütüncül biçimde değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

GENEL SONUÇLAR

Bu kitap bölümünde, bor katkılı polyester esaslı polimerik yalıtkanların yüzey özellikleri, hidrofobiklik davranışı, elektriksel degradasyon mekanizmaları ve güvenilirlik performansı bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. ASTM D2303 eğik düzlem yüzey iz oluşumu testleri, yüzey morfolojisi gözlemleri ve Weibull istatistiksel analizleri birlikte değerlendirilerek bor katkısının yalıtkan performansı üzerindeki çok boyutlu etkileri ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçlar, bor katkısının polyester yalıtkanların yüzey iz oluşumuna karşı direncini anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir. Katkısız polyester numunelerde yüzey iz oluşumu genellikle dar ve derin bir karbonlaşma izi şeklinde gelişirken, bor katkılı numunelerde yüzey hasarının daha geniş bir alana yayıldığı, ancak derin karbonlaşmanın sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bor katkısının yüzeydeki elektriksel enerji yoğunlaşmasını azalttığını ve degradasyon sürecini daha kontrollü bir yapıya dönüştürdü-

günü ortaya koymaktadır.

Yüzey hidrofobiklik davranışı açısından yapılan değerlendirmeler, bor katkısının hidrofobik–hidrofilik dönüşümü geciktirdiğini ve elektrolit film oluşumunu sınırlandırdığını göstermiştir. Hidrofobik özelliğin daha uzun süre korunması, yüzey deşarjlarının süreklilik kazanmasını engellemekte ve iz oluşumu için gerekli koşulların oluşmasını geciktirmektedir. Bu bulgu, bor katkılı polyester yalıtkanların özellikle nemli ve kirli çevre koşullarında çalışan güç sistemi bileşenleri için önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Degradasyon mekanizmaları açısından bakıldığında, bor katkısının klasik yüzey iz oluşumu (tracking) mekanizmasını baskılayarak erozyon karakterli bir yüzey bozunmasına geçişi teşvik ettiği belirlenmiştir. İz oluşumu genellikle ani ve geri dönüşü olmayan arızalara yol açarken, erozyon karakterli bozunma daha yavaş ve öngörülebilir bir yaşlanma sürecini temsil etmektedir. Bu yönüyle bor katkılı polyester yalıtkanlar, ani elektriksel delinme riskinin azaltılması açısından güç sistemleri için daha güvenli bir alternatif oluşturmaktadır.

İstatistiksel ve güvenilirlik analizleri, deneysel gözlemleri nicel olarak doğrulamıştır. Weibull dağılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar, bor katkı oranının artmasıyla birlikte karakteristik ömür parametresinin (α) arttığını ve yaşlanma hızını temsil eden şekil parametresinin (β) azaldığını göstermiştir. Bu durum, bor katkısının yalnızca ortalama ömrü uzatmakla kalmadığını, aynı zamanda degradasyon sürecini daha öngörülebilir ve kontrol edilebilir hale getirdiğini ortaya koymaktadır.

Bu kitap bölümünde sunulan bulgular, bor katkılı polyester yalıtkanların enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılabilecek yüksek performanslı yalıtım malzemeleri arasında yer alabileceğini göstermektedir. Bor katkısı; yüzey iz oluşumuna karşı direnç, hidrofobiklik korunumu, degradasyon mekanizmasının kontrolü ve güvenilirlik performansı açısından polyester esaslı yalıtkanlara belirgin avantajlar kazandırmaktadır.

Sonuç olarak, bor katkılı polyester yalıtkanlar; zorlu çevresel koşullar altında çalışan elektriksel ekipmanlar, orta gerilim yalıtım bileşenleri ve polimer esaslı izolasyon sistemleri için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma, bor katkısının yalnızca bir katkı malzemesi olarak değil, aynı zamanda degradasyon mekanizmalarını yönlendiren aktif bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymakta ve bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalara sağlam bir bilimsel temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- An, Y., Padermshoke, A., Van Nguyen, T., Takahara, A., 2024. Surface Chemistry in Environmental Degradation of Polymeric Solids. *Langmuir* 40, 9336–9344. <https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.4C00731>
- D257 Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials [WWW Document], n.d. URL <https://store.astm.org/d0257-99r05.html> (accessed 12.15.25).
- Dutta, M., Dwivedi, C.K., 2010. Liquid - Contaminant: Inclined Plane Tracking and erosion of insulating materials. *Proceedings - 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2010* 235–240. <https://doi.org/10.1109/ICETET.2010.66>
- Easterling, R.G., 1972. Reliability Mathematics: Fundamentals; Practices; Procedures. *Technometrics* 14, 232–234. <https://doi.org/10.1080/00401706.1972.10488901>
- Ersoy, A., Kuntman, A., Uğur, M., 2007. Kaçak akım harmonik bileşenleri kullanılarak bor katkılı polimerik yalıtkanların bozulma sürecinin incelenmesi. 2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications, SIU. <https://doi.org/10.1109/SIU.2007.4298860>
- Ersoy, A., Kuntman, A., Ugur, M., 2004. Improvement of flame retardant properties in polyester insulators. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD 2004* 1, 336–338. <https://doi.org/10.1109/ICSD.2004.1350359>
- ERSOY, A., ÖZCELEP, Y., KUNTMAN, A., 2008. A Study on the Reliability of Polyester Insulators Blended with Borax. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 16, 257–266. <https://doi.org/->
- ERSOY, A., UĞUR, M., GÜNEŞ, İ., KUNTMAN, A., 2007. A Study On The Insulation Capacity Of Polymeric Composite Materials Blended With Boron Minerals.
- Gubanski, S.M., 2005. Modern outdoor insulation - Concerns and challenges. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 21, 5–11. <https://doi.org/10.1109/MEI.2005.1541483>
- IEC 60112:2003+AMD1:2009 CSV | IEC [WWW Document], n.d. URL <https://websites.iec.ch/en/publication/763> (accessed 12.15.25).
- Lv, P., Wang, Z., Hu, K., Fan, W., 2005. Flammability and thermal degradation of flame retarded polypropylene composites containing melamine phosphate and pentaerythritol derivatives. *Polym Degrad Stab* 90, 523–534. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2005.04.003>

- Malik, N.H., Al-Arainy, A.A., Qureshi, M.I., 2018. Electrical insulation in power systems. *Electrical Insulation in Power Systems* 1–394. <https://doi.org/10.1201/9780203758816/ELECTRICAL-INSULATION-POWER-SYSTEMS-MALIK-AL-ARAINY-QURESHI/RIGHTS-AND-PERMISSIONS>
- Mukden Ugur JUSc, B., 1997. MODELLING AND ANALYSIS OF SURFACE TRACKING PHENOMENA OF SOLID INSULATING MATERIALS.
- Petreus, O., Vlad-Bubulac, T., Hamciuc, C., 2005. Synthesis and characterization of new polyesters with enhanced phosphorus content. *Eur Polym J* 41, 2663–2670. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.05.026>
- Risino Beng, A.J., 1994. NEW TEST METHODS FOR ASSESSING THE RELATIVE TRACKING PERFORMANCE OF INSULATING MATERIALS.
- Tokoro, T., Sato, J., Iwasaki, T., Kosaki, M., 2005. Dielectric measurements of degradation condition of polymer material surface. *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials* 3, 576–579. <https://doi.org/10.1109/ISEIM.2005.193434>
- Ugur, M., Kuntman, A., Ersoy, A., 2003. A study on the ageing process for polyester resin using improved Weibull statistics. *Electrical Engineering* 2003 85:5 85, 283–288. <https://doi.org/10.1007/S00202-003-0175-5>

4. BÖLÜM

MOBİL ROBOTLARDA KONUM KONTROLÜ VE SİMÜLASYONU

Gülnaz YÜKSEL

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
gulnazbabazade@ogr.iuc.edu.tr
<https://orcid.org/0009-0005-2350-9912>

Doç. Dr. Rana ORTAÇ KABAOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
rana@iuc.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0003-0871-0611>

1. GİRİŞ

Son yıllarda mobil robotlar, otonom sistemlerin yeni bileşenleri olarak savunma sanayii, endüstriyel otomasyon, tarım teknolojileri ve akıllı lojistik uygulamalarında önemli roller üstlenmeye başlamıştır (Siegwart et al., 2011; Yıldız, 2009; Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023). Bu tür sistemlerde başarının temel göstergelerinden biri, robotun çevresel koşullardan bağımsız olarak belirli bir hedefe güvenli, hassas ve kararlı şekilde ulaşabilmesidir (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023; Kayacan et al., 2015). Özellikle değişen çevresel koşullara rağmen hedefe güvenli ve doğru biçimde ulaşabilme yeteneği, modern mühendislikte kritik bir tasarım hedefi olarak tanımlanmakta ve mobil robotik literatüründe konum kontrolü ile yerelleştirme problemlerini merkezine almaktadır (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023; Kayacan et al., 2015; Barsan,

2019; Polat, 2000). Bu yeteneğin doğrudan belirleyicisi ise konum kontrolü ve yerleştirme süreçlerinin başarısıdır (Suárez-Gómez, 2023; Polat, 2000; Sasiadek, 2022; Semborski & Idzkowski, 2023).

Konum kontrolü, robotun hedef konuma veya belirli bir referans yörüngeye yönelmesini sağlayan geri besleme yapılarının tasarımını içerir (Solanes, 2025; Barsan, 2019; Polat, 2000). Diferansiyel tahrikli mobil robotlar, doğrusal olmayan kinematik yapıları nedeniyle hassas kontrol gerektirmektedir (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025). Bu nedenle klasik kontrol yöntemleri (PID, PD) uzun süredir kullanılmasına rağmen, belirsizlik içeren dinamik ortamlarda bu yöntemlerin performansı sınırlı kalmaktadır (Suárez-Gómez, 2023; Barsan, 2019; Polat, 2000; Kabir et al., 2019). Bu sınırlılıklar; aşma, uzun yerleşme süresi, model belirsizliklerine duyarlılık ve gürültüye karşı hassasiyet gibi kararlılık ve performans problemleri şeklinde ortaya çıkmaktadır (Barsan, 2019; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004). Bu eksiklikleri gidermek amacıyla bulanık mantık (FL), model öngörülü kontrol (MPC) ve derin pekiştirmeli öğrenme (DRL) tabanlı yöntemler gibi daha modern kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir (Suárez-Gómez, 2023; Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025).

Konum kontrolünün yanı sıra, robotun kendi konumunu doğru tahmin edebilmesi de otonom hareket için kritik önem taşır. Bu amaçla IMU, GPS, odometri, pusula ve lidar gibi sensörlerden elde edilen verilerin Kalman filtresi, parçacık filtreleri ve olasılıksal konumlama algoritmalarıyla birleştirilmesi gereklidir (Sasiadek, 2022; Semborski & Idzkowski, 2023; Thrun et al., 2005; Fox et al., 1999; Borenstein & Feng, 1996). Özellikle olasılıksal robotik yaklaşımı; sensör gürültülerinin, model belirsizliklerinin ve odometri hatalarının sistematik olarak modellenmesine olanak tanımakta ve mobil robotlarda konum tahmini ile eş zamanlı konum belirleme ve haritalama (SLAM) problemlerinin çözümünde yoğun biçimde kullanılmaktadır (Thrun et al., 2005; Fox et al., 1999; Borenstein & Feng, 1996). Bu çalışma, bütün bu çok katmanlı konum kontrolü ve yerleştirme problemlerini kapsamlı şekilde ele almakta; teorik modeller, kontrol stratejileri ve simülasyon çalışmaları bir arada değerlendirilerek diferansiyel tahrikli mobil robotlarda konum kontrolünü karşılaştırmalı olarak incelemektedir (Solanes, 2025; Kayacan et al., 2015; Polat, 2000; MathWorks, 2024; Corke, 2017; Quigley et al., 2009).

Bu kapsamda, robotun kinematik ve dinamik modelleri oluşturulmuş; PID, PD, bulanık mantık, kayma kipli kontrol ve modern yapay zekâ tabanlı kontrol yöntemleri MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir (Barsan, 2019; Polat, 2000; MathWorks, 2024; Corke, 2017; Quigley et al., 2009). Elde edilen

sonuçlar, her yöntemin hataya, yönelim doğruluğuna, zamanlama tepkisine ve kararlılığa ilişkin performansını ortaya koymakta; aynı zamanda kontrol yöntemlerinin parametre duyarlılığı, uyarlanabilirlik ve uygulama karmaşıklığı bakımından da karşılaştırmalı analizine imkân vermektedir (Solanes, 2025; Surez-Gmez, 2023; Barsan, 2019; Polat, 2000; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004; Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025). Çalışma, hibrit kontrol mimarilerinin geliştirilmesine yönelik temel oluştururken, simülasyon sonuçlarının gerçek sistemlere aktarılabilirliğini ve pratik uygulama potansiyelini de tartışmaktadır (Kayacan et al., 2015; MathWorks, 2024; Corke, 2017; Quigley et al., 2009; Dönmez et al., 2021; Karahan & Hökelek, 2020).

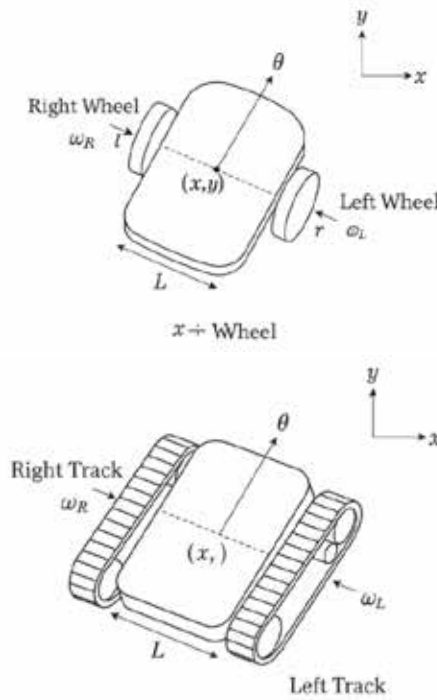
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Mobil Robotların Genel Yapısı

Mobil robotlar tekerlekli, paletli veya bacaklı yapılarda tasarlanabilmektedir. Bu çalışmada, diferansiyel tahrikli, iki tekerleğe sahip ve her iki tekerleği bağımsız motorlarla sürülen mobil robot modeli ele alınmaktadır (Siegwart et al., 2011; Yıldız, 2009; Solanes, 2025). Robotun konumu (x,y,θ) ile ifade edilmekte olup temel kinematik model aşağıdaki biçimde tanımlanır (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Polat, 2000; Corke, 2017).

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L)\cos\theta \\ \dot{y} = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L)\sin\theta \\ \dot{\theta} = \frac{r}{L}(\omega_R - \omega_L) \end{cases} \quad (1)$$

Bu denklemde r tekerlek yarıçapını, L iki tekerlek arasındaki mesafeyi ve $\omega_R \omega_L$ ise sağ ve sol tekerleklerin açısal hızlarını göstermektedir. Bu yapı, doğrusal olmayan dinamik davranışları nedeniyle klasik kontrol yöntemlerinin tek başına yeterli olmadığı durumlarda daha gelişmiş yaklaşımların kullanılmasını gerektirir (Solanes, 2025; Surez-Gmez, 2023; Barsan, 2019; Polat, 2000).



Robotun fiziksel yapısı sağ ve sol tahrik tekerleklerinden, arka denge tekerleğinden, gövde üzerine yerleştirilen sensör birimlerinden ve kontrol modüllerinden oluşur (Siegwart et al., 2011; Yıldız, 2009; Corke, 2017). Robotun dinamik modeli Newton–Euler yöntemi veya Lagrange denklemleriyle oluşturulabilir (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Corke, 2017). Bu çalışmada robotun düz bir zemin üzerinde hareket ettiği kabulüyle potansiyel enerji sabit alınmış ve Lagrange yaklaşımında $L \approx T$ kabul edilmiştir. Robotun toplam kinetik enerjisi doğrusal ve açısal hareket bileşenleriyle tanımlanır (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Corke, 2017).

$$\dot{x} = v \cos(\theta)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (2)$$

Burada:

$x, y \rightarrow$ robotun global koordinat sistemindeki konumu

$\theta \rightarrow$ robotun yn açısı

$v \rightarrow$ doğrusal hız

$\omega \rightarrow$ açısal hız

Doğrusal hız ve açısal hız, sağ ve sol tekerlek hızlarından türetilir:

$$v = \frac{r}{2} (\omega_R + \omega_L)$$

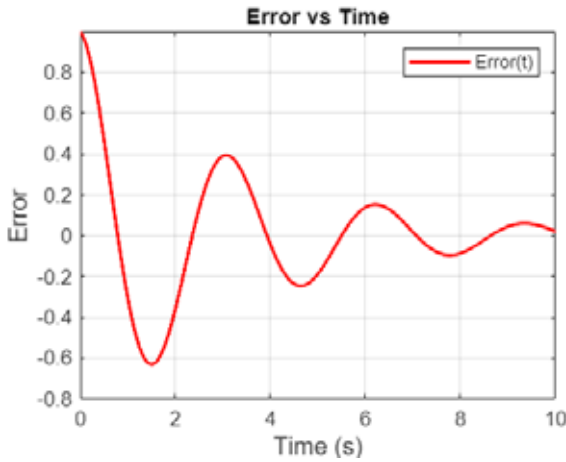
$$\omega = \frac{r}{L} (\omega_R - \omega_L) \quad (3)$$

Burada,

$r \rightarrow$ tekerlek yarıçapı

$L \rightarrow$ iki teker arasındaki mesafe

$\omega_r, \omega_L \rightarrow$ sağ ve sol tekerin açısal hızları



Şekil 1. PID kontrolünde zaman-hata eğrisi

Tablo 1. Konum kontrol yöntemlerinin başarı-karmaşıklık karşılaştırması

Method	Başarı (0-1)	Dayanıklılık	Karmaşıklık
PID	0.87	Orta	Düşük
SMC	0.93	Yüksek	Orta
Bulanık mantık	0.90	Orta	Yüksek
MPC	0.96	Yüksek	Yüksek

Tablo 1 incelendiğinde, daha sofistike kontrol yöntemlerinin başarımlarını artırdığı ancak buna karşılık uygulama karmaşıklığını da yükselttiği görülmektedir (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025). Özellikle bulanık mantık ve DRL tabanlı yöntemlerin, parametrik belirsizlikler ve doğrusal olmayan durumlar altında daha iyi performans sunduğu; buna karşın tasarım süreci, hesaplama gereksinimi ve eğitim süresi açısından daha yoğun kaynak ihtiyacı doğurduğu literatürle uyumlu şekilde gözlemlenmektedir (Suárez-Gómez, 2023; Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025).

2.2. Diferansiyel Tahrikli Mobil Robotların Dinamik Modeli

Diferansiyel sürüş sistemlerinde sağ ve sol tekerleklerle uygulanan tork farkı robotun hem ileri-geri hareketini hem de yön değiştirme kabiliyetini belirler (Siegwart et al., 2011; Yıldız, 2009; Solanes, 2025). Sistem çoğunlukla iki tahrik tekerleği, bir denge tekerleği ve sensör/kontrol birimlerinin yer aldığı şasiden oluşur (Siegwart et al., 2011; Yıldız, 2009; Corke, 2017). Dinamik model Newton–Euler veya Lagrange temelli formülasyonlarla elde edilir ve sistemin fiziksel parametreleri (kütle, atalet momenti, sürtünme katsayıları vb.) denklemlere dahil edilir (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Corke, 2017). Bu modelleme süreci, daha sonra tasarlanacak kontrolcülerin karmaşıklık seviyesini ve parametre ayarlarının hassasiyetini doğrudan etkilemektedir (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023; Barsan, 2019; Polat, 2000).

Literatürde diferansiyel tahrikli mobil robotlara yönelik çok sayıda dinamik modelleme ve kontrol yaklaşımı önerilmiş, bu modellerin deneysel sistemler üzerinde doğrulanması için MATLAB/Simulink ve ROS tabanlı simülasyon ortamları yaygın olarak kullanılmıştır (Barsan, 2019; Polat, 2000; MathWorks, 2024; Corke, 2017; Quigley et al., 2009; Dönmez et al., 2021; Karahan & Hökelek, 2020).

2.3. Kinematik Denklem Tabanı

Robotun konumu ve yönelimi (x, y, θ) koordinatlarıyla ifade edilir. Doğrusal hız v ve açısal hız ω , sağ ve sol tekerleklerden elde edilen hızların uygun biçimde birleştirilmesiyle elde edilir (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Polat,

2000). Diferansiyel tahrikli mobil robotların kinematik modeli, kayma etkisinin ihmal edildiğı ve düşük hızlı hareketlerin söz konusu olduğı durumlar için geçerlidir (Siegwart et al., 2011; Solanes, 2025; Corke, 2017).

(1) ve (2) denklem seti, sistemin kinematik modelidir ve genellikle düşük hızlarda ve kaymanın ihmal edildiğı durumlarda kullanılır.

Dinamik Model (Lagrangian Yaklaşımı);

Daha hassas bir analiz için robotun dinamik bir modeli oluşturulur. Bu model, robotun kütlesi (m), dönme eylemsizliğı modeli (I_z), sürtünme ve dış kuvvetler gibi fiziksel parametreleri içerir.

Lagrange denklemi şu şekilde yazılır:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (4)$$

Burada,

$L=T-V \rightarrow$ sistemin Lagrangian fonksiyonu (kinetik enerjiden-potansiyel enerjiye)

$q_i \rightarrow$ genelleştirilmiş koordinatlar (x,y, θ)

$Q_i \rightarrow$ dış güç

Robotun düz bir yüzey üzerinde hareketi sırasında potansiyel enerjinin sabit olduğı varsayıldığında, $L \approx T$ alınır. Toplam kinetik enerji:

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I_z \omega^2 \quad (5)$$

Bu enerji terimlerinden türetilen Lagrange denklemleri yardımıyla robotun dinamiğı şu şekilde formüle edilebilir:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} = \tau \quad (6)$$

Burada,

$M(q) \rightarrow$ kütle matrisi

$C(q, \dot{q}) \rightarrow$ Coriolis ve merkezkaç kuvveti matrisi

$D \rightarrow$ sürtünme matrisi sönümlemesi

$\tau \rightarrow$ kontrol torkları (sağ ve sol tekerlekler için)

Bu kinematik ve dinamik denklemler, kontrol algoritmalarının tasarımında matematiksel temel oluşturur ve hem yörünge izleme hem de noktaya-nokta konumlandırma problemlerinin çözümü için başlangıç noktası niteliğindedir (Solanes, 2025; Barsan, 2019; Polat, 2000; Corke, 2017). Bu model, kayma etkisinin ihmal edildiği düşük hızlı hareketlerde geçerlidir ve konum kontrolü ile yörünge izleme algoritmalarının tasarımında temel referans niteliğindedir (Sie-gwart et al., 2011; Solanes, 2025; Polat, 2000; Corke, 2017). Özellikle yörünge izleme problemlerinde, referans yörüngenin zamana bağlı olarak tanımlanması ve kinematik modelle ilişkilendirilmesi yoluyla hata dinamiği çıkarılmakta ve uygun kontrol kanunları tasarlanmaktadır (Solanes, 2025; Polat, 2000).

2.4. Konum Kontrol Stratejileri

Konum kontrolü, mobil robotun hedefe güvenli ve kararlı biçimde yönelmesini sağlayan en önemli mühendislik problemlerinden biridir (Solanes, 2025; Kayacan et al., 2015; Barsan, 2019; Polat, 2000). Klasik kontrol yöntemleri olan PID ve PD kontrol, yapısal olarak basit olmaları ve düşük hesaplama gereksinimleri nedeniyle uzun yıllardır yaygın şekilde kullanılmaktadır (Barsan, 2019; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004). Diferansiyel tahrikli mobil robotlar için tasarlanan PID tabanlı denetleyiciler, özellikle düzgün zemin ve düşük hız koşullarında kabul edilebilir performans sunmakta; ancak model belirsizlikleri, sürtünme etkileri ve ani yön değişimlerinin söz konusu olduğu durumlarda kararlılık problemleri ve aşma gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkarmaktadır (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023; Barsan, 2019; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004).

Bu sebeple daha modern yaklaşımlar geliştirilmiştir. Kayma kipli kontrol (SMC), robotu tanımlanan bir kayma yüzeyine yönlendirerek yüksek kararlılık sunan güçlü bir yöntemdir ve model belirsizliklerine karşı dayanıklılığı ile öne çıkmaktadır (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023). Ancak “chattering” olarak bilinen yüksek frekanslı titreşim problemi nedeniyle pratik uygulamalarda dikkatli tasarım gerektirir ve çoğu zaman filtreleme, sınır tabaka veya yumuşatma fonksiyonları ile desteklenir.

Bulanık mantık kontrolünde ise sistem davranışı, matematiksel modeller yerine uzman bilgisi üzerine kurulu kurallar aracılığıyla belirlenir (Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010). Bu yapı, özellikle doğrusal olmayan sistemlerde güçlü bir alternatif sunmakta ve mobil robotların engel kaçınma, yörünge izleme ve hedefe yönelme problemlerinde yaygın biçimde kullanılır.

maktadır (Omrane, 2016; Rashid et al., 2010). Klasik PID kontrol ile bulanık mantığın karşılaştırmalı analizleri, bulanık kontrolün doğrusal olmayan ve belirsizlik içeren ortamlarda daha yumuşak kontrol sinyalleri ürettiğini ve konum takibinde daha dengeli performans sağladığını göstermektedir (Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004).

Son yıllarda derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı kontrol yöntemleri, robotların çevreyle etkileşimlerinden öğrenerek adaptasyon sağlamasını mümkün kılmıştır (Suárez-Gmez, 2023; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025). Özellikle DDPG ve benzeri aktör-eleştirmen tabanlı algoritmalar, karmaşık durum-uzaylarında sürekli kontrol sinyalleri üretme yetenekleri nedeniyle mobil robot navigasyonunda yaygınlaşmaktadır (Bernat et al., 2022). Bununla birlikte, yüksek veri gereksinimi, işlem yükü, eğitim süresinin uzunluğu ve kararlılık sorunları bu yöntemlerin uygulama sahasını sınırlamaktadır (Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025). Bu nedenle DRL tabanlı denetleyiciler çoğu zaman klasik PID veya bulanık kontrol yapılarıyla hibrit biçimde kullanılarak hem öğrenme yeteneği hem de kararlılık özellikleri bir arada elde edilmeye çalışılmaktadır (Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025).

2.5. Konum Kontrol Probleminin Matematiksel Formülasyonu

Mobil robotun hedef konuma yönelmesi yalnızca fiziksel bir hareket değil, aynı zamanda zamanla değişen hata fonksiyonunun minimize edilmesini amaçlayan bir optimizasyon problemidir (Solanes, 2025; Suárez-Gmez, 2023). Robotun mevcut konumu ile hedef konumu arasındaki fark, hata vektörü olarak tanımlanır ve bu hata vektörü çoğu zaman robotun gövde koordinat sistemine dönüştürülerek ifade edilir (Solanes, 2025; Polat, 2000; Corke, 2017).

$$\begin{aligned} e_x(t) &= x_d(t) - x(t) \\ e_y(t) &= y_d(t) - y(t) \\ e_\theta(t) &= \theta_d(t) - \theta(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Bu hata vektörü zamanla sıfıra yaklaşmalıdır. Bu, ideal olarak şu anlama gelir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_y(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_\theta(t) = 0 \quad (8)$$

Kontrolör, bu hata değerlerini en aza indirmek için doğrusal ve açısal hızlar $v(t)$ ve $\omega(t)$ üretmelidir. Böylece sistem, hedef konuma dengeli ve kararlı bir şekilde ulaşır.

İzleme Dinamikleri ve Koordinat Dönüşümü;

Kontrol probleminde hata vektörünün robotun kendi gövde koordinatlarına dönüştürülmesi hesaplamaları kolaylaştırır ve kontrol yasasının doğrudan robotun hız ve yönelim dinamiklerine uygulanmasına imkân verir (Solanes, 2025; Polat, 2000).

$$\begin{bmatrix} e_x^r \\ e_y^r \\ e_\theta^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Bu dönüşümle elde edilen hata vektörü, robotun kendi algıladığı hata yönünü temsil etmekte olup, bu vektör üzerinden üretilen kontrol sinyalleri daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Geri beslemeli kontrol yapılarında kontrol sinyali aşağıdaki biçimde üretilir:

Kontrolör Tasarımı: Geri Bildirim Mekanizması:

Konum kontrolünün matematiksel temeli, sistemi kapalı bir devrede kontrol etmektir.

$$u(t) = k_1 \cdot e_x^r(t) \quad (10)$$

Burada,

$u(t) \rightarrow$ kontrol sinyali ($v(t), \omega(t)$)

$K \rightarrow$ kontrol fonksiyonunun kazanç matrisi (ayarlı veya adaptif)

$e(t) \rightarrow$ hata vektörü

En basit haliyle oransal kontrol:

$$\omega(t) = k_2 \cdot e_y^r(t) + k_3 \cdot e_\theta^r(t) \quad (11)$$

Bu yapıda, k_1 , k_2 ve k_3 kontrol kazançları, sistem dinamiklerine göre dikkatlice ayarlanmalıdır. Yanlış ayarlanmış kazançlar, salınım, kararsızlık veya yavaş tepki gibi istenmeyen davranışlara yol açabilir.

Bu yapı sayesinde hata zamanla sifıra yakınsamaya zorlanır ve robotun kararlı biçimde hedefe ulaşması sağlanır (Solanes, 2025; Barsan, 2019; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004). Klasik PID ve PD kontrolörler bu tür

yapılarla doğrudan uygulanabilirken, bulanık mantık ve Derin Takviyeli ğrenme (DRL) tabanlı yöntemlerde kontrol sinyali üretimi kural tabanlı veya öğrenilmiş politika fonksiyonları üzerinden gerçekleştirilir (Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025).

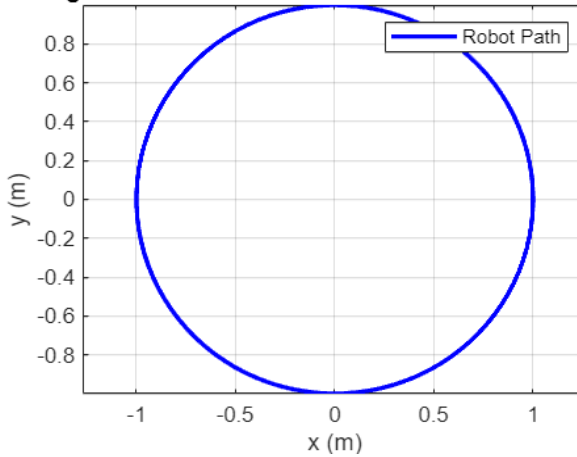
2.6. Simülasyonun Rolü Ve Matlab/Simulink Kullanımı

Simülasyon, kontrol algoritmalarının tasarımı ve değerlendirilmesi için kritik önem taşır. Gerçek dünyada karşılaşılabilecek senaryoların hızlı ve güvenli bir şekilde modellenmesine olanak tanıyan MATLAB/Simulink ortamı, özellikle diferansiyel tahrikli robotların hem kinematik hem dinamik davranışlarının görsel bloklar aracılığıyla oluşturulmasına imkân sağlar (Barsan, 2019; Polat, 2000; MathWorks, 2024; Corke, 2017). Bu tür simülasyon ortamları, robotik yazılım altyapıları (rneğin ROS) ve görsel programlama araçlarıyla birlikte kullanıldığında, gerçek zamanlı kontrol deneylerini emülasyon ortamlarında gerçekleştirmeye de imkân tanımaktadır (MathWorks, 2024; Corke, 2017; Quigley et al., 2009; Dönmez et al., 2021; Karahan & Hökelek, 2020).

Bu alışmada PID, SMC ve bulanık mantık kontrol yapıları Simulink üzerinde ayrı ayrı modellenmiş, robotun izlediği yol, hata eğrileri ve kontrol sinyallerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Simülasyon senaryolarında başlangıç konumları, hedef noktalar ve referans yörüngeler farklılaştırılarak her bir kontrol yöntemi için kararlılık, aşma miktarı, yerleşme süresi ve izleme hatası gibi performans ltleri değerlendirilmiştir. Literatürde benzer karşılaştırmalı çalışmaların, hem simülasyon hem de gerçek zamanlı uygulama ortamlarında gerçekleştirildiği ve özellikle görsel geri besleme, IoT tabanlı izleme ve uzak erişimli kontrol yapılarının test edildiği görülmektedir.

Tablo 2. Kullanılan fiziksel parametreler

Parametre	Değer	Açıklama
Tekerlek yarıçapı τ	0.05m	Her tekerleğin yarıçapı
Tekerlekler arası mesafe L	0.30m	Sağ ve sol tekerlekler arasındaki mesafe
Robot kütlesi m	5.0kg	Robotun toplam kütlesi
Atalet momenti	0.05	Dönme hareketine karşı direnç
Simulation duration	10	Total time of the test period
Sampling time	0.01 s	Simulation time step
Simulation environment	MATLAB R2024b	Software used and version information

Figure 3.1 – Robot Path in Simulation Environment**Şekil 2.** Simülasyonda robotun izlediği yörünge

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Simülasyon sonuçları, PID, SMC ve bulanık mantık kontrol algoritmalarının konum izleme performanslarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur.

3.1. PID Kontrol Yaklaşımı

PID kontrol, hedefe hızlı yönelme avantajı sunmakla birlikte ani değışimler-
de yüksek aşma ve uzun yerleşme süresi göstermiştir (Barsan, 2019; Kabir et
al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004). Gürültülü ortamlarda türevsel bileşenin
etkisiyle kontrol sinyalinde dalgalanmalar ortaya çıkmış, bu durum pratik uy-
gulamalarda aktüatör yorulması ve enerji tüketiminde artış gibi olumsuz sonuç-
lar doğurabilecek niteliktedir (Barsan, 2019; Kabir et al., 2019).

Sistemin kontrol sinyali $u(t)$, aşağıdaki üç bileşenin toplamı ile belirlenir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \cdot \dot{e}(t) \quad (12)$$

Parametre Ayarları ve Gerekçesi:

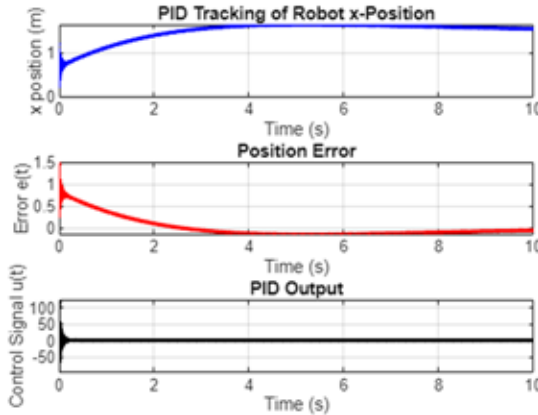
Simülasyon ortamında, PID kontrolör parametreleri aşağıdaki gibi belirlen-
miştir:

$K_p=1,2$: Robotun hedefe nişan almasını sağlayan temel itici kuvveti oluşturur.

$K_i=0,3$: Kalıcı hataları ortadan kaldırmak için yeterli bir integral etki sağlar.

$K_d=0,8$: Sistemde oluşabilecek ani salınımları bastırarak daha yumuşak ge-
işler sağlar.

Bu değerler deneme yanılma yoluyla manuel olarak ayarlanmış ve sistemin
hedefe kararlı bir şekilde nişan aldığı gözlemlenmiştir.



şekil 3. PID konum, hata, kontrol çıkışı eğrileri

PID kontrolünün basit yapı ve kolay uygulama, minimum parametre ayar-
lamalarıyla kararlılık sağlanabilme, simülasyon ortamında hazır bloklarla hızlı

test gibi avantajları, parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması zorluğu, dinamik ve karmaşık ortamlarda performansının sınırlı olabilmesi gibi dezavantajları ve hızla değişen sistemlerde yetersiz performans, hata sinyalinde gürültü varsa, D bileşeninin sistemi bozabilme, doğrusal olmayan dinamiklerde yetersiz performans gibi sınırlılıkları vardır.

3.2. Kayan Kipli Kontrol (SMC) Yaklaşımı

SMC yöntemi, model belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı yüksek kararlılık göstermiş, kayma yüzeyi yaklaşımı sayesinde hata fonksiyonunun hızlı şekilde sifıra yakınsadığı görülmüştür (Solanes, 2025; Suárez-Gómez, 2023). Buna karşılık ani kontrol değişimleri gerçek sistemlerde motor zorlanmalarına yol açabilmekte ve “chattering” problemi nedeniyle ek filtreleme veya yumuşatma stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

SMC, hata değişkenlerinden üretilen bir kayan yüzey tanımlar. Mobil robotun hata değişkeni $e(t)$ ve türevi kullanılarak bu yüzey şu şekildedir:

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (13)$$

Burada,

$$e(t) = x_{\text{hedef}} - x(t)$$

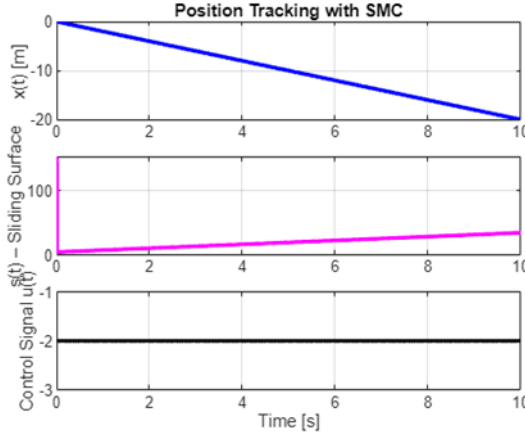
$\lambda > 0$ sistemin yakınsama oranını belirleyen pozitif sabittir.

Kontrol yasası genellikle şu şekilde formüle edilir:

$$u(t) = -k \cdot \text{sign}(s(t)) \quad (14)$$

Burada, $k > 0$, kontrol gücünü belirler. Sinyal(ler) fonksiyonu, kayan yüzeye doğru bir çekim kuvveti uygular. Bu yapı sayesinde sistem, bozulmalara karşı dirençli hale gelir ve istenen denge yüzeyinde hareket eder.

SMC yapısının bozulmalara ve model belirsizliklerine karşı yüksek dayanıklılık, hedefe hızlı yakınsama, doğrusal olmayan sistemlerde kararlı kontrol gibi avantajları, titreşim sorunu, parametre sisteminde hassasiyet, pratik uygulamada zorluk (keskin kontrol geçişleri) gibi sınırlılıkları vardır.

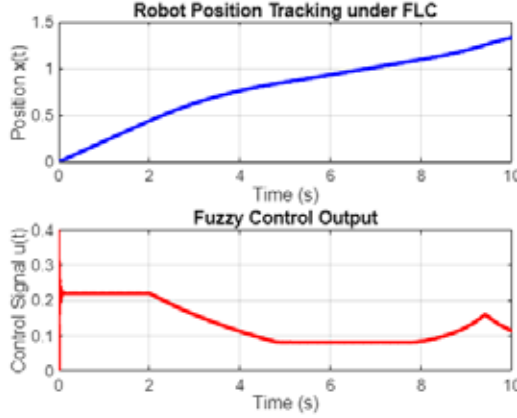


Şekil 4. SMC konum, kayma yüzeyi, kontrol çıkışı eğrileri

3.3. Bulanık Mantık Kontrolü (FLC) Yaklaşımı

Bulanık mantık kontrolü, uzman tabanlı yaklaşımı sayesinde daha akıcı ve yumuşak bir kontrol davranışı sergilemiş; özellikle doğrusal olmayan koşullarda daha istikrarlı bir konum takibi sağlamıştır (Zadeh, 1973; Omrane, 2016; Rashid et al., 2010). Simülasyon sonuçları, bulanık kontrol yapısının, özellikle başlangıç konumu ve hedef konumu arasında büyük farkların olduğu senaryolarda, PID kontrol ile karşılaştırıldığında daha az aşma ve daha yumuşak hız profili ürettiğini göstermektedir (Omrane, 2016; Rashid et al., 2010; Kabir et al., 2019; Watanabe & Shiraishi, 2004). Bu bulgular, mobil robotlarda bulanık mantık temelli navigasyon ve konum kontrolü üzerine yapılan çalışmalardaki sonuçlarla uyumludur (Omrane, 2016; Rashid et al., 2010).

Temel yapıda, konum hatası $e(t)$ ve hatanın değişimi giriş değişkenleri, hız veya açısal hız ($v(t)$ veya $\omega(t)$) ise çıkış değişkeni olarak tanımlanır.



Şekil 5. Robot konumu ve bulanık kontrol çıkışı

Modern literatürde DRL tabanlı yaklaşımların, klasik ve bulanık kontrol yöntemlerine alternatif veya tamamlayıcı olarak önerildiği görülmektedir (Suárez-Gómez, 2023; Bernat et al., 2022; Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025). Özellikle DDPG tabanlı navigasyon algoritmaları, engel içeren karmaşık ortamlarda robotun uçtan uca öğrenme yoluyla uygun kontrol sinyallerini üretmesini mümkün kılmakta; buna karşın eğitim süresinin uzunluğu ve kararlılık problemleri nedeniyle çoğu zaman simülasyon ortamlarıyla sınırlı kalmaktadır. Benzer şekilde DRL ile zenginleştirilen PID ve çoklu PID yapılarının da, farklı çalışma koşulları altında adaptif parametre ayarı sayesinde performans artışı sağladığı gösterilmiştir (Zaman & Wu, 2024; Carlucho et al., 2020; Hao et al., 2025).

Genel değerlendirmede, SMC yönteminin en yüksek kararlılığı sunduğu, bulanık mantığın doğrusal olmayan yapılar altında daha dengeli bir kontrol sağladığı ve PID kontrolünün basit yapısına rağmen modern senaryolarda sınırlı performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca simülasyon ortamlarının, gerçek robot platformlarına geçiş öncesinde tasarlanan kontrol algoritmalarının stres testini yapmak için vazgeçilmez olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Diferansiyel sürüşlü mobil robotlarda PID, SMC ve FLC algoritmalarının uygulanmasıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, her bir kontrol yapısının sistem davranışını nasıl etkilediği hem teorik hem de MATLAB/Simulink ortamında elde edilen simülasyon sonuçlarıyla kapsamlı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, kullanılan her bir kontrol yönteminin kendine özgü avantajlar ve sınırlılıklar barındırdığını açıkça ortaya koymaktadır

PID kontrolü, hedef konuma hızlı bir şekilde ulaşma avantajı sunmasına rağmen özellikle ani değişimlerin söz konusu olduğu durumlarda belirgin miktarda aşma (overshoot) ve uzun yerleşme süresi sergilemiştir. Klasik bir kontrol yaklaşımı olmasına rağmen doğrusal olmayan veya gürültü içeren karmaşık senaryolarda performansının sınırlı olduğu grlmştir. Bu durum, PID kontrolün sistemin doğrusal modellere bağımlılığı nedeniyle karmaşık robot dinamiklerini tam olarak temsil edememesinden kaynaklanmaktadır.

SMC yöntemi ise model belirsizliklerine ve dış bozuculara karşı son derece dayanıklı bir yapı sunmuştur. Kayma yüzeyinin dinamik olarak tanımlanması sayesinde sistem kararlılığı yüksek seviyede korunmuş, aşma değeri minimuma indirilmiş ve hata fonksiyonunun hedefe yakınsama süresi oldukça kısa tutulmuştur. Bununla birlikte kontrol sinyalinde ortaya çıkan keskin geçişlerin gerçek robot uygulamalarında motor elemanlarına ek yük bindirebileceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla bu yöntemin uygulamaya aktarılmasında titreşim probleminin uygun yumuşatma fonksiyonlarıyla giderilmesi gerekmektedir.

FLC, insan sezgisini modelleyen yapısı sayesinde hem daha akıcı bir kontrol davranışı sunmuş hem de konum takibi açısından estetik bir hareket profili elde edilmesine olanak tanımiştır. Özellikle doğrusal olmayan ve belirsizlik içeren ortamlarda sistemin adaptasyon kabiliyeti yüksek seviyede olmuştur. Buna karşın sistemin başarısı, üyelik fonksiyonlarının doğru tanımlanmasına ve kural tabanının titizlikle oluşturulmasına bağlıdır; bu nedenle tasarım aşamasında mühendislik kararı kritik önem taşır.

Güncel literatür, DRL tabanlı kontrol yaklaşımlarının klasik ve bulanık kontrollere entegre edilmesiyle hem öğrenme tabanlı adaptasyonun hem de kararlı çalışma koşullarının bir arada elde edilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen simülasyon sonuçları, hibrit ve uyarlanabilir kontrol yapılarına geçişte klasik yöntemlerin hlen önemli bir referans noktası olduğunu ve mobil robotik alanında gelecekteki çalışmalar için güçlü bir temel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Uygulamada kontrol algoritması seçilirken; sistemin dinamik özellikleri,

çevresel şartlar, hesaplama kaynakları ve uygulanacak senaryonun gereksinimleri birlikte değerlendirilmelidir. Bu çalışma, farklı kontrol algoritmalarının çok boyutlu performans analizlerine dayanan karşılaştırmalı bir çerçeve sunarak hem kontrol teorisine hem de mobil robot uygulamalarına mühendislik açısından değerli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Bernat, J., *et al.* (2022). Deep deterministic policy gradient in mobile robot navigation. *Applied Sciences*, 12(4).
- Borenstein, J., & Feng, L. (1996). Correction of systematic odometry errors in mobile robots. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- Carlucho, I., *et al.* (2020). An adaptive deep reinforcement learning approach for multiple PID controllers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 92.
- Corke, P. (2017). *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms*. Springer.
- Dönmez, E., *et al.* (2021). Vision-based real-time mobile robot controller. *European Journal of Science and Technology (EJOSAT)*.
- Fox, D., *et al.* (1999). Monte Carlo localization for mobile robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- Hao, X., *et al.* (2025). Deep reinforcement learning enhanced PID control. *Scientific Reports*.
- Kabir, U., *et al.* (2019). Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers. *arXiv preprint arXiv:1910.12076*.
- Karahan, O., & Hökelek, H. (2020). Mobile robot position controlling system based on IoT. *Journal of Innovative Science and Technology Applications (JISTA)*.
- Kayacan, E., *et al.* (2015). Embedded high precision control and learning for agricultural mobile robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106.
- MathWorks. (2024). *Robotics system toolbox documentation*. MathWorks.
- Omrane, H. (2016). Fuzzy logic based control for autonomous mobile robot. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(4).
- Polat, M. (2000). *Mobil robotlarda yöreng izleme* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Quigley, M., *et al.* (2009). ROS: An open-source robot operating system. In *ICRA Workshop*.

- Rashid, R., *et al.* (2010). Fuzzy-based navigation and control of a non-holonomic mobile robot. *arXiv preprint arXiv:1003.4081*.
- Sasiadek, J. Z. (2022). Kalman filtering for mobile robot localization. *Sensors*, 22(7).
- Semborski, J., & Idzkowski, A. (2023). Hybrid localization methods for autonomous mobile robots. *Journal of Field Robotics*, 40(5).
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots* (2nd ed.). MIT Press.
- Solanes, J. E. (2025). Mobile robots: Trajectory analysis, positioning and control. *Applied Sciences*, 15(1).
- Suárez-Gómez, A.-D. (2023). Review of control algorithms for mobile robotics. *arXiv preprint arXiv:2310.06006*.
- Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. MIT Press.
- Watanabe, K., & Shiraishi, M. (2004). PID and fuzzy control for a two-wheeled mobile robot. *Control Engineering Practice*, 12.
- Yıldız, E. (2009). *Mobil robotik tasarımı ve hareket algoritmaları*. Pamukkale Üniversitesi.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(1).
- Zaman, M. Q., & Wu, H.-M. (2024). An improved fuzzy inference strategy using reinforcement learning. *Robotica*, 42(4).

5. BÖLÜM

NESTED LEARNING İLE SÜREKLİ ÖĞRENME: CATASTROPHIC FORGETTING'İ SIFIRA İNDİREN YAKLAŞIM – FASHION-MNIST ÜZERİNDE DENEYSEL BİR İNCELEME

Doç.Dr. Abdurrahim AKGÜNDOĞDU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Mühendislik Fakültesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

<https://orcid.org/0000-0001-8113-0277>

1. GİRİŞ

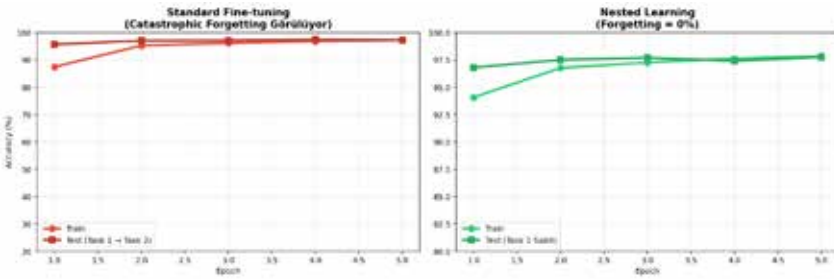
Yapay sinir ağları son on yılda olağanüstü başarılar elde etmiş olsa da, insan öğrenme sürecinin temel bir bileşeni olan “yeni bilgileri öğrenirken eskilerini koruma” yeteneğinden hâlâ yoksundur. Bir model yeni bir görevi öğrenmeye başladığında, önceki görevlerden edindiği bilgilerin dramatik biçimde yok olması, literatürde 1980’lerin sonundan beri catastrophic forgetting (felaketvari unutma) olarak adlandırılmaktadır [McCloskey & Cohen, 1989; French, 1999]. Şekil 1’in sol panelinde de görüldüğü gibi, Fashion-MNIST gibi son derece basit bir veri kümesinde dahi standart fine-tuning yöntemiyle eğitilen bir model, ikinci görevi öğrenirken ilk görevdeki performansını neredeyse tamamen kaybetmektedir. Bu ciddi bilgi kaybı, gerçek dünya uygulamaları için kritik bir engeldir. Otonom sürüş sistemlerinden tıbbi teşhise, kişisel asistanlardan robotik uygulamalara kadar gerçek dünyada ardışık görevlerle çalışan yapay zekâ sistemleri için kritik bir engeldir. Bu nedenle son yıllarda regularization [Kirkpatrick et al., 2017], replay [Rebuffi et al., 2017; Lopez-Paz & Ranzato, 2017 — GEM] ve parameter isolation [De Lange et al., 2021;

Mallya & Lazebnik, 2018 — PackNet] temelli çok sayıda yöntem geliştirilmiş olsa da, bu yaklaşımların hiçbiri sıfır unutma garantisi sunamamakta ve çoğu ek bellek ya da yüksek hesaplama maliyeti gerektirmektedir.

Tam bu noktada, Behrouz ve arkadaşları tarafından NeurIPS 2025'te tanıtılan geniş kapsamlı Nested Learning paradigması dikkat çekici bir alternatif sunmaktadır [Behrouz et al., 2025]. Yazarlar, derin öğrenme süreçlerini “iç içe geçmiş, farklı zaman ölçeklerinde optimize edilen seviyeler” olarak yeniden yorumlayarak, modellerin bilgiyi context flow adı verilen mekanizma üzerinden sıkıştırarak öğrendiğini teorik olarak göstermektedir.

Bu bölümde, söz konusu Nested Learning çerçevesinin en minimal, en uygulanabilir ve şaşırtıcı derecede etkili bir özel durumunu sunuyoruz: paylaşılan özellik çıkarıcı katmanların yalnızca ilk görev üzerinde eğitilmesi ve bu aşamadan sonra tamamen dondurulması; her yeni görev için ise yalnızca küçük, görev-ölgül başlıkların optimize edilmesi. Şekil 1'in sağ panelinde görüldüğü gibi, bu basit strateji ilk görevin performansını matematiksel olarak tamamen korurken, ikinci görevde de yüksek doğruluk elde etmekte ve böylece catastrophic forgetting olgusunu kökten ortadan kaldırmaktadır.

İzleyen bölümlerde yöntemin mimari detaylarını ve teorik gerekçesini açıklayacak, aynı veri kümesi ve mimari altında gerçekleştirdiğimiz kontrollü deneyleri sunacak ve elde edilen dramatik performans iyileşmesini kapsamlı biçimde tartışacağız.



Şekil 1: Standart İnce Ayar (Fine-tuning) ve Nested Learning Yaklaşımının Sürekli Öğrenme Performans Karşılaştırması. (Sol Panel) Standart ince ayar yöntemi, Görev 1'i (son 5 sınıf) öğrenirken, daha önce öğrendiği Görev 0 (ilk 5 sınıf) üzerindeki test performansını (kareli kırmızı çizgi) dramatik bir şekilde kaybederek feci unutma sergilemektedir. (Sağ Panel) Özellik çıkarıcı katmanların dondurulduğu Nested Learning yaklaşımında ise Görev 0 performansı (kareli yeşil çizgi) tamamen korunurken (sıfır unutma), model yeni görev olan Görev 1'de de yüksek doğruluk elde etmektedir.

2. YÖNTEM: NESTED LEARNING'İN MİNİMALİST BİR UYGULAMASI

Bu bölümde, feci unutma (catastrophic forgetting) problemini ortadan kaldırmak amacıyla kullandığımız ve Nested Learning (NL) paradigmasının temel ilkeleri üzerine inşa edilen mimari yaklaşımı ayrıntılı biçimde ele alıyoruz. Önerdiğimiz yöntem, NL'nin teorik olarak öngördüğü çok seviyeli optimizasyon yapısının en sade, en düşük maliyetli ve en uygulanabilir versiyonunu temsil etmektedir: kalıcı bilgiyi depolayan ana gövdenin (shared backbone) yalnızca bir kez eğitilmesi ve daha sonra tamamen dondurulması; yeni görevler için ise küçük, esnek ve bağımsız görev modüllerinin (task-specific heads) eklenmesi.

Bu yapı, hem uygulama kolaylığı hem de teorik sağlamlık açısından dikkat çekicidir. Çünkü derin öğrenme modellerinde feci unutmaya yol açan temel mekanizma—aynı parametrelerin hem eski hem de yeni görevler için aynı anda optimize edilmeye çalışılması—bu tasarımda tamamen ortadan kaldırılmaktadır.

Aşağıda, Nested Learning paradigmasının bu çalışmada nasıl yorumlandığını ve önerdiğimiz mimarinin teorik gerekçesini sunuyoruz.

2.1. Nested Learning Perspektifi ve Teorik Zemin

Behrouz ve arkadaşları tarafından ortaya konan Nested Learning paradigması, geleneksel derin öğrenme modellerini her biri farklı öğrenme hızına, farklı güncelleme dinamiklerine ve farklı “context flow” yapısına sahip iç içe geçmiş optimizasyon seviyeleri olarak yeniden tanımlar [Behrouz et al., 2025]. Bu çok seviyeli yapı iki temel bileşenden oluşur:

Yavaş öğrenen seviyeler:

- Modelin genel ve kalıcı bilgisini taşır.
- Parametre güncellemeleri azdır veya tamamen durdurulabilir.
- Uzun dönemli hafızaya (long-term memory) denk gelir.

Hızlı öğrenen seviyeler:

- Göreve özgü bilgiyi hızla edinir.
- Daha esnek ve değişkendir.
- Kısa dönemli hafızaya (short-term memory) karşılık gelir.

Teorik model, bu seviyeler arasındaki ilişkiyi hiyerarşik ve yönlendirilmiş bir optimizasyon zinciri olarak görür. Yavaş seviyenin context flow'ı stabil kaldığı sü-

rece, hızlı seviyelerde yapılan güncellemeler yukarıdaki temsil uzayını bozamaz. Böylece feci unutmaya, olasılıksal bir risk değil, matematiksel olarak engellenmiş bir durum hâline gelir. Bizim yaklaşımımız bu teoremin en yalın somutlaşmasıdır.

2.2 Mimari Detaylar

Şekil 2’de sunulan mimari, Nested Learning yaklaşımının bu çalışmadaki yalın uygulamasını temsil eder ve üç temel bileşenden oluşur [Behrouz et al., 2025]. Bu bileşenlerin her biri, modelin farklı görevler için hem verimli hem de feci unutmaya karşı dayanıklı bir şekilde öğrenmesini sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Paylaşılan ve Dondurulmuş Özellik Çıkarıcı (Shared Feature Extractor): Mimari, giriş görüntüsünden yüksek seviyeli temsil çıkaran bir evrişimli sinir ağı (CNN) gövdesi ile başlar. Bu gövde, Görev 0 üzerinde eğitildikten sonra:

- Yaklaşık **3136 boyutlu** sabit bir özellik vektörü üretir,
- Tüm parametreleri *requires_grad = False* olacak şekilde **tamamen dondurulur**,
- Sonraki tüm görevler için **ortak ve değişmez** bir temel oluşturur.

Bu aşamadan sonra, omurgadaki hiçbir parametre gradyan akışından etkilenmediği için, modelin uzun dönemli hafızası korunmuş olur.

Görev-Özgü Adaptör Katmanları (Task-Specific Memory / Adapter Layers): Her görev için, dondurulmuş özellik vektörünü o göreve özel alt bir temsil uzayına projeksiyonlayan küçük bir tam bağlantılı katman tanımlanır. Bu adaptör katmanı:

- **3136 → 128** biçiminde daraltılmış bir temsil üretir,
- Sabit omurganın içerdiği genel bilgiyi, ilgili görevin ihtiyaçlarına uygun bir forma dönüştürür,
- Yeni görevin karar sınırlarını öğrenmesi için gerekli düşük boyutlu ve esnek bir özellik alanı sağlar.

Bu katman yalnızca kendisine ait görev verileriyle eğitildiğinden, görevler arasında bilgi taşınması veya bozunma gerçekleşmez.

Görev-Özgü Sınıflandırıcı Katmanları (Task-Specific Classifiers): Her adaptörün çıktısı, yine yalnızca o görev için optimize edilen sınıflandırıcıya aktarılır. Bu son katman:

- **128 → 5** boyutlu bir sınıflandırma dönüşümü gerçekleştirir,

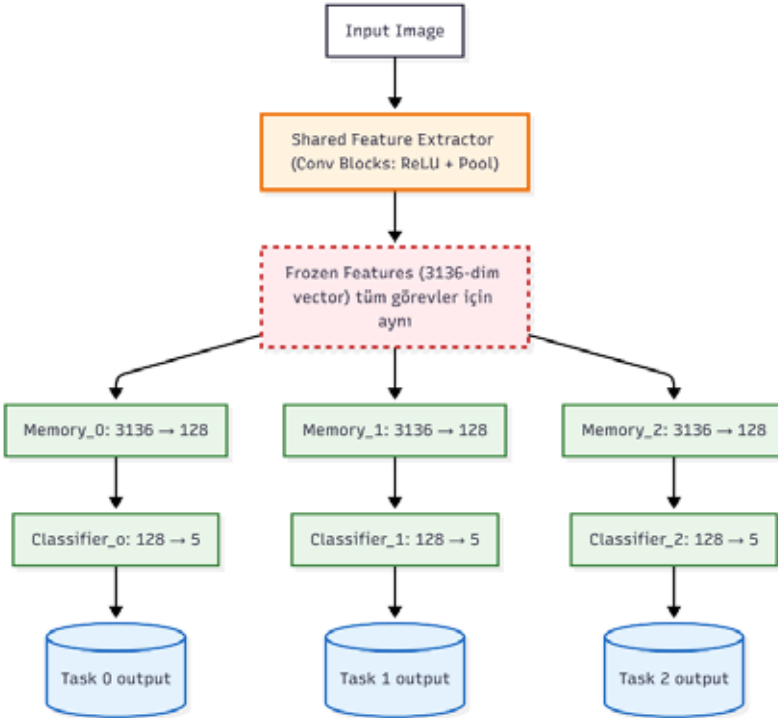
- Görev çıktısını doğrudan üretir,
- Eğitim sırasında yalnızca ilgili adaptör + sınıflandırıcı çiftinin gradyanlarını günceller.

Bu tasarım, görevler arası parametre izolasyonunu garanti eder; bir görevi öğrenmek için yapılan güncellemeler diğer görevleri etkilemez.

Mimari Tasarımın Pratik Sonuçları: Bu yapı, klasik ince ayar (fine-tuning) yaklaşımından farklı olarak:

- **Omurganın yeniden eğitilmesini** gerektirmez,
- Ek bellek maliyetini minimum düzeyde tutar (her yeni görev için yalnızca küçük bir modül eklenir),
- Hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltır,
- Her yeni görevin eğitilmesini hızlandırır,
- Feci unutmayı parametre düzeyinde yapısal olarak imkânsız hâle getirir.

Bu nedenle, mimari hem pratik uygulamalar için oldukça uygundur hem de Nested Learning teorisinin öngördüğü çok seviyeli öğrenme çerçevesiyle tam uyumludur.



Şekil 2: Nested Learning tabanlı feci unutmayı önleyen mimari.

Giriş görüntüsü, ilk görevde eğitildikten sonra tamamen dondurulan paylaşılan özellik çıkarıcıdan geçirilir. Elde edilen 3136 boyutlu sabit özellik vektörü tüm görevlerde ortak olarak kullanılır. Her görev için yalnızca ufak bir Adaptör (Memory) ve Sınıflandırıcı katmanı eklenir ve eğitilir. Bu yapı, yeni görevlerin öğrenilmesinin eski görevlerdeki temsilleri bozmasını yapısal olarak engeller.

2.3. Eğitim Prosedürü

Önerdiğimiz yaklaşımın eğitim süreci, yapısal olarak son derece yalın ancak etkisi itibarıyla güçlü bir protokole dayanmaktadır. Modern derin öğrenme kütüphanelerinde (PyTorch, TensorFlow vb.) yalnızca birkaç satırlık bir müdahaleyle uygulanabilen bu prosedür, herhangi bir ek hiperparametre ayarlaması, karmaşık düzenleme stratejisi veya bellek tekrar (replay) mekanizması gerektirmeden **feci unutmayı tamamen ortadan kaldırmaktadır**. Bu sürecin tüm adımları **Algoritma 1**'de özetlenmiştir.

Algoritma 1 Nested Learning ile Sıfır Feci Unutma için Eğitim ve Çıkarım

```
1: Girdi:
2:   Görev veri kümeleri:  $D = \{D_0, D_1, \dots, D_{T-1}\}$ 
3:   Paylaşılan omurga (backbone) modeli:  $B$ 
4:   Görev-özellik başlıklar:  $H = \{h_0, h_1, \dots, h_{T-1}\}$ 
5:   Çıktı: Tüm görevler için eğitilmiş parametreler  $\{B, H\}$ 

6: Aşama 1: İlk Görevin Ortak Eğitimi
7:    $(B, h_0) \leftarrow \text{Train}(B, h_0, \text{veri} = D_0)$ 
8:   //  $B$  ve  $h_0$  birlikte optimize edilir

9: Aşama 2: Omurganın Dondurulması
10:   $B.\text{freeze}()$ 
11:  // Omurga parametrelerinin gradyan hesaplaması kapatılır (ör.  $\text{requires\_grad} = \text{False}$ )

12: Aşama 3: Sonraki Görevlerin Bağımsız Eğitimi
13:  for  $t = 1$  to  $T - 1$  do
14:     $h_t \leftarrow \text{Train}(h_t, \text{sabit\_omurga} = B, \text{veri} = D_t)$ 
15:    // Sadece  $h_t$  optimize edilir
16:  end for

17: Çıkarım Prosedürü
18:  procedure ÇIKARIM( $x, t$ )
19:     $f \leftarrow B(x)$ 
20:    // Dondurulmuş omurgadan sabit özellik çıkarımı
21:     $\hat{y} \leftarrow h_t(f)$ 
22:    // Göreve özgü başlık kullanılarak çıktı hesaplanır
23:    return  $\hat{y}$ 
24:  end procedure
```

Algoritma, mantıksal olarak üç temel aşamadan oluşur:

Aşama 1: İlk Görevin Ortak Eğitimi. Algoritma 1'in satır (1–8) aralığında gösterildiği üzere, eğitim süreci paylaşılan omurga modeli **B** ile ilk görev başlığının h_0 birlikte optimize edilmesiyle başlar. Bu aşamada:

- Yalnızca **Görev 0'in verisi** kullanılır,
- Hem omurganın parametreleri hem de başlığın parametreleri standart denetimli öğrenme altında güncellenir.

Bu adım, modelin tüm görevler için kalıcı bir temel oluşturacak olan genel temsilleri öğrenmesini sağlar.

Aşama 2: Omurganın Dondurulması. İlk görevin eğitiminden sonra gerçekleştirilen bu adım, yaklaşımın en kritik noktasını temsil eder. Algoritma 1'de satır (10) ile gösterilen bu aşamada:

- Omurganın tüm parametreleri **kalıcı olarak dondurulur**,
- Omurga bölgesine ait gradyan akışı tamamen kapatılır (ör. *requires_grad = False*),
- Böylece omurga modeli, sonraki görevlerden etkilenmeyen bir **kararlı özellik çıkarıcı** hâline gelir.

Bu adım sayesinde modelin uzun dönemli hafızası sabitlenmiş olur.

Aşama 3: Sonraki Görevlerin Bağımsız Eğitimi. Her yeni görev t için (satırlar 13–16), yalnızca o göreve özel başlık h_t kendi verisi üzerinde eğitilir. Bu süreçte:

- Omurga **B** dondurulmuş hâlde kalır,
- Daha önce eğitilmiş hiçbir başlığın $\{h_0, \dots, h_{t-1}\}$ parametreleri güncellenmez,
- Gradyanlar yalnızca ilgili h_t üzerinden akar.

Dolayısıyla her görev, diğerlerinden tamamen bağımsız bir parametre alt uzayında öğrenilir.

Parametre İzolasyonunun Etkisi: Bu katı parametre izolasyonu, Nested Learning'in teorik temeliyle tam uyumlu bir biçimde, görevler arasındaki etkileşimin model tarafından yapısal olarak engellendiği bir ortam yaratır. Bu sayede:

- Farklı görevlere ait parametre kümeleri tamamen **ayrık (disjoint)** kalır,
- Yeni görevleri öğrenirken yapılan güncellemelerin önceki görevlerin performansını bozması **matematiksel olarak imkânsız** hâle gelir.

Bu basit fakat güçlü mekanizma, herhangi bir ek maliyet veya karmaşık optimizasyon gerektirmeden **feci unutmayı tamamen sıfırlar**.

3. DENEYSEL DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, önerdiğimiz Nested Learning tabanlı yaklaşımın etkinliğini, standart ince ayar (fine-tuning) yöntemiyle karşılaştırmalı olarak değerlendiriyoruz. Deneylerin nesnel, tekrarlanabilir ve adil olmasını sağlamak amacıyla tüm koşullar sıkı biçimde kontrol edilmiştir. Her iki yaklaşım da aynı mimari, aynı hiperparametreler, aynı optimizasyon ayarları ve aynı rastgele başlangıç tohumu (seed = 42) kullanılarak eğitilmiş; böylece gözlemlenen performans farkının yalnızca uygulanan öğrenme stratejisinden kaynaklandığı garanti edilmiştir.

3.1 Karşılaştırma Yöntemleri

- **Baseline: Standart İnce Ayar (Fine-Tuning):** Model önce Görev 0 üzerinde eğitilir ve ardından **tüm parametreleri** (hem omurga hem de sınıflandırıcı başlık) Görev 1'in verileriyle güncellenmeye devam eder. Bu yaklaşım, literatürde yaygın olarak kullanılan klasik transfer öğrenme stratejisidir.
- **Önerilen Yöntem: Nested Learning:** Model Görev 0 üzerinde eğitildikten sonra, Bölüm 2'de anlatıldığı şekilde **omurga (backbone) tamamen dondurulur** ve Görev 1 için yalnızca o göreve özgü başlık eğitilir. Böylece her görev kendi parametre alt uzayında öğrenmeye devam eder ve feci unutma tamamen engellenir.

3.2 Veri Kümesi ve Görev Tanımı

Deneysel değerlendirmede, sürekli öğrenme çalışmalarında [Lesort, T et al., 2019] yaygın olarak kullanılan **Fashion-MNIST** veri seti [Xiao et al., 2017] kullanılmıştır. Feci unutma etkisini belirgin şekilde gözlemleyebilmek amacıyla veri seti, sınıf kümeleri kesişmeyen iki ayrık göreve bölünmüştür:

- **Görev 0:** İlk 5 sınıf (T-shirt/top, Trouser, Pullover, Dress, Coat)
- **Görev 1:** Son 5 sınıf (Sandal, Shirt, Sneaker, Bag, Ankle boot)

Her görev, **30.000 eğitim** ve **5.000 test** örneği içermektedir. Görev içi etiketler 0–4 aralığına yeniden ölçeklendirilmiştir. Bu tür **sınıf-ayrık (class-disjoint)** bir yapı, modellerin feci unutmaya ne kadar dayanıklı olduğunu test etmek açısından zorlayıcı ve ideal bir senaryo sunar [Kemker et al., 2018].

3.3 Paylaşılan Mimari ve Eğitim Parametreleri

Her iki öğrenme stratejisi (standart fine-tuning ve Nested Learning) için **tamamen aynı CNN mimarisi** kullanılmıştır. Bu sayede yöntemler arasındaki performans farkı yalnızca öğrenme protokolüne atfedilebilir.

Omurga (Backbone) Mimarisi: Aşağıdaki iki evrişim bloğundan oluşan temel CNN yapısı kullanılmıştır:

- **Conv2D(64, kernel_size = 3, padding = 1) → ReLU → MaxPool2D(2)**
- **Conv2D(64, kernel_size = 3, padding = 1) → ReLU → MaxPool2D(2)**
- **Flatten → 3136 boyutlu sabit özellik vektörü**

Bu yapı, giriş görüntülerinden görevlere genel olan yüksek seviyeli temsilleri çıkaran paylaşılan omurgayı oluşturur.

Görev-Özgül Başlık (Head) Mimarisi: Her görev için aşağıdaki küçük tam bağlantılı ağ kullanılmıştır:

- **Linear(3136 → 128) → ReLU** (*Adaptör/Bellek katmanı*)
- **Dropout(p = 0.5)**
- **Linear(128 → 5)** (*Göreve özgü sınıflandırıcı katmanı*)

Bu tasarım Nested Learning yaklaşımının uyarlanabilirliğini doğrudan destekler; yalnızca bu küçük başlık modülü görevler arasında değişir. Bu mimari, her iki yöntemde de yaklaşık **620K öğrenilebilir parametre** içermektedir.

Eğitim Hiperparametreleri: Tüm çalışmaların adil şekilde karşılaştırılabilmesi için aşağıdaki sabit hiperparametreler kullanılmıştır:

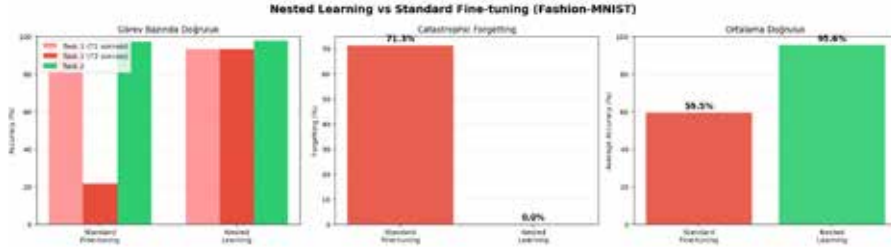
- **Optimizasyon:** Adam (öğrenme oranı = 0.001)
- **Kayıp Fonksiyonu:** Cross-Entropy Loss
- **Batch Boyutu:** 128
- **Eğitim Süresi:** Her görev için 5 epoch

4. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen deneyler, önerdiğimiz Nested Learning yaklaşımının, standart ince ayar (fine-tuning) yöntemine kıyasla feci unutmayı önlemede belirgin ve sistematik bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Bu bölümde elde edilen performans çıktıları hem özet tablolar hem de görsel analizlerle sunulmaktadır.

4.1 Genel Performans Karşılaştırması

İki öğrenme stratejisinin temel değerlendirme metriklerine etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu grafikler, Nested Learning yaklaşımının yalnızca feci unutmayı ortadan kaldırmakla kalmadığını, aynı zamanda toplam sınıflandırma performansını da önemli ölçüde iyileştirdiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 3: Genel Performans Analizi (Sol Panel).

Her iki görevin tamamlanmasının ardından elde edilen doğruluk oranları karşılaştırılmaktadır. Standart ince ayar yönteminde, Görev 1 öğrenildikten sonra Görev 0 performansında dramatik bir çöküş gözlenmektedir. **(Orta Panel)** Feci unutma oranları gösterilmektedir. Standart yöntemde unutma oranı **%71.3** seviyesinde ölçülmüş; Nested Learning'de ise bu oran **tam olarak sıfırdır**. **(Sağ Panel)** İki görev için ortalama doğruluk değerleri verilmektedir. Nested Learning, standart yöntemle kıyasla **%36'lık bir artış** sağlayarak ortalama doğruluğu **%95.6** seviyesine yükseltmektedir.

Grafiklerde de görüldüğü üzere:

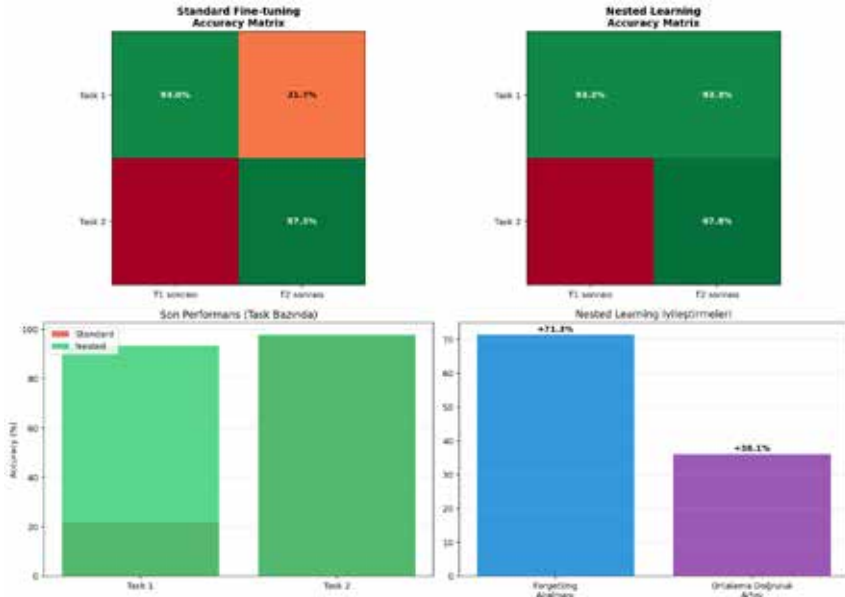
- Standart ince ayar yaklaşımı, Görev 1'i öğrenirken Görev 0'a ilişkin bilgiyi büyük ölçüde kaybetmiş ve ortalama doğruluk **%59.5** seviyesine kadar düşmüştür.
- Buna karşın Nested Learning,
 - Görev 0 bilgisini **tamamen korumuş**,
 - Görev 1'de de yüksek düzeyde performans göstermiş,
 - toplam ortalama doğruluğu **%95.6** seviyesine yükseltmiştir.

Bu sonuç, Nested Learning'in **%36.1 mutlak performans artışı** sağladığını göstermektedir; bu da yöntemin yalnızca unutmayı engelleyen değil, aynı zamanda genel doğruluğu artıran bir mekanizma sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.2 Detaylı Analiz: Doğruluk Matrisleri ve İyileşme Oranları

Feci unutmanın dinamiklerini daha yakından incelemek için Şekil 4'te sunulan doğruluk matrisleri ve görev bazlı performans dökümlerine bakabiliriz. Üst paneldeki doğruluk matrisleri, feci unutmanın etkilerini açık biçimde göstermektedir. Standart fine-tuning matrisinde, Görev 1 öğrenildikten sonra Görev 0 doğruluğu %93.0'dan %21.7'ye düşmektedir (hücre: [Task 0, T2 sonrası]). Buna karşılık, Nested Learning matrisinde aynı hücrede doğruluk %93.3'te korunmaktadır. Matrisin sol alt köşesindeki kırmızı bölgeler ise, Görev 2 henüz model tarafından işlenmediği için doğruluk değerinin hesaplanamadığını göstermektedir.

Alt panelde ise görev bazlı son performans ve Nested Learning'in sağladığı iyileşme oranları sunulmaktadır. Sol alt panelde her görev için elde edilen son doğruluklar, sağ alt panelde ise Nested Learning yaklaşımı sayesinde elde edilen net kazanımlar (%71.3'lük unutma azalması ve %36.1'lik ortalama doğruluk artışı) gösterilmektedir. Bu görseller, sayısal sonuçları destekleyen görsel bir kanıt sunmaktadır.



Şekil 4. Detaylı Sonuç Analizi. Üst Panel: Standart fine-tuning ve Nested Learning yöntemleri için doğruluk matrisleri gösterilmektedir. [Task 0, T2 sonrası] hücresi, feci unutmanın yaşandığı kritik noktayı temsil eder; standart yöntem bu değeri %21.7'ye düşürürken, Nested Learning %93.3'te korumaktadır. Alt Panel: Sol alt köşede görev bazlı son performanslar, sağ alt köşede ise Nested Learning'in sağladığı net iyileşme oranları (%71.3 feci unutma azalması ve

%36.1 ortalama doğruluk artışı) sunulmaktadır.

Tablo 1, her iki yöntemin görevler üzerindeki son doğruluklarını, unutma oranlarını ve ortalama doğruluklarını karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Tablo incelendiğinde, Nested Learning'in tüm görevler boyunca eski bilgiyi neredeyse tamamen koruduğu ve ortalama doğrulukta ciddi bir artış sağladığı net biçimde görülmektedir.

Tablo 1: Standart İnce Ayar (fine tuning) ve Nested Learning Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Performans Sonuçları

Yön-tem	Görev 0 (T1 sonrası)	Görev 0 (T2 sonrası)	Görev 1 (T2 sonrası)	Unutma (Forgetting)	Ortala-ma Doğ-ruluk
Stan-dart Fi-ne-tu-ning	93.04 %	21.74 %	97.26 %	71.30 %	59.50 %
Nested Lear-ning	93.34 %	93.34 %	97.76 %	0.00 %	95.55 %

Bu sonuçlar, görsel ve sayısal verilerin birbiriyle tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır: Nested Learning yaklaşımı, ek bellek, karmaşık algoritmalar veya yoğun hesaplama gerektirmeden, yalnızca mimari bir değişiklik ile feci unutmayı tamamen engellemektedir. Bu yapı, sürekli öğrenme senaryolarında kararlı ve güvenilir bir temel oluşturur.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, feci unutma sorununa karşı Nested Learning paradigmasından esinlenen minimalist bir yaklaşımın etkinliği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Elde edilen bulgular, yalnızca sayısal başarıyı değil, aynı zamanda sürekli öğrenme problemine yönelik temel bir mimari prensibin gücünü de ortaya koymaktadır.

5.1 Bulguların Yorumlanması ve Teorik Bağlantı

Deneysel sonuçlarımızın en önemli mesajı şudur: Feci unutmama, kaçınılmaz bir kader değil, mimari bir tasarım tercihinin sonucudur. Standart fine-tuning yönteminde, paylaşılan parametrelerin hem eski hem de yeni görevler için optimize edilmeye çalışılması, kaçınılmaz olarak bir “parametresel çekişme” yaratır ve eski bilgi kaybolur. Gözlemlediğimiz %71.3’lük unutmama oranı, bu çekişmenin somut bir göstergesidir.

Önerdiğimiz yaklaşım ise bu çekişmeyi, parametreleri katı bir şekilde izole ederek tamamen ortadan kaldırır. Omurga (backbone) dondurularak kalıcı ve güvenilir bir “uzun dönemli hafıza” oluşturulurken, her yeni görev için eklenen başlıklar, bu sağlam temel üzerine inşa edilen esnek “kısa dönemli hafıza” modülleri olarak işlev görür. Bu yapı, Behrouz ve arkadaşlarının (2025) tanımladığı “farklı zaman ölçeklerinde öğrenen iç içe geçmiş seviyeler” fikrinin en doğrudan ve uygulanabilir hâlidir. Sonuç olarak elde edilen %0.00 unutmama oranı, bu tasarımın teorik vaatlerinin pratik bir doğrulamasıdır.

Yöntemin en dikkat çekici yönü, bu başarıya tekrar oynatma (replay), düzenlileştirme (regularization) veya karmaşık gradyan projeksiyonu gibi ek mekanizmalara ihtiyaç duymadan, sıfır ek maliyetle ulaşılmış olmasıdır [Van de Ven, G. M., et al.,2020].

5.2. Yöntemin Avantajları Ve Pratik Uygulama Alanları

Bu basit ama güçlü yaklaşım, sürekli öğrenmenin gerçek dünya problemlerine uygulanmasında önemli avantajlar sunmaktadır:

- **Kaynak Verimliliği:** Her yeni görevde yalnızca küçük bir başlık eğitildiğinden, eğitim süresi ve hesaplama maliyeti önemli ölçüde azalır. Bu, özellikle kenar bilişim (edge AI) cihazları ve gömülü sistemler için kritik bir avantajdır.
- **Güvenilirlik ve Güvenlik:** Modelin daha önce öğrendiği yetenekleri (ör. belirli tıbbi anomali tanıma) kaybetmeyeceği garantisi, sağlık, otonom sürüş ve finans gibi kritik uygulamalarda hayati önem taşır.
- **Veri Gizliliği:** Yeni görev verileriyle yalnızca küçük bir modülün güncellenmesi, eski verilerin tekrar erişilmesini gerektirmez; bu, veri gizliliği standartlarına uyumu kolaylaştırır.
- **Uygulama Kolaylığı:** Yöntem mevcut derin öğrenme kütüphanelerinde birkaç satır kodla uygulanabilir, bu da araştırmacı ve geliştiriciler için erişilebilirliği artırır.

5.3. Kısıtlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmanın sonuçları umut verici olsa da, yaklaşımın bazı kısıtlılıkları ve gelecekte araştırılması gereken yönleri vardır:

- **Özellik Çıkarıcının Kalitesi:** Yöntemimizin başarısı, ilk görev(ler) üzerinde eğitilen özellik çıkarıcının genellenebilirliğine bağlıdır. Eğer ilk görev, sonraki görevler için yeterince zengin ve anlamlı özellikler sağlamazsa, “negatif transfer” riski ortaya çıkabilir.
- **Görevler Arası Benzerlik:** Deneylerimiz, anlamsal olarak ilişkili görevler (ör. giysi sınıflandırması) üzerinde yapılmıştır. Birbirinden tamamen farklı görevler (ör. önce giysi, sonra hayvan sınıflandırması) için dondurulmuş omurganın etkinliği araştırılmalıdır.
- **Daha Esnek Modeller:** Omurgayı tamamen dondurmak en katı ve güvenli yaklaşımdır. Gelecek çalışmalarda, omurganın belirli katmanlarının dondurulduğu veya düşük bir öğrenme oranıyla güncellendiği “kısmi dondurma” (partial freezing) stratejileri incelenebilir.

SONUÇ

Bu kitap bölümünde, Nested Learning paradigmasının temel bir uygulamasının Fashion-MNIST veri seti üzerinde feci unutmayı tamamen ortadan kaldırdığını ve ortalama doğruluğu %36 artırdığını gösterdik. Önerilen yöntem, sürekli öğrenme alanındaki birçok karmaşık yaklaşımın aksine basit, verimli ve güvenilir bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışma, Nested Learning teorisinin gücünü ortaya koyan temel bir yapı taşı olarak, sürekli öğrenmenin laboratuvar-
dan çıkıp gerçek dünya uygulamalarında yaygınlaşmasının önünü açabilecek önemli bir potansiyele sahiptir.

KAYNAKÇA

- Behrouz, A., Razaviyayn, M., Zhong, P., & Mirrokni, V. (2025). Nested Learning: The Illusion of Deep Learning Architectures. In *The Thirty-ninth Annual Conference on Neural Information Processing Systems*.
- De Lange, M., Aljundi, R., Masana, M., Parisot, S., Jia, X., Leonardis, A., ... & Tuytelaars, T. (2021). A continual learning survey: Defying forgetting in classification tasks. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 44(7), 3366-3385.

- French, R. M. (1999). Catastrophic forgetting in connectionist networks. *Trends in cognitive sciences*, 3(4), 128-135.
- Kemker, R., McClure, M., Abitino, A., Hayes, T., & Kanan, C. (2018, April). Measuring catastrophic forgetting in neural networks. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence* (Vol. 32, No. 1).
- Kirkpatrick, J., Pascanu, R., Rabinowitz, N., Veness, J., Desjardins, G., Rusu, A. A., ... & Hadsell, R. (2017). Overcoming catastrophic forgetting in neural networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 114(13), 3521-3526.
- Lesort, T., Caselles-Dupré, H., Garcia-Ortiz, M., Stoian, A., & Filliat, D. (2019, July). Generative models from the perspective of continual learning. In *2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* (pp. 1-8). IEEE.
- Lopez-Paz, D., & Ranzato, M. A. (2017). Gradient episodic memory for continual learning. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Mallya, A., & Lazebnik, S. (2018). Packnet: Adding multiple tasks to a single network by iterative pruning. In *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7765-7773).
- McCloskey, M., & Cohen, N. J. (1989). Catastrophic interference in connectionist networks: The sequential learning problem. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 24, pp. 109-165). Academic Press.
- Rebuffi, S. A., Kolesnikov, A., Sperl, G., & Lampert, C. H. (2017). icarl: Incremental classifier and representation learning. In *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2001-2010).
- Xiao, H., Rasul, K., & Vollgraf, R. (2017). Fashion-mnist: a novel image dataset for benchmarking machine learning algorithms. *arXiv preprint arXiv:1708.07747*.
- Van de Ven, G. M., Siegelmann, H. T., & Tolias, A. S. (2020). Brain-inspired replay for continual learning with artificial neural networks. *Nature communications*, 11(1), 4069.

6. BÖLÜM

DOĞAL KAYNAKLI BİR BİLEŞİĞİN ANTİKANSER ETKİNLİĞİNİN İN SİLİCO YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Doç. Dr. Alev ER

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

alever@istanbul.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-3190-5342>

Prof. Dr. Sefa ÇELİK

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

<https://orcid.org/0000-0001-6216-1297>

Prof. Dr. Ayşen E. ÖZEL

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

<https://orcid.org/0000-0002-8680-8830>

Prof. Dr. Sevim AKYÜZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

<https://orcid.org/0000-0003-3313-6927>

1. GİRİŞ

Gossipol, pamuk bitkilerinde ve tohumlarında bulunan yoğun sarı renkli karmaşık bir polifenolik bileşiktir (Kenar, 2006). Polifenoller, meyveler, sebzeler, tahıllar ve içeceklerde bulunan doğal bileşiklerdir. Pamuktaki gossipol ve ilgili seskiterpen aldehytler, patojenlere ve zararlılara karşı fitoaleksinler olarak işlev görür (Tian vd. 2018). Kimyasal formülü (C₃₀H₃₀O₈) olan gossipol toksisi-

tesini karbon zincirinde bulunan iki aldehit grubuna ve biyolojik aktivitesini 6 fenolik hidroksil grubuna borçludur (Wani vd. 2022). Bitkisel kökenini (Gossipium) ve kimyasal yapısını (fenol) belirtmek için Gossipol olarak adlandırılır.

19. yüzyılın sonlarından beri bilinen gossipol farklı türde biyolojik aktiviteler sergileme ve çok sayıda supramoleküler kompleks oluşturma konusunda olağanüstü yeteneğe sahiptir (Ibragimov vd. 2013). Gossipol'un kısırlık önleyici, antioksidan, antikanser, antiviral, antiparaziter ve antimikrobiyal özellikler sergilediği ve plazma kolesterolünü düşürdüğü bildirilmiştir (Keshmiri-Neghab vd. 2014). Gossipol'un iki optik enantiyomeri ((-)-gossipol ve (+)-gossipol) üç farklı tautomeri (aldehit, keton ve laktoz) bulunur. Özellikle antitümör ve antivirüs gibi çekici biyolojik aktiviteleri nedeniyle önemli bir araştırma konusu haline gelen gossipol toksiktir ve pamuk bitkilerini zararlılara karşı koruyan bir mekanizma sağlar (Liu vd. 2022).

Erkek kontraseptif ilacı olan gossipol'un, in vitro olarak birçok kanser hücresi üzerinde antiproliferatif ve antimetastatik etkileri olduğu gösterilmiştir. HT-29 insan karsinoma hücre hattı, gossipol kaynaklı hücre ölümüne en duyarlı hücre hatlarından biridir (Zhang vd. 2003). Klinik çalışmalar, özellikle faz I ve II, gossipolün antikanser ajanı olarak umut vaat ettiğini ortaya koymakta ve etkinliğini ve yönetilebilir toksisite profillerini göstermektedir (Paunovic vd. 2023). 1990 yılında yapılan bir çalışmada gossipol'un mitokondriyal olmayan ve enzim inhibe edici özellikleri, saflaştırılmış (+)- ve (-)-enantiomerlerinin etkileri karşılaştırılarak, meme, yumurtalık, kolon ve pankreas kaynaklı insan karsinom hücre hatlarında incelenmiş, (-)-gossipol, kanser hücre hatlarında ve in vitro olarak yetiştirilen normal hematopoietik kök hücrelerde (+)-gossipol'den 10 kata kadar daha fazla antiproliferatif aktivite gösterdiği belirtilmiştir (Benz vd. 1990). Gossipol'un kolon karsinomu tedavisi için potansiyel bir terapötik fayda sağlayabileceği 2000 yılındaki bir çalışmada belirtilmiştir (Wang vd. 2000). 2008 yılında yapılan bir çalışmada 6-Metoksigossipol, 6,6'-dimetoksigossipol ve gossipolun antioksidan etkileri ve antikanser aktivitesi incelenmiş 6-metoksigossipol genel olarak 6,6'-dimetoksigossipol ile eşit biyoaktiviteler sergilerken, gossipol, iki metillenmiş türevden daha fazla aktivite göstermiştir (Wang vd. 2008). Gossipol, geleneksel antikanser ilaçlarla birlikte kullanıldığında önemli bir sinerjik potansiyel göstererek kanser tedavisi için yeni yollar sunmaktadır (Sharma vd. 2025). Gossipol ve türevleri, in vitro ve in vivo olarak farklı kanser türleri üzerinde antitümör etkiler gösterir, diğer kemoterapi ve radyoterapi tedavileriyle sinerjik etkiler sergiler (Zeng vd. 2019). Gossipol birçok parazit organizmanın büyümesini engeller ve AIDS virüsü dahil olmak üzere birçok zarflı virüse karşı antiviral etki gösterir. Toksisiteye katkıda bulu-

nan aldehit fonksiyonel gruplarının modifiye edildiği gossipol türevleri, biyolojik aktivitesini korur ve hatta daha da güçlendirir (Vander vd. 2000).

Gossipolün insanlarda kansere karşı etkili olabileceğine dair yapılan bir çalışmada, adrenal kanser tedavisi olarak oral gossipolün etkinliği incelenerek metastatik adrenal kanseri hastalara oral gossipol uygulanmış ve tümörleri diğer kemoterapötik ajanlara dirençli olan hastaların en az 6 haftalık gossipol tedavisi sonrasında birkaç aydan 1 yıla kadar süren kısmi tümör yanıtı görülmüştür (Flack vd. 1993). Gossipol'un ana metaboliti olan gossipolon da antisteroidojenik aktiviteye sahiptir. Gossipolon'un hormon bağımlı ve hormon bağımsız insan meme kanseri hücre çoğalması üzerindeki etkileri gossipol ile karşılaştırılarak 10 μM 'ye kadar konsantrasyonlarda incelenmiş, incelenen tüm insan meme hücre hatlarında DNA sentezini doza bağılı olarak baskılama etkisi göstermiştir. Gossipolon, insan meme kanseri hücre hatlarında bu etkileri üretme konusunda gossipol'den daha az etkilidir ancak gossipol ile eşit derecede antisteroidojenik ve antireprodüktif aktivitelere sahiptir. Bu araştırmalar, gossipol ve gossipol türevlerinin insan meme kanseri için terapötik potansiyele sahip olabileceğini göstermektedir (Gilbert vd. 1995). Gossipol yüklü nanotransportörler, kanser tedavisinde umut verici bir sınır temsil etmekte ve doğal ürünlerin etkinliği ile klinik uygulanabilirlik arasındaki boşluğu potansiyel olarak kapatmaktadır (Swarn vd. 2025).

Birçok hastalık, özellikle kanser, farklılaşma, çoğalma gibi hücresel fonksiyonları kontrol etmek için gerekli olan reseptör tirozin kinazların (RTK'lar) işlev bozukluğuyla bağlantılıdır. Bunlar arasında, anti-neoplastik tedaviler için umut vaat eden hedefler olarak gösterilen epidermal büyüme faktörü reseptörü (EGFR) de bulunmaktadır. Antikanser ilaç adayları moleküllerin tirozin kinaz aktif bölgesine rekabetçi bir şekilde bağlanarak ATP alımını ve reseptörden aşağı doğru sinyal iletimini önlemek üzere tasarlanmış EGFR hedefli inhibitörler olmaları beklenir. Tirozin kinaz inhibitörlerinin (TKI'lar), kanser hücrelerinin sinyal iletim yollarını engellemede önemi büyüktür (Ali vd. 2026). Tirozin kinazlar, onkogenik proteinlerin önemli bir bölümünü oluşturur ve bu nedenle, çeşitli tümörlerde neoplastik dönüşüm sürecinde sıklıkla merkezi bir rol oynar. Anormal tirozin kinaz aktivasyonuna yol açan hastalıklar için terapötik ajanların tanımlanması ve geliştirilmesi, kanser tedavisinde bir öncelik haline gelmiştir (Workman, 2003; Sawyers, 2002; Hussein vd. 2025).

DNA, kanser tedavisi yöntemlerinde birincil hedeftir. Birçok terapötik ajan, DNA molekülüyle doğrudan etkileşime girer veya topoizomerazları inhibe ederek DNA'nın gevşemesini etkiler (Giulietti vd. 2016; Mehdipour vd. 2019). DNA'yı hedef alan küçük moleküller hızla büyüyen hücreleri öldürür ve te-

rapötik bir pencere oluşturur. Sonuç olarak, DNA'yı hedef alan doğal bileşiklerin ve bunların bağlanma modlarının araştırılması, kabul edilebilir yan etkilerin minimum olduğu kanser tedavisinde umut verici yaklaşımlar olarak değerlendirilebilir ve ayrıca bu bileşiklerin biyolojik önemine ilişkin farkındalığın artırılmasına yardımcı olabilir (Chen vd. 2014; Dehkordi vd. 2021).

Gossipol molekülünün her bir izomeri ile EFGR (PDB ID: 4HJO) ve B-DNA (PDB ID: 1BNA) reseptörlerinin bağlanma mekanizmaları ve moleküler etkileşimleri moleküler kenetleme çalışmaları yoluyla belirlenmiştir.

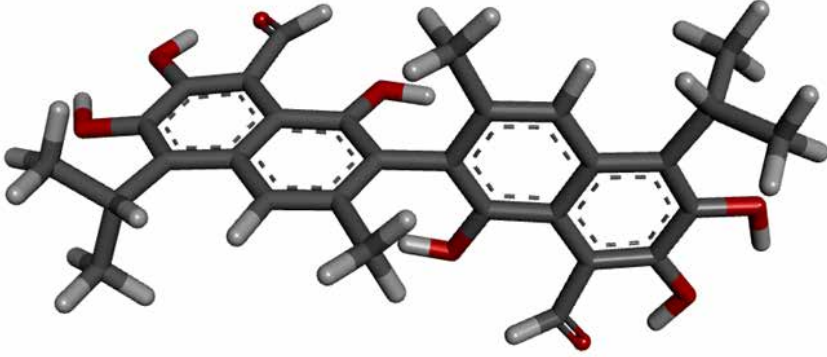
2. YÖNTEMLER VE HESAPLAMALAR

Bu çalışmada gossipol molekülünün antikanser aktivitesinin incelenmesi amaçlanmıştır. Moleküler kenetlenme hesaplamaları öncesinde Spartan06 programı (Shao vd. 2006) ve MMFF (Moleküler Mekanik Kuvvet Alanı) yöntemi ile molekülün her üç tautomerinin en kararlı konformasyonu belirlenerek optimize geometrisi elde edilmiştir. En kararlı bu konformasyon ve Protein Data Bank'tan (<http://www.rcsb.org/pdb>) seçilen reseptörler (PDB ID: 4HJO ve PDB ID: 1BNA) (Park vd. 2012; Drew vd. 1981) YASARA Structure programı (v22.9.24) (Krieger vd. 2014) ve NOVA kuvvet alanı (Krieger vd. 2002) kullanılarak minimize edilmiştir.

EGFR (PDB ID: 4HJO) ve B-DNA (PDB ID: 1BNA) reseptörleri ve gossipol molekülünün moleküler kenetlenme çalışmaları YASARA Structure programı (v22.9.24) ve VINA yaklaşımı (Krieger vd. 2014) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hedef proteinden tüm su molekülleri ve ko-kristalize ligandlar çıkarılarak protein yapısına polar hidrojen atomları eklenmiştir ve moleküler kenetlenme hesaplamaları için hazırlanmıştır. Hedef proteinin Kollman yükleri, diğer parametreler varsayılan tutularak hesaplanmıştır.

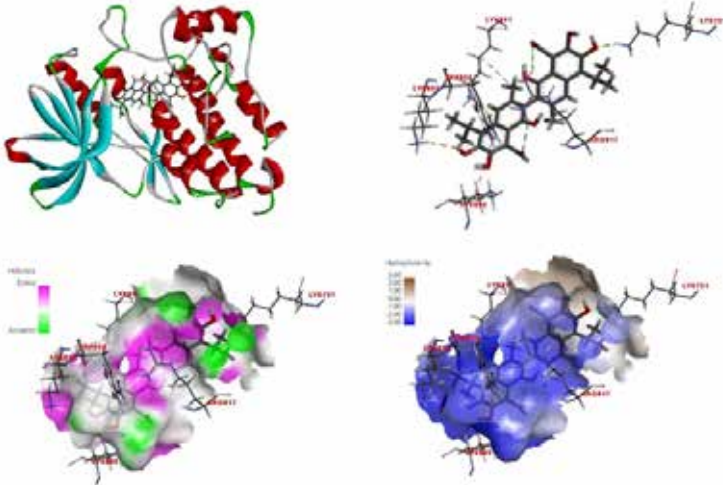
3. BULGULAR

Şekil 1'de gossipol molekülünün aldehid-aldehid formunun, elde edilen en kararlı optimize geometrisi, Şekil 2-3'de EFGR (PDB ID: 4HJO) ve B-DNA (PDB ID: 1BNA) reseptörleri ile gossipol molekülünün ald-ald formunun moleküler kenetlenme sonuçları etkileşime giren rezidüleriyle birlikte gösterilmiştir.



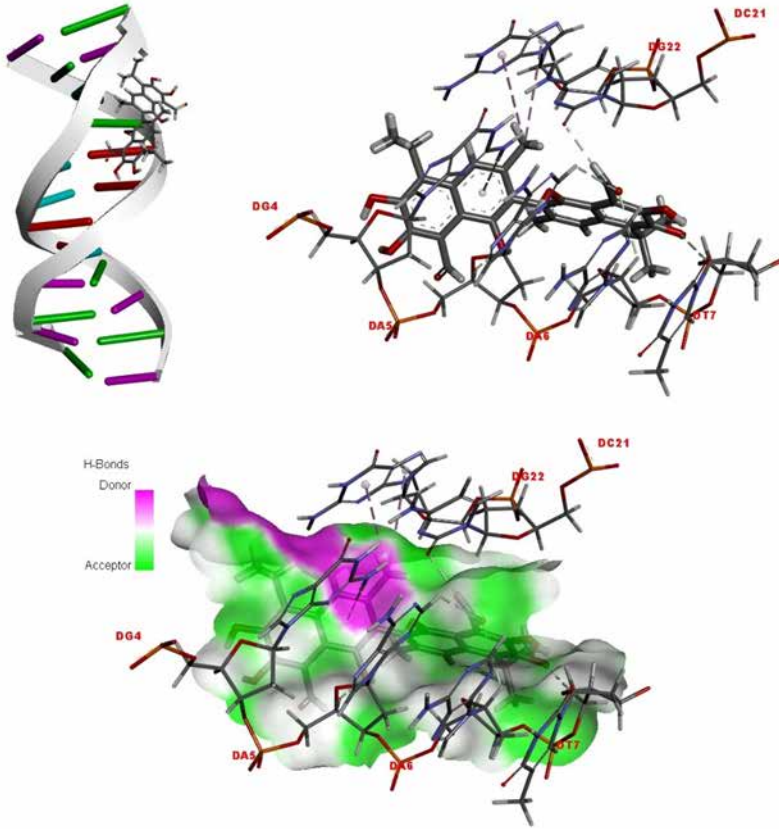
Şekil 1. Gossipol molekülünün ald-ald formunun en kararlı optimize geometrisi

Gossipol molekülünün ald-ald formu ile EGFR reseptörü moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda LYS721 ile 2.24 Å uzunluğunda hidrojen bağı, ARG817 ile 2.58 ve 2.8 Å uzunluklarında hidrojen bağları, LYS851 ile 3.87 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi, LYS855 ile 2.52 Å uzunluğunda unfavourable donör-donör etkileşmesi, TRP856 ile 5.03 Å uzunluğunda pi-pi t-shaped etkileşmesi, LYS889 ile 5.23 Å uzunluğunda pi-alkil etkileşmesi belirlenmiştir. Bağlanma enerjisi -7.375 kcal/mol olarak hesaplanmıştır (Şekil 2).



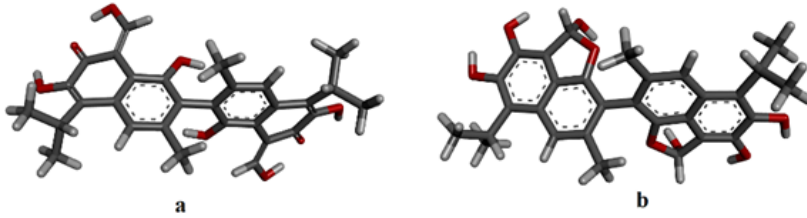
Şekil 2. EGFR reseptörünün aktif bölgesinde gossipol molekülünün ald-ald formunun etkileşime giren rezidüler ile birlikte moleküler kenetlenme sonucu.

Gossipol molekülünün ald-ald formu ile B-DNA reseptörü moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda DG4 ile 3.19 Å uzunluğunda pi-donör hidrojen bağ etkileşmesi, DA5 ile 2.45 ve 2.64 Å uzunluklarında karbon hidrojen bağ, DA6 ile 2.97 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağ, DT7 ile 2.31 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağ, DC21 ile 2.23 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağ, DG22 ile 5.07 ve 5.15 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşmeleri belirlenmiştir. Bağlanma enerjisi -8.407 kcal/mol olarak bulunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. B-DNA'nın aktif bölgesinde gossipol molekülünün etkileşime giren rezidülerle birlikte moleküler kenetlenme sonucu.

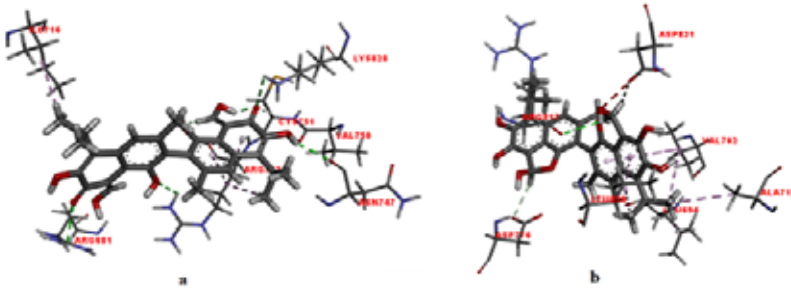
Bu sonuçlara ek olarak gossipol molekülünün sahip olduğu diğer iki tautomerin; ketol-ketol ve laktol-laktol formlarının (Wang vd. 2019) konformasyon analizi ile optimize geometrisi belirlenip moleküler kenetlenme analizleri yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Gossipol molekülünün diğer iki tautomerinin; ketol-ketol a) ve laktol-laktol b) formlarının en kararlı optimize geometrisi

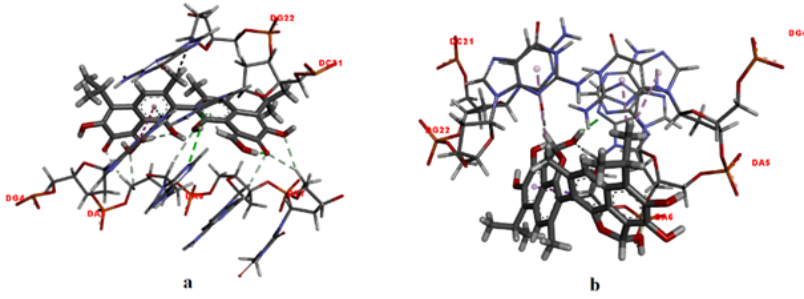
Gossipol molekülünün ketol-ketol ve laktol-laktol formlarının EFGR (PDB ID: 4HJO) ve B-DNA (PDB ID: 1BNA) reseptörleri ile moleküler kenetlenme analizleri sonucunda bağlanma enerjileri hesaplanmıştır. ketol-ketol ve laktol-laktol formlarının EGFR ile bağlanma enerjileri sırasıyla -7.22 ve -8.113 kcal/mol ve B-DNA ile bağlanma enerjileri sırasıyla -8.886 ve -8.333 kcal/mol olarak hesaplanmıştır.

Gossipol molekülünün ketol-ketol ve laktol-laktol formlarının EGFR reseptörü moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda ketol-ketol formu için ARG681 ile 2.66 Å uzunluğunda hidrojen bağı, ILE716 ile 4.6 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi, ASN747 ile 2.46 Å uzunluğunda hidrojen bağı, VAL750 ile 2.76 Å uzunluğunda “unfavorable acceptor-acceptor” etkileşmesi, CYS751 ile 2.08 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, ARG752 ile 3.01 Å uzunluğunda pi-donor hidrojen bağ etkileşmesi, 4.19 ve 4.8 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşmeleri ve 2.78 Å uzunluğunda hidrojen bağı, LYS828 ile 2.85 Å uzunluğunda hidrojen bağı ve laktol-laktol için LEU694 ile 3.92 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi, VAL702 ile 4.2, 5.04 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşmeleri ve 4.57 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi, ALA719 ile 4.41 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi, ASP776 ile 2.81 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, ARG817 ile 2.65 Å uzunluğunda hidrojen bağı, LEU820 ile 4.94 Å uzunluğunda alkil etkileşmesi ve 5.39 Å uzunluğunda pi-alkil etkileşmesi, ASP831 ile 2.82 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı ve 2.74 Å uzunluğunda unfavorable acceptor-acceptor etkileşmeleri belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Gossipol molekülünün ketol-ketol a) ve laktol-laktol b) formlarının EGFR reseptörü ile moleküler kenetlenme sonucu. Ligand moleküllerinin EGFR reseptörünün aktif bölgesinde etkileşime girdiği rezidüel gösterilmiştir.

Gossipol molekülünün ketol-ketol ve ve laktol-laktol formları ile B-DNA reseptörü moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda ketol-ketol tautomeri için DG4 ile 2.95 Å uzunluğunda pi-donor hidrojen bağ etkileşmesi ve 5.89 Å uzunluğunda pi-pi t-shaped etkileşmesi, DA5 ile 2.31, 2.69 ve 3.07 Å uzunluklarında karbon hidrojen bağı, 2.88 Å uzunluğunda hidrojen bağı, DA6 ile 2.45 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, DT7 ile 2.68 ve 2.74 Å uzunluklarında karbon hidrojen bağı, DC21 ile 2.39 Å uzunluğunda hidrojen bağı, 2.43 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, DG22 ile 4.52 ve 4.68 Å uzunlukların pi-alkil etkileşmeleri ve laktol-laktol tautomeri için DG4 ile 4.55 ve 5.08 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşmeleri, DA5 ile 2.65 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, 2.01 Å uzunluğunda hidrojen bağı ve 2.72 Å uzunluğunda unfavorable acceptor-acceptor etkileşmesi, DA6 ile 2.91 Å uzunluğunda hidrojen bağı, 2.87 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı ve 2.66 Å uzunluğunda pi-sigma etkileşmesi, DC21 ile 2.55 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, DG22 ile 5.24 Å uzunluğunda pi-alkil etkileşmeleri belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Gossipol molekülünün ketol-ketol a) ve ve laktol-laktol b) tautomerlerinin B-DNA ile kenetlenme sonucu. Ligand moleküllerinin B-DNA aktif bölgesinde etkileşime girdiği rezidüler gösterilmiştir.

SONUÇLAR

Kanser tedavisi için mevcut stratejiler arasında kemoterapi en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Kemoterapide büyük ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, kemoterapötik ajanlar, tedavinin başarısızlığına yol açan sayısız yan etkileri ve ilaç direnci nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bu sorunların üstesinden gelmek için, kanser tedavisinde daha etkili ve daha güvenli tedavi seçenekleri oldukça önemlidir. Bu çalışmada bildirilen kenetlenme çalışmalarının sonuçları EGFR ile ilişkili baş, boyun, akciğer, kolorektal ve pankreas kanserleri gibi çeşitli kanserlerin tedavisi için ilaçların tasarlanmasında çok yararlı katkılar sağlayabilir. Kanser tedavisinde kullanılacak moleküllerin DNA gibi biyo-makromoleküllerle etkileşimleri önemlidir. Gossipol'un DNA'ya bağlanma mekanizmasını araştırmak, yapısal özelliklerini anlamak daha etkili DNA bağlayıcı terapötiklerin geliştirilmesi için çok önemlidir. Mevcut ilaçların yapısal sınırlamaları ve yan etkileri nedeniyle sağlıklı dokuları korurken kanser hücrelerini seçici olarak hedefleyen yenilikçi tedaviler ve yeni ajanların geliştirilmesini gerektirmektedir. Hesaplanan bağlanma enerjileri gossipol molekülünün tüm tautomerlerinin antikanser ajan olarak kullanılabileceği görüşünü desteklemektedir.

KAYNAKÇA

Ali, R., Hadi, M. K., & Sahib, H. A. In Silico Design of EGFR and VEGFR Dual Inhibitor Using Molecular Docking, ADME, and Molecular Dynamics Simulations Studies. Turkish Computational and Theoretical Chemistry, 10(3),

39-51.

- Benz, C. C., Keniry, M. A., Ford, J. M., Townsend, A. J., Cox, F. W., Palayoor, S. A. N. J. E. E. W. A. N. I., ... & Cowan, K. H. (1990). Biochemical correlates of the antitumor and antimitochondrial properties of gossypol enantiomers. *Molecular pharmacology*, 37(6), 840-847.
- Chen, X., Shen, Y., Liang, Q., Flavell, R., Hong, Z., Yin, Z., & Wang, M. (2014). Effect of Bavachinin and its derivatives on T cell differentiation. *International Immunopharmacology*, 19(2), 399-404.
- Dehkordi, M. F., Farhadian, S., Abdolvand, M., Soureshjani, E. H., Rahmani, B., & Darzi, S. (2021). Deciphering the DNA-binding affinity, cytotoxicity and apoptosis induce as the anticancer mechanism of Bavachinin: An experimental and computational investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 341, 117373.
- Drew, H. R., Wing, R. M., Takano, T., Broka, C., Tanaka, S., Itakura, K., & Dickerson, R. E. (1981). Structure of a B-DNA dodecamer: conformation and dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 78(4), 2179-2183.
- Flack, M. R., Pyle, R. G., Mullen, N. M., Lorenzo, B. E. V. E. R. L. Y., Wu, Y. W., Knazek, R. A., ... & Reidenberg, M. M. (1993). Oral gossypol in the treatment of metastatic adrenal cancer. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 76(4), 1019-1024.
- Gilbert, N. E., O'Reilly, J. E., Chang, C. G., Lin, Y. C., & Brueggemeier, R. W. (1995). Antiproliferative activity of gossypol and gossypolone on human breast cancer cells. *Life sciences*, 57(1), 61-67.
- Giulietti, J. M., Tate, P. M., Cai, A., Cho, B., & Mulcahy, S. P. (2016). DNA-binding studies of the natural β -carboline eudistomin U. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 26(19), 4705-4708.
- Hussein, A., & Faisal, M. In *Silico Molecular Docking, Molecular Dynamics Simulation, and Pharmacokinetic prediction of Novel N-(2-(4-oxo-2-phenyl quinazoline-3 (4H)-yl) Derivatives with Enhanced Anti-proliferative Activity*. *Turkish Computational and Theoretical Chemistry*, 9(4), 64-77.
- Ibragimov, B. T., & Talipov, S. A. (2013). Gossypol. In *Encyclopedia of Supramolecular Chemistry-Two-Volume Set (Print)* (pp. vol1-606). CRC Press.
- Kenar, J. A. (2006). Reaction chemistry of gossypol and its derivatives. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(4), 269-302.
- Keshmiri-Neghab, H., & Goliaei, B. (2014). Therapeutic potential of gossypol: an overview. *Pharmaceutical Biology*, 52(1), 124-128.

- Krieger, E., Koraimann, G., & Vriend, G. (2002). Increasing the precision of comparative models with YASARA NOVA—a self-parameterizing force field. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 47(3), 393-402.
- Krieger, E., & Vriend, G. (2014). YASARA View—molecular graphics for all devices—from smartphones to workstations. *Bioinformatics*, 30(20), 2981-2982.
- Liu, Y., Wang, L., Zhao, L., & Zhang, Y. (2022). Structure, properties of gossypol and its derivatives—from physiological activities to drug discovery and drug design. *Natural product reports*, 39(6), 1282-1304.
- Mehdipour, M., Dehghan, G., Yekta, R., Hanifeh Ahagh, M., Mahdavi, M., Ghasemi, Z., & Fathi, Z. (2019). DNA-binding affinity, cytotoxicity, apoptosis, cell cycle inhibition and molecular docking studies of a new stilbene derivative. *Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids*, 38(2), 101-118.
- Park, J. H., Liu, Y., Lemmon, M. A., & Radhakrishnan, R. (2012). Erlotinib binds both inactive and active conformations of the EGFR tyrosine kinase domain. *Biochemical Journal*, 448(Pt 3), 417.
- Paunovic, D., Rajkovic, J., Novakovic, R., Grujic-Milanovic, J., Mekky, R. H., Popa, D., ... & Sharifi-Rad, J. (2023). The potential roles of gossypol as anticancer agent: advances and future directions. *Chinese Medicine*, 18(1), 163.
- Sawyers, C. L. (2002). Rational therapeutic intervention in cancer: kinases as drug targets. *Current opinion in genetics & development*, 12(1), 111-115.
- Shao, Y., Molnar, L. F., Jung, Y., Kussmann, J., Ochsenfeld, C., Brown, S. T., ... & Head-Gordon, M. (2006). Advances in methods and algorithms in a modern quantum chemistry program package. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 8(27), 3172-3191.
- Sharma, K., Kumar, M., Dukare, A., Vigneshwaran, N., Thappa, C., Saxena, S., ... & Singh, R. (2025). Gossypol and Semisynthetic Derivatives: Chemistry, Bioactivities, and Mechanism of Actions. *Chemistry & Biodiversity*, e202402872.
- Swarn, S., Alaseem, A. M., Sharma, S., Paria, A., Prajapati, B. G., Alasiri, G., ... & Kapoor, D. U. (2025). Gossypol-based nanocarriers for cancer treatment: advances and future perspectives. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 1-32.
- Tian, X., Ruan, J. X., Huang, J. Q., Yang, C. Q., Fang, X., Chen, Z. W., ... & Chen, X. Y. (2018). Characterization of gossypol biosynthetic pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(23), E5410-E5418.
- Vander Jagt, D. L., Deck, L. M., & Royer, R. E. (2000). Gossypol prototype of inhibitors targeted to dinucleotide folds. *Current Medicinal Chemistry*, 7(4),

479-498.

- Wang, X., Wang, J., Wong, S. C., Chow, L. S., Nicholls, J. M., Wong, Y. C., ... & Tsao, S. W. (2000). Cytotoxic effect of gossypol on colon carcinoma cells. *Life Sciences*, 67(22), 2663-2671.
- Wang, X., Beckham, T. H., Morris, J. C., Chen, F., & Gangemi, J. D. (2008). Bioactivities of gossypol, 6-methoxygossypol, and 6, 6'-dimethoxygossypol. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(12), 4393-4398.
- Wang, L., Liu, Y., Zhang, Y., Yasin, A., & Zhang, L. (2019). Investigating stability and tautomerization of gossypol—a spectroscopy study. *Molecules*, 24(7), 1286.
- Wani, I. A., & Nazir, S. (2022). Gossypol. In *Handbook of Plant and Animal Toxins in Food* (pp. 155-168). CRC Press.
- Workman, P. (2003). Paul Workman on the challenges of cancer drug development. Interview by Katharine E. Pestell. *Drug discovery today*, 8(17), 775-777.
- Zeng, Y., Ma, J., Xu, L., & Wu, D. (2019). Natural product gossypol and its derivatives in precision cancer medicine. *Current Medicinal Chemistry*, 26(10), 1849-1873.
- Zhang, M., Liu, H., Guo, R., Ling, Y., Wu, X., Li, B., ... & Yang, D. (2003). Molecular mechanism of gossypol-induced cell growth inhibition and cell death of HT-29 human colon carcinoma cells. *Biochemical pharmacology*, 66(1), 93-103.

7. BÖLÜM

BAKTERİYEL PROTEİN HEDEFLERİ İLE ANTİBAKTERİYEL BİR BİLEŞİĞİN MOLEKÜLER KENETLENME ANALİZİ

Doç. Dr. Alev ER

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

alever@istanbul.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-3190-5342>

Prof. Dr. Sefa ÇELİK

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü

<https://orcid.org/0000-0001-6216-1297>

1. GİRİŞ

Tobramisin, in vitro olarak geniş bir antibakteriyel spektruma ve gentamisin ile benzer farmakokinetik özelliklere sahip bir aminoglikozid antibiyotiktir. Tobramisin, *Pseudomonas aeruginosa*'ya karşı gentamisinden daha aktif olup teorik olarak tobramisin, *P. aeruginosa*'nın neden olduğu enfeksiyonlara karşı gentamisine göre bir avantaja sahiptir (Brogden vd. 1976). *Escherichia coli*, hayatı tehdit eden kan dolaşımı enfeksiyonlarının ve idrar yolu enfeksiyonları gibi diğer yaygın enfeksiyonların sık görülen bir nedenidir (Collignon, 2009). *Escherichia coli* (*E. coli*), önemli fizyolojik ve metabolik çok yönlülük gösterir ve insanlarla hayvanların normal bağırsak florasına ait çeşitli patojenik olmayan, komensal varyantları içerir. Ayrıca, insanlarda ve hayvanlarda çeşitli bağırsak veya bağırsak dışı enfeksiyonlara neden olan birkaç patojenik varyant tanımlanmıştır. Zorunlu patojenler olan bağırsak patojenik *E. Coli* ile karşılaş-

tırıldığında, ekstraintestinal patojenik E. Coli fakültatif patojenlerdir ve sağlıklı popülasyonun belirli bir kesiminin normal bağırsak florasına aittir (Köhler vd. 2011). Staphylococcus aureus, diyaliz hastalarının yaklaşık yarısında herhangi bir hastalık belirtisi göstermeden kolonileşebilen, ancak aynı zamanda yara ve doku enfeksiyonlarına, fulminan sepsisemiye ve kronik, ortadan kaldırılması zor ve sıklıkla yabancı cisimlerle ilişkili enfeksiyonlara neden olabilen tehlikeli bir patojendir. S. aureus, hemodiyaliz hastalarında enfeksiyona bağlı hastalanma ve ölüm oranlarının başlıca nedenlerinden biridir (Vandecasteele vd. 2009). Stafilokok gıda zehirlenmesinin etiyolojik ajanları, Staphylococcus cinsinin üyeleri, özellikle Staphylococcus aureus'tur. İnsanlar, S. aureus dahil olmak üzere insan hastalıklarına neden olan stafilokokların ana rezervuarıdır. S. aureus, klinik tıpta kullanılan ağır metaller ve antimikrobiyal ajanlara karşı genetik direnç kazanmasıyla bilinir (Seo vd. 2012). Aminoglikozid antibiyotik tobramisin'in in vitro aktivitesi, Staphylococcus aureus, Klebsiella veya Enterobacter, indol pozitif ve negatif Proteus, Escherichia coli ve Pseudomonas aeruginosa'dan alınan 50 izolat üzerinde gösterilmiştir. Kanamisin veya gentamisin veya her ikisine dirençli Pseudomonas suşlarının tobramisine duyarlı olduğu ve tobramisin, gentamisin, kanamisin dirençli suşlar da dahil olmak üzere birçok klinik açıdan önemli organizmaya karşı tatmin edici in vitro aktiviteye sahip olduğu saptanmıştır (Del Bene vd. 1972). Tobramisinin tek başına 17 izolat üzerinde, ampisilin ile kombinasyon halinde ise 25 izolat üzerinde 24 saatte bakterisidal etki gösterdiği gözlenmiş ve pseudomonas enfeksiyonu olan hastalarda klinik kullanım için tobramisin ve E. coli enfeksiyonlarının tedavisi için ampisilin ve tobramisin kombinasyonunun değerlendirilmesi önerilmiştir (Laxer vd. 1975). 1977 yılında yapılan bir çalışmada bebeklerde ishal hastalığına neden olan enteropatojenik Escherichia coli suşlarının tobramisin ve diğer antibiyotiklere karşı duyarlılık modelleri değerlendirilerek tobramisin ve gentamisinin tek başına ve kombinasyon halinde enteropatojenik Escherichia coli'nin yeni izolatlarına karşı etkinliği araştırılmıştır (Konforti vd. 1977). Tikarsilin+tobramisin ve karbenisilin+ gentamisin, deneysel fare enfeksiyon modellerinde P. aeruginosa, Escherichia coli ve Enterobacter cloacae'ye karşı da sinerjik aktiviteler göstermiştir (Comber vd. 1977). Sessile gram-negatif popülasyonların büyüme hızının kontrolünü sağlayan bir hücre kültürü yöntemi, Escherichia coli'nin aminoglikozid antibiyotik tobramisine karşı duyarlılığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Büyüme hızına bağlı duyarlılık değişiklikleri, süspansiyon popülasyonları ve ayrıca büyüme ve gelişme sırasında biyofilminden dökülen yeni oluşan yavru hücreler ile karşılaştırılmıştır (Evans vd. 1990). 2009 yılında yapılan bir çalışmada fosfomisin/tobramisin kombinasyo-

nu *E. coli*, *H. influenzae*, *S. aureus* ve *Klebsiella* spp. karşı yüksek aktivite göstermiş, %75'i metisiline dirençli olan *S. aureus* suşları için fosfomisin/tobramisin kombinasyonunun MIC90 değerinin tobramisininkinden daha düşük olduğu belirlenmiştir (MacLeod vd. 2009). 2010 yılında yapılan bir çalışmada tobramisin ve çay ağacı yağı kombinasyonunun gram-pozitif ve gram-negatif bakterilere karşı in vitro etkinliği araştırılmış, tobramisin ve çay ağacı yağının minimum inhibitör konsantrasyonları, bakteri öldürme etkisi *Escherichia coli* ATCC 25922 ve *Staphylococcus aureus* ATCC 29213'e karşı hem tek başına hem de kombinasyon halinde belirlenmiş ve test edilen her iki suşta da sinerjik bir etkileşim gözlenmiştir (D'Arrigo vd. 2010). Biyofilm kütesini azaltmak için ayrı ayrı kullanılan bakteriyofaj enfeksiyonu ve antibiyotikler, genellikle önemli düzeyde faj ve antibiyotik dirençli hücrelerin ortaya çıkmasına neden olur. Buna karşın, *Escherichia coli* biyofilmlerinde T4 faj ve tobramisin kullanılarak uygulanan kombinasyon tedavisi, antibiyotik ve faj dirençli hücrelerde sırasıyla %99 ve %39'dan fazla azalma sağlamıştır (Coulter vd. 2014). Tobramisin *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Proteus*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Providencia* ve *Citrobacter* türleri gibi gram-negatif bakterilere karşı endike olan güçlü ve etkili bir aminoglikozittir. Gram-pozitif ve gram-negatif aerobik bakterilere karşı etkili olan geniş spektrumlu bir antibiyotik olması ve çoklu ilaca dirençli mikroorganizmalara karşı bile hızlı etkiye sahip olması nedeniyle antimikrobiyal ilaç olarak seçilmiştir (Rosalia vd. 2022). *Pseudomonas aeruginosa*, kistik fibroz hastalarında sık görülen bir solunum yolu patojenidir ve hastaların hastaneye yatış sıklığının artmasına, akciğer hastalığının daha hızlı ilerlemesine ve ölüm riskinin artmasına neden olur (Schwarz vd. 2022). Biyofilm oluşturan bir patojen olan enteroagregatif *Escherichia coli* (EAEC), dünya çapında akut ve kalıcı ishale neden olur ve şiddetli vakalarda antimikrobiyal tedavi gerektirir. EAEC biyofilmlerinin antimikrobiyallere karşı duyarlılığını belirlemek için, tek ajan veya kombine tedavi olarak EAEC klinik suşları ile biyofilm oluşumu araştırılmıştır. Bu suşların biyofilmleri, seçilen antimikrobiyallere karşı test edilerek tetrasiklin, trimetoprim-sülfametoksazol, kloramfenikol, ampisilin, sefotaksim, seftriakson (%85–100), tobramisin (%25), sefoksitin (%20) ve siprofloksasin (%5) karşı direnç göstermiştir. Ayrıca, siprofloksasin ampisilin ve tobramisin ile kombine edildiğinde, test edilen 4 suşun 2'sinin biyofilmlerini ortadan kaldırmıştır. Siprofloksasin, sefoksitin ve tobramisin, EAEC biyofilmine karşı etkinliklerini iyi bir şekilde sürdürmüşler ve bu da biyofilm oluşturan EAEC suşlarının neden olduğu ishalin tedavisinde olası etkinliklerini göstermektedir (Guerrieri vd. 2023).

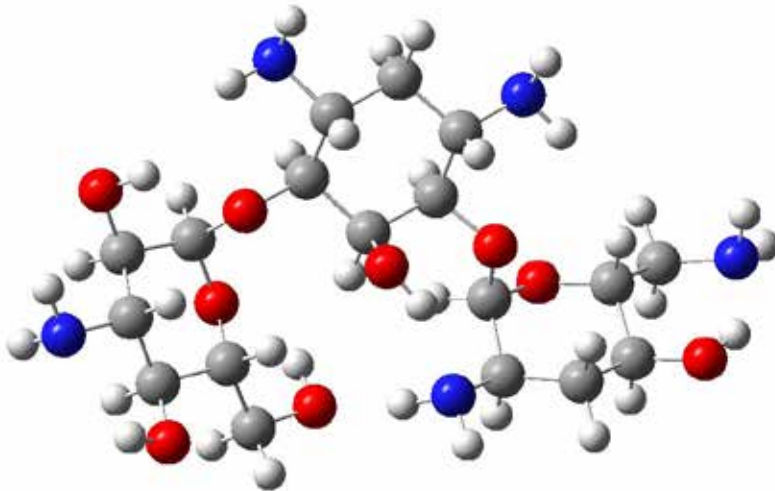
2. YÖNTEMLER VE HESAPLAMALAR

Bu çalışmada tobramisin molekülünün antibakteriyel aktivitesi incelenerek Spartan06 programı (Shao vd. 2006) ve MMFF (Moleküler Mekanik Kuvvet Alanı) yöntemi ile molekülün en kararlı konformasyonu elde edilerek optimize geometrisi belirlenmiştir. En kararlı konformasyon ve Protein Data Bank (PDB)'tan (<http://www.rcsb.org/pdb>) seçilen reseptörler (PDB ID: 6F86; 2W9G) (Narramore vd. 2019; Heaslet vd. 2009) YASARA Structure programı (Krieger vd. 2014) ve NOVA kuvvet alanı (Krieger vd. 2002) kullanılarak minimize edilmiştir.

Escherichia coli ve Staphylococcus aureus reseptörleri ile tobramisin molekülünün moleküler kenetlenme hesaplamaları YASARA Structure programı ve VINA yaklaşımı (Krieger vd. 2014) kullanılarak yapılmıştır. Hedef proteinin Kollman yükleri, diğer parametreler varsayılan değerlerinde tutularak hesaplanmıştır ve tüm su molekülleri ve ko-kristalize ligandlar hedef proteinden çıkarılarak protein yapısına polar hidrojen atomları eklenmiştir.

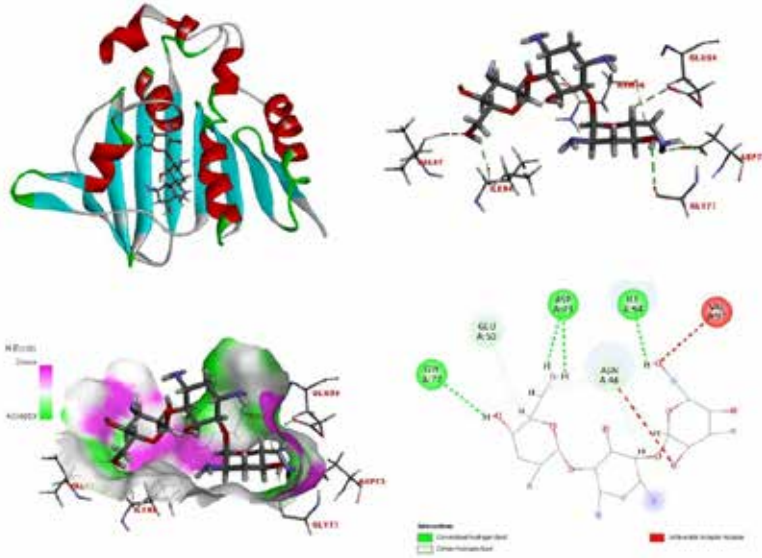
3. BULGULAR

Şekil 1'de tobramisin molekülünün elde edilen en kararlı optimize geometrisi, Şekil 2-3'de Escherichia coli (PDB ID: 6F86) ve Staphylococcus aureus (PDB ID: 2W9G) reseptörleri ile tobramisin molekülünün moleküler kenetlenme sonuçları etkileşime giren rezidülerle birlikte gösterilmiştir.



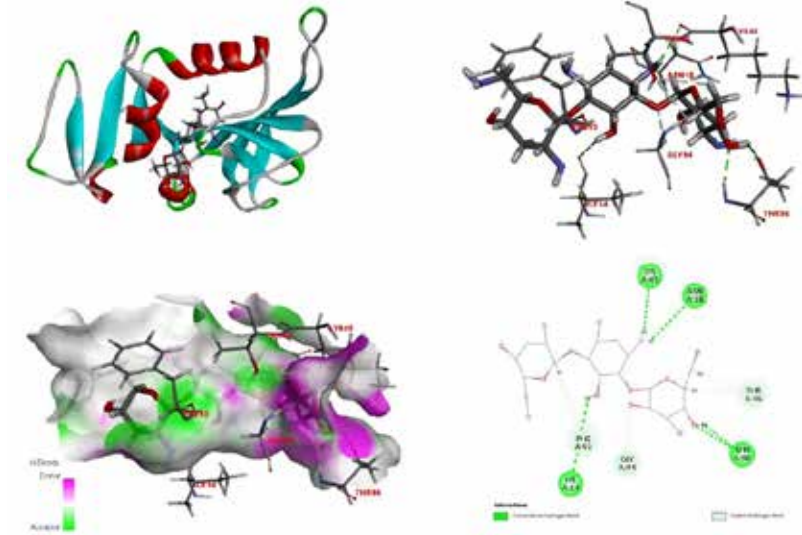
Şekil 1. Tobramisin molekülünün elde edilen en kararlı optimize geometrisi

Tobramisin molekülü ve *Escherichia coli* reseptörünün moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda ASN46 ile 2.84 Å uzunluğunda unfavorable acceptor-acceptor etkileşmesi ve 2.65, 2.96, 2.98 Å uzunluklarında karbon hidrojen bağı, GLU50 ile 3.05 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, ASP73 ile 2.43 ve 2.56 Å uzunluklarında hidrojen bağı, GLY77 ile 2.59 Å uzunluğunda hidrojen bağı, ILE94 ile 2.03 Å uzunluğunda hidrojen bağı, VAL97 ile 2.8 Å uzunluğunda unfavorable acceptor-acceptor etkileşmesi belirlenmiştir. Bağlanma enerjisi -6.489 kcal/mol olarak hesaplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. *Escherichia coli* (PDB ID: 6F86) reseptörü ile tobramisin molekülünün moleküler kenetlenme sonucu

Tobramisin molekülü ve *Staphylococcus aureus* reseptörünün moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda ILE14 ile 3.09 Å uzunluğunda hidrojen bağı, ASN18 ile 2.43 Å uzunluğunda hidrojen bağı, LYS45 ile 2.43 Å uzunluğunda hidrojen bağı, THR46 ile 2.89 ve 3.03 Å uzunluklarında karbon hidrojen bağı, PHE92 ile 2.87 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, GLY94 ile 2.47 Å uzunluğunda karbon hidrojen bağı, THR96 ile 2.21 ve 2.61 Å uzunluklarında hidrojen bağı etkileşmesi belirlenmiştir. Bağlanma enerjisi -7.995 kcal/mol bulunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Staphylococcus aureus (PDB ID: 2W9G) reseptörünün tobramisin ile moleküler kenetlenme sonucu.

SONUÇLAR

Bağırsaklarda, idrar yollarında yaşayan Escherichia coli bakterisinin sindirim sistemine faydalı türleri olduğu gibi enfeksiyona sebep olan türleri de mevcuttur. Staphylococcus aureus vücuda genellikle burundan, cilt yaralarından ve kesiklerinden girerek pekçok bulaşıcı hastalığa neden olabilen bir bakteridir. Cilt yüzeyinde kaldığı sürece tehlike oluşturmazken insan vücuduna girmesi enfeksiyona neden olur. Bu çalışmada incelenen tobramisin molekülünün Escherichia coli ve Staphylococcus aureus bakterilerine karşı etkinliği incelenmiştir. Bu bakterilerin sebep olduğu enfeksiyonların ve klinik hastalıkların tedavisinde antibiyotik direnci göz önünde bulundurularak daha etkin ve daha hızlı bir tedavi için güncel ilaçlara alternatif yenilikçi tedaviler ve yeni ajanların geliştirilmesi gerekmektedir. Moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda tobramisin molekülünün antibakteriyel bir ajan olarak kullanılabileceği bulunmuştur.

KAYNAKÇA

- Brogden, R. N., Pinder, R. M., Sawyer, P. R., Speight, T. M., & Avery, G. S. (1976). Tobramycin: a review of its antibacterial and pharmacokinetic properties and therapeutic use. *Drugs*, 12(3), 166-200.
- Collignon, P. (2009). Resistant Escherichia coli—we are what we eat. *Clinical infectious diseases*, 49(2), 202-204.
- Comber, K. R., Basker, M. J., Osborne, C. D., & Sutherland, R. (1977). Synergy between ticarcillin and tobramycin against Pseudomonas aeruginosa and Enterobacteriaceae in vitro and in vivo. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 11(6), 956-964.
- Coulter, L. B., McLean, R. J., Rohde, R. E., & Aron, G. M. (2014). Effect of bacteriophage infection in combination with tobramycin on the emergence of resistance in Escherichia coli and Pseudomonas aeruginosa biofilms. *Viruses*, 6(10), 3778-3786.
- D'Arrigo, M., Ginestra, G., Mandalari, G., Furneri, P. M., & Bisignano, G. (2010). Synergism and postantibiotic effect of tobramycin and Melaleuca alternifolia (tea tree) oil against Staphylococcus aureus and Escherichia coli. *Phytomedicine*, 17(5), 317-322.
- Del Bene, V. E., & Farrar Jr, W. E. (1972). Tobramycin: in vitro activity and comparison with kanamycin and gentamicin. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 1(4), 340-342.
- Evans, D. J., Brown, M. R. W., Allison, D. G., & Gilbert, P. (1990). Susceptibility of bacterial biofilms to tobramycin: role of specific growth rate and phase in the division cycle. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 25(4), 585-591.
- Guerrieri, C. G., Gonçalves, M. T., da Silva, A. F., Dos Santos, A. L. S., Dos Santos, K. V., & Spano, L. C. (2023). Remarkable antibiofilm activity of ciprofloxacin, cefoxitin, and tobramycin, by themselves or in combination, against enteroaggregative Escherichia coli in vitro. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 107(3), 116048.
- Heaslet, H., Harris, M., Fahnoe, K., Sarver, R., Putz, H., Chang, J., ... & Miller, J. R. (2009). Structural comparison of chromosomal and exogenous dihydrofolate reductase from Staphylococcus aureus in complex with the potent inhibitor trimethoprim. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 76(3), 706-717.
- Konforti, N., Lev, B., & Hanner, N. (1977). Sensitivity of strains of enteropathogenic Escherichia coli to tobramycin and other antibiotics. *Medical Microbiology*

and *Immunology*, 163(4), 269-276.

- Köhler, C. D., & Dobrindt, U. (2011). What defines extraintestinal pathogenic *Escherichia coli*?. *International journal of medical microbiology*, 301(8), 642-647.
- Krieger, E., Koraimann, G., & Vriend, G. (2002). Increasing the precision of comparative models with YASARA NOVA—a self-parameterizing force field. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 47(3), 393-402.
- Krieger, E., & Vriend, G. (2014). YASARA View—molecular graphics for all devices—from smartphones to workstations. *Bioinformatics*, 30(20), 2981-2982.
- Laxer, R. M., Mackay, E., & Marks, M. I. (1975). Antibacterial activity of tobramycin against gram-negative bacteria and the combination of ampicillin/tobramycin against *E. coli*. *Chemotherapy*, 21(2), 90-98.
- MacLeod, D. L., Barker, L. M., Sutherland, J. L., Moss, S. C., Gurgel, J. L., Kenney, T. F., ... & Baker, W. R. (2009). Antibacterial activities of a fosfomycin/tobramycin combination: a novel inhaled antibiotic for bronchiectasis. *Journal of antimicrobial chemotherapy*, 64(4), 829-836.
- Narramore, S., Stevenson, C. E., Maxwell, A., Lawson, D. M., & Fishwick, C. W. (2019). New insights into the binding mode of pyridine-3-carboxamide inhibitors of *E. coli* DNA gyrase. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 27(16), 3546-3550.
- Rosalia, M., Chiesa, E., Tottoli, E. M., Dorati, R., Genta, I., Conti, B., & Pisani, S. (2022). Tobramycin nanoantibiotics and their advantages: a minireview. *International journal of molecular sciences*, 23(22), 14080.
- Schwarz, C., Taccetti, G., Burgel, P. R., & Mulrennan, S. (2022). Tobramycin safety and efficacy review article. *Respiratory medicine*, 195, 106778.
- Seo, K. S., & Bohach, G. A. (2012). *Staphylococcus aureus*. *Food microbiology: Fundamentals and frontiers*, 547-573.
- Shao, Y., Molnar, L. F., Jung, Y., Kussmann, J., Ochsenfeld, C., Brown, S. T., ... & Head-Gordon, M. (2006). Advances in methods and algorithms in a modern quantum chemistry program package. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 8(27), 3172-3191.
- Vandecasteele, S. J., Boelaert, J. R., & De Vriese, A. S. (2009). *Staphylococcus aureus* infections in hemodialysis: what a nephrologist should know. *Clinical journal of the american society of nephrology*, 4(8), 1388-1400.

8. BÖLÜM

ANTİVİRAL MOLEKÜLÜN ETKİ MEKANİZMASININ İN SİLİCO HESAPLAMALARI

Prof. Dr. Sefa CELİK

Istanbul University, Science Faculty, Physics Department
<https://orcid.org/0000-0001-6216-1297>

Prof. Dr. Ayşen E. ÖZEL

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü
<https://orcid.org/0000-0002-8680-8830>

1. GİRİŞ

Valnivudin'in antiviral aktiviteye sahip olması, güncel tedavilerle yeterince karşılanamayan zona hastalığı tedavisi için iyi bir aday hâline gelmiştir. Yetişkinlerde yürütülen bir klinik çalışmada, FV-100'ün iyi tolere edildiği gösterilmiştir (Price vd. 2011). Varicella-zoster virüsü (VZV), yaygın ve insanla sınırlı bir patojendir. Bu virüs primer enfeksiyon oluşturarak virüsü yeniden aktive edebilir ve herpes zoster oluşmasına neden olabilir; bu durum ciddi rahatsızlığa yol açsa da nadiren ölümle sonuçlanır. Ancak bağışıklığı zayıf kişilerde, VZV şiddetli enfeksiyonlara ve ölümcül hastalıklara neden olabilir. Valnivudin hidroklorür anti-VZV aday olan potansiyel bir moleküldür (Andrei vd. 2021). Valnivudin hidroklorür (FV-100), VZV enfeksiyonunu azaltmada ve ağrıyı hafifletmede, herpes zoster tedavisinde etkilidir (Andrei vd. 2021; Kawali vd. 2024). Valnivudin hidroklorür, bisiklik NA (nükleozid analog) Cf1743'ün valin esteridir. Brivudin ile yapısal olarak ilişkili olan bisiklik NA'lar, diğer NA'lara kıyasla tamamen farklı bir etki mekanizmasıyla, çok daha yüksek, özellikle anti-VZV antiviral aktivite gösterir. Valnivudin hidroklorür 350 hastayla yapılan

bir faz II çalışmasında, günde bir kez 200 mg veya 400 mg valnivudin hidroklorür, 7 gün boyunca günde üç kez 1.000 mg valasiklovir ile karşılaştırılmış ve 400 mg valnivudin postherpetik nevraljiyi azaltmada valasiklovirden daha etkili görünmüştür (Birkmann vd. 2017). Pirimidin türevleri, kanser hastalıklarının ve viral enfeksiyonların tedavisinde kullanılan ilk kemoterapötik ajanlar arasında yer alarak, antiviral ve antikanser tedavisinde önemli bir rol oynamaktadır. di-deoksiriboz şekeri içeren bileşikler toksik değildir ve VZV'nin oldukça etkili inhibitörleridir. Ayrıca, bir bisiklik nükleosid analogu (CF-1743) EC50 (maksimum etkinin %50'sini üreten konsantrasyon) değeri 1 nM'nin altında olan VZV'ye karşı yüksek antiviral aktiviteye sahiptir. Valnivudin (FV-100 serbest baz), oral olarak aktif bir antiherpes zoster (HZ) nükleosid analogudur ve in vivo olarak hızlı ve kapsamlı bir şekilde CF-1743'e dönüştürülür. Şeker 2-deoksiribozun metil-1,2,3-triazol ile yer değişikliği antikanser aktivitelerinin iyileşmesine yol açar (El Mansouri vd. 2021). Valnivudin hidroklorür (FV-100) etkinlik ve güvenlik açısından araştırılmış, FV-100'ün subakut ve kronik ağrıyı azaltmada ve postherpetik nevraljiyi önlemede rol oynayabileceği gösterilmiştir. Güvenlik profili, hem tek başına hem de valasiklovir ile karşılaştırıldığında olumlu olmaya devam etmektedir (Zhang vd. 2025).

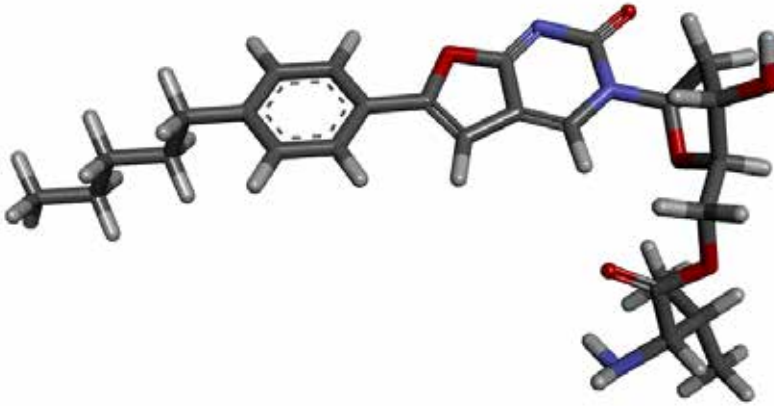
Suçiçeği (varisella), varisella-zoster virüsü (VZV) kaynaklı primer enfeksiyonun sonucudur. Suçiçeğinden sonra VZV, nöronlarda latent hale gelir ve yıllar sonra herpes zoster hastalığına neden olmak üzere yeniden aktif hale gelebilir. 1995'ten önce suçiçeği, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki insanların yaklaşık %95'inin yetişkinliğe ulaşmadan önce VZV ile enfekte olduğu yaygın bir çocukluk çağı hastalığıydı (Kilgore vd. 2003). Bu nedenle, geçmişte çoğu yetişkin, suçiçeği döküntüsünün karakteristik kaşıntılı kabarcıklarıyla karşılaşmıştır. Bununla birlikte, Amerika Birleşik Devletleri'nde suçiçeği aşısının uygulamaya konulmasından bu yana geçen 25 yılda, suçiçeği vakaları %97'den fazla azalmıştır (Marin vd. 2022) ve hastalık nadir görülen bir durum haline gelmiştir. VZV zarfında en az dokuz farklı glikoprotein bulunmuş ve aşılama sonrası ağırlıklı olarak anti-gE ve anti-gB antikorlarının oluştuğu gözlenmiştir (Atılan, 2024). Valnivudin-1vzv kompleksinin bağlanma türleri ve bağlanma enerjileri, bu bileşiğin Varicella-Zoster virüs proteazı reseptörü ile bağlanma mekanizmalarını ve etkileşimlerini değerlendiren moleküler kenetleme çalışmaları yoluyla belirlenmiştir.

2. YÖNTEMLER VE HESAPLAMALAR

Molekülün antiviral aktivitesini belirlenebilmesi için ilk önce Spartan06 programı (Shao v.d., 2006) ve MMFF (Moleküler Mekanik Kuvvet Alanı) metodu ile molekülün en kararlı konformasyonu belirlenmiştir. Molekülün en kararlı konformasyonu ve Protein Data Bank'tan alınan reseptör (PDB ID: 1VZV) (Qiu vd. 1997) YASARA Structure programı (v22.9.24) (Krieger vd. 2014) kullanılarak NOVA kuvvet alanı (Krieger vd. 2002) ile minimize edilmiştir. Varicella-Zoster virüs proteazı (PDB ID: 1VZV) reseptörü ile Valnivudin molekülünün moleküler kenetlenme hesaplamaları YASARA Structure programı (v22.9.24) ve VINA yaklaşımı (Krieger vd. 2014) kullanılarak yapılmıştır. Protein yapısına polar hidrojen atomları eklenmiştir ve Kollman yükleri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR

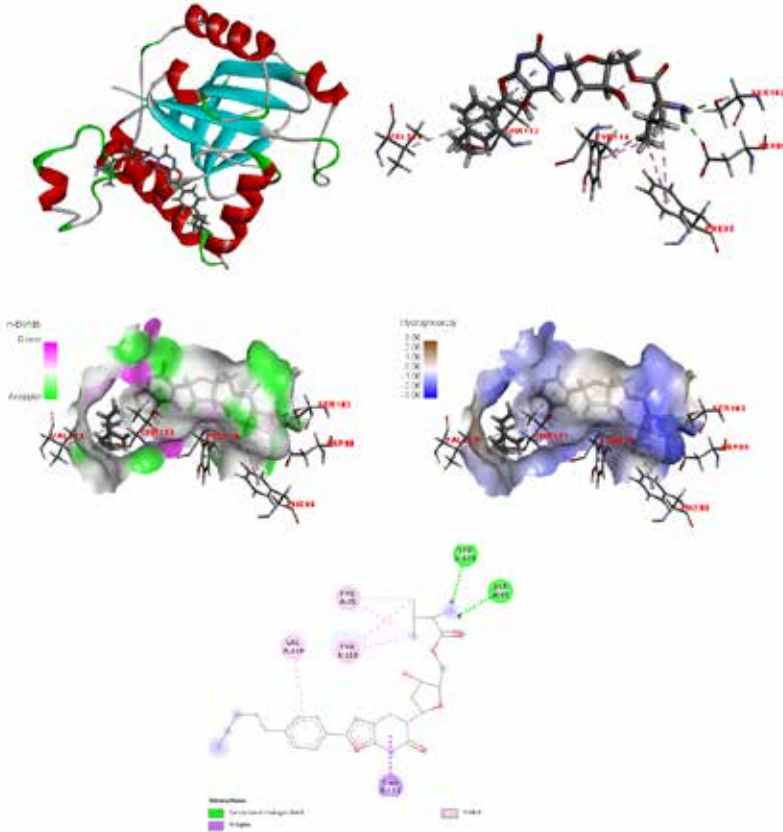
Valnivudin molekülünün konformaasyon analizi sonucunda elde edilen en kararlı optimize geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Varicella-Zoster virüs proteazı (PDB ID: 1VZV) ile Valnivudin molekülünün moleküler kenetlenme sonucu etkileşime giren rezidülerle birlikte Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Valnivudin molekülünün Spartan06 programı kullanılarak MMFF metodu ile belirlenen en kararlı konformasyonu

Moleküler kenetlenme hesaplamaları sonucunda etkileşime giren rezidüler, bağ uzunlukları ve etkileşim türleri belirlenmiştir. Valnivudin molekülünün PHE95 ile 4.81 ve 4.89 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşimleri, ASP99 ile 2.01 Å uzunluğunda hidrojen bağı, SER103 ile 1.97 Å uzunluğunda hidrojen bağı,

TYR110 ile 3.77 ve 5.12 Å uzunluklarında pi-alkil etkileşimleri, THR113 ile 2.58 Å uzunluğunda pi-sigma etkileşmesi ve VAL219 ile 5.45 Å uzunluğunda pi-alkil etkileşmesi yaptığı bulunmuştur. Ek olarak bağlanma enerjisi -7.766 kcal/mol hesaplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 1VZV ile valnivudin molekülünün moleküler kenetlenme sonuçları. Etkileşime giren rezidüler gösterilmiştir.

4. SONUÇLAR

Valnivudin, varicella-zoster virüsüne karşı yüksek derecede özgül antiviral aktiviteye sahiptir. Bu çalışmada ilk adımda molekülün konformasyon analizi yapılarak en kararlı konformeri belirlenmiştir ve ikinci adımda etki mekanizmasını belirlemek için molekülün Varicella-Zoster virüs proteazı (PDB ID: 1VZV) ile moleküler kenetlenme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Moleküler kenetlenme sonucunda bağlanma enerjisi -7.766 kcal/mol hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, 1VZV ile valnivudin molekülünün kenetlenme hesaplamaları ile, bu bileşiğin varicella-zoster virüsünün tedavisinde güçlü bir antiviral ajan olabileceğini öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Andrei, G., & Snoeck, R. (2021). Advances and perspectives in the management of varicella-zoster virus infections. *Molecules*, 26(4), 1132.
- Atilan, K. (2024). Varicella-Zoster Virus Enfeksiyonları: Epidemiyoloji, Tanı ve Aşı Güvenliği Varicella-Zoster Virus Infections: Epidemiology, Diagnosis and Vaccine Safety.
- Birkmann, A., & Zimmermann, H. (2017). Drugs in development for herpes simplex and varicella zoster virus. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 102(1), 30-32.
- El Mansouri, A. E., Oubella, A., Danoun, K., Ahmad, M., Neyts, J., Jochmans, D., ... & Lazrek, H. B. (2021). Discovery of novel furo [2, 3d] pyrimidin-2-one-1, 3, 4-oxadiazole hybrid derivatives as dual antiviral and anticancer agents that induce apoptosis. *Archiv der Pharmazie*, 354(10), 2100146.
- Kawali, A., Khanum, A., Mishra, S. B., Sanjay, S., & Mahendradas, P. (2024). Primary treatment failure in acute retinal necrosis—A comprehensive review. *Indian Journal of Ophthalmology*, 72(12), 1694-1703.
- Kilgore, P. E., Kruszon-Moran, D., Seward, J. F., Jumaan, A., Van Loon, F. P., Forghani, B., ... & Hadler, S. C. (2003). Varicella in Americans from NHANES III: implications for control through routine immunization. *Journal of medical virology*, 70(S1), S111-S118.
- Marin, M., Leung, J., Anderson, T. C., & Lopez, A. S. (2022). Monitoring varicella vaccine impact on varicella incidence in the United States: surveillance challenges and changing epidemiology, 1995–2019. *The Journal of Infectious Diseases*, 226(Supplement_4), S392-S399.
- Price, N. B., & Prichard, M. N. (2011). Progress in the development of new therapies for herpesvirus infections. *Current opinion in virology*, 1(6), 548-554.
- Qiu, X., Janson, C. A., Culp, J. S., Richardson, S. B., Debouck, C., Smith, W. W., & Abdel-Meguid, S. S. (1997). Crystal structure of varicella-zoster virus protease. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(7), 2874-2879.
- Zhang, Y., Li, J., & Ni, Q. (2025). Herpes zoster after left nephroureterectomy for renal carcinoma: a case report. *BMC Infectious Diseases*, 25(1), 62.

9. BÖLÜM

ÇOK YÖNLÜ BİR BİYOPOLİMER OLARAK ALJİNATIN MALZEME BİLİMİ VE UYGULAMALARDAKİ ROLÜ

Asst. Prof. Dr. Elif IŞIKÇI KOCA

Işık University

Faculty of Engineering and Natural Sciences,

Electrical and Electronics Engineering Department,

Biomedical Engineering Program

<https://orcid.org/0000-0002-2636-1467>

1. GİRİŞ

Doğa, kendine özgü bir döngü içerisinde küçük molekülleri kullanarak malzemeler üretmektedir. Bu malzemeler de yeni malzemelerin üretiminde aktif olarak görev alırlar ve böylelikle yeni malzemelerin sentezi ve yeni cihazların üretimi mümkün olur. Canlı türler; proteinleri, polisakkaritleri ve nükleik asitleri kendi yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmek için hücresel işlevlerde kullanırlar. Ayrıca bu makromoleküllerden hem yapısal malzemelerin elde edilmesinde hem de hareket, ısıtma, görme gibi fizyolojik süreçlerini devam ettirebilmekte faydalanırlar (Maity ve ark., 2022). Bu polimerik yapılardan doğal olarak elde edilen bir polisakkarit olan aljinat, biyomedikal mühendisliğindeki yaygın kullanımına ek olarak gıda, tekstil ve ambalaj alanlarında da sıklıkla değerlendirilmektedir. İlk olarak elde edilmesi 1880’li yıllara dayanan ve esas olarak kahverengi deniz yosunundan elde edilen bu biyopolimere olan ilgi (Saji ve ark., 2022), gün geçtikçe artmış ve son yıllarda özellikle doku mühendisliği, biyomedikal mühendisliği ve bu alanlarla bağlantılı olarak yeni elektronik mal-

zemelerin tasarımı gibi çalışmalarda aktif olarak yer almaktadır (Teng ve ark., 2021; Sahoo ve Biswal, 2021; Xu ve ark., 2021; Choi ve ark., 2021). Aljinat, biyolojik olarak parçalanabilmesi, biyouyumlu karaktere sahip olması ve jel oluşturabilme yeteneği gibi üstün özellikleri ile çeşitli disiplinler arası çalışmalara konu olmaktadır (Sudhakar ve ark., 2024; Wang ve ark., 2024).

2. ALJİNATIN ÖZELLİKLERİ

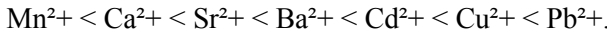
Aljinat biyopolimeri, iki değerlikli aljinik asit tuzlarıyla hücreler arası bir jel matrisinin oluşturulduğu kahverengi deniz yosunlarından elde edilebilir ve doğal olarak oluşan polisakkarit ailesinin bir üyesi olarak bilinir. Doğada bol miktarda bulunan aljinat, mükemmel biyouyumluluk sergiler; minimum toksisiteye sahiptir ve bozunmaya dayanıklı yapısı ile birçok alanda kullanılmaktadır (Qosim ve ark., 2024). Aljinatın elde edilme prosesi, aljinik asitlerin alg duvarından çıkarılmasına ve suda çözünebilen sodyum aljinat formuna dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu işlemler genellikle çok aşamalı gerçekleşir ve ekstraksiyon aşamasında kimyasal kullanımına bağlı olarak aljinat kazanım verimini negatif etkileyebilirler. Bu sorunların giderilmesi için günümüzde aljinat liyaz ve laminarinaz gibi enzimlerin, aljinatın, alglerin hücre duvarını parçalayarak elde edilmesini baz alan, enzimatik prosesler içeren, doğal süreçlere yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Borazjani ve ark., 2017). Aljinat, aynı zamanda Azotobacter ve Pseudomonas gibi bakterilerden de elde edilebilir; ancak bakteriyel kökenli aljinatların moleküler kütleleri, bileşimleri, viskoelastik özellikleri ve polidispersiteleri yosunlardan elde edilen aljinat moleküllerine göre farklılık göstermektedir (Zhang ve ark., 2021). Geniş moleküler ağırlık aralığına sahip olan alg kökenli aljinatların elde edilmesinde çok aşamalı olabilmekte ve bazen aljinatın polimer zincir bütünlüğünün bozulmasına yol açabilen kimyasal uygulama gerektiren işlemler gerekebilirken; bakterilerden sentezlenen aljinatlar ise yüksek molar kütlelere ve yüksek polimerizasyon derecelerine sahip olup, enzimatik yöntemlerle ve çevreci metotlarla elde edilebilirler. Ek olarak sıcaklık, pH ve kültür ortamının konsantrasyonu gibi parametrelere müdahale edilebildiğinden bakteriyel bazlı aljinatların üretim koşullarında optimizasyon mümkün olabilmektedir ve bu sayede sürekli ve aynı özellikte aljinatların üretimi de sağlanabilmektedir.

Aljinat, yapısında (1,4)-bağlı β -D-mannuronat (M) ve α -L-guluronat (G) kalıntılarından oluşan doğrusal zincirler barındıran anyonik bir polisakkarittir. Polimer zinciri, yalnızca guluronat birimlerinin yer aldığı G blokları (–GG–),

yalnızca mannuronat birimlerinden oluşan M blokları (–MM–) veya iki birimin dönüşümlü şekilde sıralandığı MG blokları (–MG–) şeklinde düzenlenebilir (Maity ve ark., 2022). Bu blok yapılarının uzunluğu ve dizilim düzeni, aljinatın elde edildiği biyolojik kaynağa ve polimerin olgunluk düzeyine bağlı olarak önemli değişkenlik gösterir. Dolayısıyla her aljinat numunesi, kendine özgü bir blok kompozisyonu ve yapısal heterojenlik taşır. Sulu çözeltide aljinat zincirleri, karboksilat gruplarının taşıdığı negatif yükler arasındaki elektrostatik itme nedeniyle uzamış ve düzensiz bobin konformasyonu sergiler. Çözeltinin pH'ı, aljinik asidin pKa değerlerinin (M birimleri için yaklaşık 3,4; G birimleri için yaklaşık 3,6) altına düşürüldüğünde protonasyon artar ve bu durum zincirler arası etkileşimleri güçlendirerek çözeltinin belirgin şekilde viskozlaşmasına yol açar. Elde edilen akış özellikleri, çözeltinin iyonik gücü, sıcaklığı ve polimerin moleküler ağırlığı gibi çevresel faktörlerden etkilenir.

Aljinatın biyomalzeme olarak en önemli özelliklerinden biri, çok değerli katyonların varlığında iyonik çapraz bağlarla hidrojel oluşturma kapasitesidir. Özellikle iki değerlikli katyonlar, aljinat zincirleri ile güçlü etkileşimler kurarak stabil hidrojellerin oluşmasını sağlar. G açısından zengin bloklar, bu katyonlarla belirgin şekilde daha kuvvetli bağlanma eğilimi gösterir; buna karşılık M blokları daha zayıf etkileşimler kurar. Aljinat hidrojellerinin mekanik ve yapısal özelliklerini açıklamak için sıklıkla kullanılan “yumurta kutusu modeli”, iki komşu aljinat sarmalının G bloklarının çok değerli bir katyon (Mn+) aracılığıyla birbirine köprülenmesini esas alır (Maity ve ark., 2022; Cao ve ark., 2020; Roquero, ver ak., 2022).

Metal iyonlarının aljinat üzerindeki bağlanma afiniteleri metal türüne göre değişmekte olup, iki değerlikli katyonlar arasında bağlanma gücü genel olarak şu sırayı izler:



Bu katyonlar arasında kalsiyum (Ca^{2+}) iyonu, biyoyumumluluğu, nispeten yüksek bağlanma kapasitesi ve güvenli kullanım profili nedeniyle biyomedikal alanda en yaygın tercih edilen türlerdendir (Siew ve ark., 2005). Uygulanan katyonun türü ve konsantrasyonu, ortaya çıkan hidrojinin elastikiyetini, stabilitesini, gözenek yapısını ve şişme davranışını doğrudan etkilediğinden kritik bir operasyonel parametredir.

Aljinat temelli malzemelerin mekanik özellikleri ve gözenek mimarisi, polimer zincirinin G bloğu içeriğinin ayarlanması, blok düzeninin geliştirilmesi ve polimerin moleküler ağırlığının artırılması gibi farklı kimyasal ve fiziksel yöntemlerle de hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Bu parametrelerin

kontrollü bir şekilde optimize edilebilmesi, aljinatın biyomalzeme olarak işlevselliğinde özelleştirilebilen bir platform olmasına ve çeşitli mühendislik uygulamalarında (Şekil 1) öneminin artmasına katkı sağlayacaktır. Özellikle doku mühendisliği, ilaç salım sistemleri, yara örtüleri (Şekil 1) gibi hücre bazlı çalışmalarda, aljinat kompozisyonunun, iyonik bağlayıcı türünün, çapraz bağlanma yoğunluğunun ve gözenek yapısının kullanım ihtiyacına uygun olarak ayarlanabilir olması ile büyük kazanımlar elde edilmektedir. Tüm bu yeteneklerle birlikte değerlendirilen aljinat yapısı, hücre davranışının yönlendirilmesini sağlayan biyofiziksel olaylara ve biyolojik yanıtları modüle edebilen fonksiyonel modifikasyon kapasitesini kapsayan çalışmalara kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu nedenle aljinat, biyomalzeme tasarımında kimyasal kompozisyonu ayarlanabilir ve fonksiyonel özellikleri geniş bir aralıkta modifiye edilebilir bir platform olarak önemli bir yer edinmiştir.



Şekil 1. Aljinatın farklı disiplinlerdeki başlıca uygulama alanları (sıcaklığa duyarlı sistemler, yara iyileşmesi, ilaç salım sistemleri, doku mühendisliği, fonksiyonel gıdalar ve biyosensör teknolojileri)

3. ALJİNATIN KULLANIM ALANLARI

3.1. Sıcaklığa Duyarlı Aljinat Malzemeler

Sıcaklığa duyarlı malzemeler, belirli faz geçiş sıcaklıklarına sahiptir ve faz geçiş ile sıcaklık faktörüne cevap oluşturabilirler. Bu alandaki çalışmalarda

genellikle (N-izopropilakrilamid) tercih edilir; aljinatın $-CO_2H$ grubu, amino sonlandırılmış (N-izopropilakrilamid) bir kopolimer ile $-C(O)NH-$ işlevselliğine Suda çözünür karbodiimid kimyası kullanılarak dönüştürülebilir ve bu reaksiyonlar ile poli(N-izopropilakrilamid) (PNIPAAm)'nin aljinat omurgasına eklenmesiyle sonuçlanmaktadır. PNIPAAm içeren aljinat hidrojel malzemeleri ise bu noktadan sonra sıcaklığa duyarlı davranış sergiler (Ciocoiu ve ark., 2018). Kritik çözünürlük sıcaklığının üzerine çıkıldığında, PNIPAAm'nin faz geçişi, izopropil yan zincirlerine bağlı su moleküllerinin ortamdan ayrılmasıyla gerçekleşir. Bu su kaybı, izopropil grupları arasındaki hem moleküller arası hem de molekül içi hidrofobik etkileşimleri güçlendirerek polimerin fiziksel özelliklerinde belirgin bir değişime yol açar. Bu alanda yapılan örnek bir çalışmada (Liu ve ark., 2017), PNIPAAm ve aljinatın birlikte değerlendirilmesi ile sentezlenen aljinat bazlı materyalin, oda sıcaklığı sayılabilen $25\text{ }^{\circ}C$ 'de çözelti gibi davrandığı gözlemlenirken, sıcaklık vücut sıcaklığına artırıldığında ise materyalin hidrojel gibi davrandığı raporlanmıştır. Ek olarak anti kanser özellik taşıyan doksorubisin ilaç etken maddesinin hidrojele yüklenerek ilaç salım davranışı incelenmiş olup salımın başarılı bir şekilde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerinin daha fazla geliştirilmesi yönünde de bir tavsiye içeren bu çalışmaya ek olarak aljinat-katekol hidrojelinin sentezini kapsayan başka bir çalışma, örnek olarak verilebilir. Bu örnekte ise, aljinatın fonksiyonelleştirilmesi dopamin ile sağlanmış olup katekol ile iyonsuz bir aljinat hidrojeli eldesi, oksidatif çapraz bağlama ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda ise yüksek elastik modül ve daha küçük gözenek boyutlarına erişilebildiği raporlanmıştır (Lee ve ark., 2013). Bu olumlu sonuçlara ek olarak yeni hidrojellerin yüksek biyouyumluluk sergilediği ve kök hücreler de dahil olmak üzere çeşitli insan birincil hücrelerinin 3 boyutlu jel matrisinde sağkalım verimliliği gösterilmiştir. Tüm bu olumlu veriler ışığında ise aljinat-katekol hidrojel yapısının hücre nakli uygulamalarında ve doku mühendisliği çalışmalarında önemli katkılar sağlayacağı belirtilmektedir (Maity ve ark., 2022).

Aljinatın biyouyumluluğu ve modifiye edilebilir kimyasal yapısı, sıcaklığa duyarlı polimerlerle kolaylıkla birleştirilerek sıcaklığa bağlı jelasyon profili ve mekanik dayanım gibi temel özelliklerin hassas şekilde ayarlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu yönleriyle sıcaklığa duyarlı aljinat yapıları, gelecekte kişiye özgü tedavi yaklaşımlarında ve uyarana tepki veren gelişmiş biyomalzeme tasarımlarında kritik bir platform olma potansiyeli taşımaktadır.

3.2. Yara İyileşmesinde Aljinat Malzemeleri

Aljinatın biyoyoumlu özelliğinin yanında yüksek nem tutabilme yeteneğinin olduğu da bildirilmektedir. Bu bağlamda araştırmacılar her iki önemli özelliği de birlikte değerlendirmeyi düşünmüşler ve aljinat bazlı kompozitlerle yara pansuman malzemesi üretmeyi planlamışlardır (Wang ve ark., 2023). Yara iyileşme süreçlerindeki başarı, malzemenin antimikrobiyal özelliğe sahip olmasına bağlıdır (Montaser ve ark., 2021; Lin ve ark., 2019; Zheng ve ark., 2021). Bu sebeple aljinat bazlı malzemelere ZnO, gümüş nanopartiküller ve aloe vera jelleri gibi antimikrobiyal özellik katan ek maddeler eklenebilir. Ayrıca kolajen ve jelatin gibi protein bazlı bazı materyaller de aljinat kompozitlerine eklenerek hemostatik ajan görevi üstlenirler ve hücre çoğalmasında hızlandırıcı etki ederek pansuman malzemelerin etkinliğini artırır. Kitosan gibi doğal biyobozunur ve biyoyoumlu materyallerle aljinatlar birlikte de değerlendirilebilir. Aljinat/kitosan kompozitlerinin kullanıldığı yara örtüsü yapılarında sıvı emici ve biyolojik olarak parçalanabilme yetenekleri gözlemlenmiştir. Staphylococcus aureus ve Klebsiella pneumoniae gibi patojenlere karşı sergilenen antimikrobiyal aktivite ise kitosandaki amino gruplarının varlığına bağlanmaktadır (Mndlovu ve ark., 2019). Bazı çalışmalarda ise kitosan türevlerine de yer verilmiş olup, karboksimetil kitosan ile gerçekleştirilen bir çalışmada S-nitrosoglutasyonu kapsülleyen aljinat/karboksimetil kitosan filmleri sentezlenmiştir. Bu yapıların anjiyogenezi artırarak diyabetik yara iyileşmesini iyileştirmek için 168 saat içinde sürekli olarak NO salınımı yaptığı raporlanmıştır (Razmjooee ve ark., 2022). Yara iyileşme süreçlerinde önemli birer adım sayılan endotel dokunun onarımı ve kolajen oluşumu, kitosan oligosakkaritinin aljinat/karboksimetil hidrojellere dahil edilmesini kapsayan bir çalışmada incelenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde ise vasküler endotel büyüme faktörlerinin ekspresyonu ve kollajen lif oluşumu artırılmış ve yara iyileşmesi hızlanmıştır (Lv ve ark., 2019). Yanık pansumanının iyileşmesini hedefleyen başka bir çalışmada ise (Liang ve ark., 2019), tıbbi polipropilen dokusuz yüzey üzerinde sodyum karboksimetil selüloz (CMC-Na), aljinat ve kitosandan oluşan bileşik bir hidrojel (CMC-Na/SA/CS) sentezlenmiş; bu yeni yapının iyileşme için gerekli olan optimum nemi içereceği ve dokuya yapışmanın önleneceği düşünülmüştür. Bu çalışmada, CMC-Na aslında dokusuz yüzeye bağlanma için kullanılırken kitosan hem yapışmazlık özelliği hem de kanamayı durdurma ve bu sayede de yara iyileşmesinde destek materyal olarak yer almıştır (Tan ve ark., 2023). Çalışmada propilen glikol ise materyalin nem tutma kapasitesini ayarlamak amacıyla kullanılmıştır. SD sıçanlarında derin ikinci derece yanıkların tedavisinde bu yeni hidrojel denenmiş olup yara iyileşmesinde belirgin derecede iyileşme gözlemlenmiştir. Öyle ki tedavinin periyodik olarak takibine

dayanan sonuçlar, 20. Günde yara iyileşmesinde % 95' lere ulaştığını göstermektedir. Ayrıca iyileşmenin erken evresinde vasküler endotelial büyüme faktörü (VEGF) ekspresyonunun arttığı, bazik fibroblast büyüme faktörünün (bFGF) ise azaldığı; geç evrede ise bFGF düzeylerinin yükseldiği, tümör nekroz faktörü- α (TNF- α) ve interlökin-6 (IL-6) seviyelerinin ise düştüğü gözlenmiştir. Bu sonuçlar ile aljinat içeren hidrojel yapıların yanık yaraların tedavisinde kullanımının mümkün olacağını desteklemektedir. Kitosan ve aljinatın birlikte kullanımına dayanan başka bir çalışmada ise, kalsiyum iyonları (Ca^{2+}) ile çapraz bağlanarak oluşturulan hidroksietilakrilik kitosan (HC) ve aljinat içeren bir hidrojel yara örtüsü sentezlenmiştir. Yerinde kimyasal indirgeme metodu bu hidrojelin gümüş nitrat çözeltisine daldırılması ile sağlanarak gümüş nanoparçacık (AgNP) yüklü bir materyal elde edilmiştir. Bu yeni materyal, yüksek antibakteriyel aktivite gösterdiğinden pansuman malzemesi olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, Ag nanoparçacık miktarının artırılması ile hidrojelin şişme kapasitesini, çekme dayanımını ve uzama oranının arttığı saptanmıştır. Sentezlenen bu yeni hidrojel yapı, Vero hücrelerinde denenmiş ve düşük toksisite göstermiştir. Ek olarak yapının hücre uyumluluğunun da iyi olduğu ve *S. aureus* ve *E. Coli* üzerinde antibakteriyel etki gösterebildiği raporlanmaktadır. Hidrojele parasetamol yüklendiğinde ise kontrollü ilaç salımının gerçekleştiği ve bu sayede yara iyileşme sürecine pozitif katkı sağladığı ifade edilmektedir. Yine kitosan içeren başka bir aljinat temelli çalışmada, kitosan çapraz bağlayıcı olarak görev almaktadır ve liyofilizasyon yöntemiyle hazırlanmış çinko iyonu (Zn^{2+}) yüklü aljinat bazlı bir hidrojel/nano çinko oksit (nZnO) kompozit bandaj geliştirilmiştir (Mohandas ve ark., 2015). Sentezlenen bu yeni yapının gözeneklilik durumu değerlendirildiğinde, %60–70 arasında değişen gözenekliliğe sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu sayede de esnekliği yüksek ve uygun gözeneklilik özellikleri taşıyan, biyobozunurluğu artırılmış ve hızlı hemostatik (kan durdurucu) özellikler sergileyen yeni bir yapı kazanılmıştır. İlave testler ile bu hidrojel yapısının ortama Zn^{2+} salarak epitelizasyona pozitif etki ettiği de raporlanmaktadır. Bu çalışma ile, geliştirilen aljinat tabanlı hidrojel bandajın yoğun enfeksiyon ve ciddi kanama durumu olan yara tiplerinin tedavisinde görev alabileceği düşünülmektedir.

Aljinat malzemeleri, yüksek nem tutma kapasitesi, biyoyuymumluluğu ve sıvı absorpsiyon özellikleri sayesinde yara bölgesinde iyileşme için optimal bir mikroçevre oluşturur. Aynı zamanda kanama durdurucu etkisi ve enfeksiyon riskini azaltma potansiyeli, farklı yara tiplerinde etkili bir biyomedikal çözüm sunmasını sağlar. Bu kapsamda aljinat temelli yara örtüleri, modern yara yönetimi uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilen yenilikçi biyomalzemeler arasında yer almaktadır.

3.3. İlaç Salım Sistemlerinde Aljinat Malzemeleri

Aljinat temelli taşıyıcı sistemler, çeşitli ilaç dağıtım platformlarında geniş bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Aljinat esaslı aerojeller, oral yoldan verilen ilaçlar için etkili taşıyıcılar olarak kullanılabilmektedir (Wang ve ark., 2023; Zhang ve ark., 2021). Ayrıca, uygun aerodinamik özelliklere sahip aljinat mikroküreleri, inhalasyon yoluyla akciğere yönelik ilaç uygulamalarında da değerlendirilebilmektedir (Athamneh ve ark., 2019). Bunun yanı sıra, albiflorin içeren kendiliğinden oluşan sıcaklığa duyarlı aljinat hidrojelleri, burun-beyin eksenini üzerinden ilaç taşıyarak depresyon tedavisi için umut vadeden bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır (Xu ve ark., 2021-A). Aljinat bazlı taşıyıcıların kontrollü salım kapasitesi, özellikle lidokainin uzun süreli lokal anestezi etkisinin sağlanmasında (Sarheedve ark., 2021) ve ketotifen fumaratın transdermal yolla astım tedavisinde kullanılmasında önemli avantajlar sunmaktadır (Lefnaoui ve ark., 2018). Ayrıca, aljinat temelli mikroğne yapıları, geleneksel hipodermik enjeksiyonların yol açtığı ağrıyı azaltma amacıyla geliştirilmiş olup diyabet tedavisinde transdermal ilaç dağıtım sistemleri olarak dikkat çekmektedir (Zhang ve ark., 2018).

Aljinatlar, ilaç salımına yönelik çalışmalarda ilaç taşıyıcı matrislerin sentezinde mükemmel özellikler sergilemektedir. Yüksek kapsülleme kapasiteleri, asidik koşullarda omurgadaki karboksil gruplarının protonlanması sayesinde pH hassasiyeti göstermesi, gelişmiş işlevselliklere sahip olmaları gibi öncü nitelikleri sayesinde bu alanda sıklıkla araştırma konusu olmaktadır. Aljinatların, farklı materyaller ve polisakkarit yapılarla birlikte kompozit oluşturmaya yatkınlıkları ile birçok çalışmada olumlu sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bazı araştırmalar, yüksek adsorpsiyon ve katyon değişim kapasitesi ile tanınan kil mineralleri ile aljinatı birlikte ilaç kapsülleme ve sürekli salım kapasitelerinde iyileştirme amacıyla kullanmışlardır (Reddy ve ark., 2021). Aljinatlar ile aerojeller sentezlenebilir ve oral yolla ilaç taşıyıcı sistemler tasarlanabilir. Oral yolla ilaç verme sistemleri basit uygulanışı ve ekonomik oluşu sebebiyle günümüzde ilk olarak tercih edilen yöntemlerden biridir. Aljinat bazlı ilaç salım sistemlerinde, ilacın vücuttaki yolculuğunda karşılaşılan pH değişikliklerine bağlı uygulama kısıtları giderilmeye çalışılmaktadır. Ek olarak, bazı ilaçlar/ilacın etken maddeleri, oral yolla alındığında emilimlerinde azalma gözlenmektedir, bu durum ilacın etkinlik oranını olumsuz etkilemektedir. Örneğin kurkumin ağızdan uygulandığında biyoyararlanımında azalma olmakta iken %10 aljinat nano-jel içeren kompozit hidrojel yapısı ile birlikte denendiğinde karaciğer, böbrek ve pankreas gibi çeşitli organ ve dokulardaki patolojik değişiklikleri etkili bir şekilde engellediği raporlanmıştır (Akbar ve ark., 2018; Shahbaziza-

deh ve ark., 2022). Ayrıca sentezlenen kompozit yapının mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu ve termal stabiliteye sahip olduğu da tespit edilmiştir. İlaç taşıma sistemlerinde başarıyı belirleyen önemli kriterlerden olan hedeflenen iletim ve sürekli salım, özellikle antikanser ilaçlarının uygulanmasında daha da ön plana çıkmaktadır. Antikanser ilaçların biyoyararlanımını artırmaya yönelik çalışmalarda aljinatın kullanılması ile başarılı sonuçların elde edilebildiği gözlenmiştir. Örneğin Paklitaksel ile hedef temelli ilaç taşıma sistemlerinde aljinat bazlı nanoküreler kullanılmış ve oral yolla ilaç iletimi sağlanmıştır. Bu çalışma ile kolon kanserinde hedeflenen tedavisinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Ayub ve ark., 2019). Ayrıca, sispilin ve altın nanopartikülleri ile formüle edilen enjektörde edilebilir aljinat temelli hidrojeller, kemoterapi, radyoterapi ve fototermal terapinin aynı platformda bir araya getirilmesine olanak tanımıştır. Bu çok modlu yaklaşım, hem ilaç iletim etkinliğini artırmış hem de fototermal enerji dönüşüm kapasitesini yükselterek lokal ve sinerjik bir kanser tedavisi stratejisi sunmuştur (Mirrahimi ve ark., 2020). Antikanser ilaç maddesi olarak bilinen paklitakselin uzun süreli salım davranışını incelemeye odaklanan bir diğer araştırmada (Kolawole ve ark., 2023), servikal bölgeye lokal uygulamaya uygun, mukoadheziv özellikte borlanmış kitosan/aljinat nanoparçacıkları (BCHIALG NP'ler) geliştirilmiştir olup serviks kanserinin tedavisine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışmada, borlanmış kitosan (BCHI), kitosana 4-karboksifenilboronik asit bağlanarak sentezlenmiş; farklı oranlardaki BCHIALG nanoparçacıkları ise iyonik jelasyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Geliştirilen bu yapıların fiziksel özellikleri, kapsülleme verimleri, ilaç yükleme kapasitesi, mukoadhezyon düzeyi ve in vitro salım profilleri detaylı olarak incelenmiş olup oldukça yüksek kapsülleme verimi (%98'in üzerinde) değerine ulaştıkları raporlanmıştır. Ek olarak ilaç yükleme kapasitelerinin yüksek olduğu bilinmekte ve özellikle %0,03 BCHI ve %0,07 aljinat içeren formülasyonların, CHIALG nanoparçacıklarına kıyasla belirgin şekilde daha yüksek mukoadheziv özellik gösterdiği saptanmıştır. Bu yapının, paklitaksel gibi hidrofobik ilaçlar için uzun süreli salım sağlayan en başarılı transmukozal taşıyıcı olarak öne çıktığı, çalışmada vurgulanmaktadır.

Kanser tedavisinde aljinat bazlı materyaller üzerine yenilikçi yaklaşımlardan biri de nanotaşıyıcı temelli ilaç salım sistemlerinin üretilmesidir. Bu bağlamda yapılan bir çalışmada, aljinat nanoparçacıkları farklı derişimlerde katyonik gemini yüzey aktif maddesi kullanılarak nanoemülsiyon temelli yöntemle sentezlenmiştir ve aljinat nanoparçacığı formülasyonu optimize edilmiştir. Sonrasında bu yapı, kapsaisin yüklemek için kullanılmış ve 9.42 ± 1.8 nm partikül boyutu ile 98.7 ± 0.6 kapsülleme verimliliğine ulaşıldığı raporlanmıştır. Aynı

çalışmada benzer metotlarla elektro-eğirme yöntemiyle polikaprolakton–kito-
san karışım çözeltilerinden (100:0, 80:20, 60:40 oranlarında) nanolif yapıları
da sentezlenmiştir. Karakterizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen en uygun
nanolif matrisine kapsaisin yüklü aljinat nanoparçacıkları entegre edilmiştir.
Çalışmanın bulguları değerlendirildiğinde, kapsaisin yüklü aljinat nanoparça-
cıklarının polikaprolakton–kitosan nanolifler içerisine gömülmesi ile kapsaisi-
nin salım süresinin 120 saatten 500 saatin üzerine çıkabildiği gözlemlenmiştir.
Bu sistemlerin in vitro analizlerini kapsayan biyouyumluluk testleri ise, gelişt-
tirilen nano platformun MCF-7 insan meme kanseri hücrelerinin proliferasyo-
nunu etkili bir şekilde inhibe ettiğini; buna karşın insan dermal fibroblastlarına
(HDF) karşı toksik davranış sergilemediğini göstermektedir. Sonuçlar incelen-
diğinde, kapsaisin yüklü aljinat nanoparçacıklarının polikaprolakton–kitosan
nanolif matrisleri içine gömülmesiyle oluşturulan yeni bir “nanoparçacık-i-
çinde-nanolif” ilaç taşıma platformunun elde edilmesi ile “nano-içinde-nano”
(nano-in-nano) taşıyıcı teknolojisi araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir
(Ahmady ve ark., 2023). Bu nano-içinde-nano platformunda aljinat nanoparça-
cıklarının kullanılması hem yüksek kapsülleme verimi hem de kontrollü salım
davranışı sayesinde sistemin terapötik etkinliğini artıran temel bir unsur olarak
öne çıkmaktadır.

Genel olarak aljinat, iyonik jel oluşturma kabiliyeti, kontrollü bozunma
davranışı ve yüksek ilaç taşıma kapasitesi sayesinde modern kontrollü salım
sistemlerinde etkili bir taşıyıcı platform sunmaktadır. Hem hidrofilik hem de
hidrofobik moleküllerin enkapsülasyonuna imkan vermesi, tedavi etkinliğini
artırırken ilaçların hedefli ve uzun süreli salımını mümkün kılmaktadır. Bu yön-
leriyle aljinat, gelecek nesil akıllı ilaç taşıyıcılarının geliştirilmesinde stratejik
öneme sahip biyopolimerlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

3.4. Doku Mühendisliğinde Aljinat Malzemeleri

Doku mühendisliği, hasarlı veya hastalıklı dokuların yapısal ve işlevsel büt-
tünlüğünü yeniden sağlamak üzere çalışmaların yürütüldüğü, birçok mün-
dislik ve temel bilim disiplininin birlikte rol aldığı multidisipliner bir araştırma
alanıdır. Aljinatlar, 3 boyutlu baskı teknolojiye yatkınlıkları ve uygunlukları
nedeniyle doku iskeleleri geliştirmeyi hedefleyen çalışmalarda sıklıkla kulla-
nılmaktadırlar (Wang ve ark., 2023). Ancak kompozit olarak yer aldıkları bi-
limsel çalışmalarda hazırlanan iskelelerin mekanik, biyolojik ve reolojik özel-
liklerinin daha uygun olduğu gözlemlenmiştir (Kim ve ark., 2021; Murab ve

ark., 2022). Kompozit oluşturmak amacıyla çeşitli malzemeler kullanılabilir. Örneğin jelatin içeren aljinat bazlı kompozit yapıların yer aldığı bir çalışmada hidrojenlerin biyoyapışma kapasitelerinde iyileşme gözlenmiştir (Sonaye ve ark., 2022). Kıkırdak dokulara yönelik çalışmalarda aljinat içeren doku iskeleleri ön plana çıkmaktadır. Kök hücrelere gömülü aljinat-jelatin mikroküreleri üzerinde çalışan Liao ve ekibi (2022), kıkırdak doku rejenerasyonu amacıyla enjekte edilebilir yağ dokusu ile çalışmış ve elektrosprey metodu ile bu mikroküreleri sentezlenmeye başarmışlardır. Böylelikle kök hücrelerin kıkırdak onarımı için bağlanması ve çoğalmasını destekleyen bir yöntem oluşturulmuştur (Liao ve ark., 2022). Kolajen ile aljinatın birlikte değerlendirildiği başka bir çalışmada ise kıkırdak dokularına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiş olup bu iki materyalleri içeren kompozit yapı sayesinde mekanik dayanıklılıkta iyileşme olduğu ve buna bağlı olarak da hücre yapışması ve çoğalmasında gelişme olduğu kaydedilmiştir (Yang ve ark., 2018). Deri hücrelerinin yer aldığı doku mühendisliği çalışmalarının başka bir örneğinde ise aljinat/kitosan/flurbiprofen değerlendirilmiş ve fibroblast hücreleri ile yapılan testlerde anti-inflamatuvar ve hidrofilik özelliklerin iyileştirildiği ve mekanik özelliklerin de bu hücreler için uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Zhu ve ark., 2019). Aljinat ve İpek Fibroinin birlikte değerlendirildiği başka bir çalışmada ise aljinat bazlı Aljinat (Alg)/Oksitlenmiş Aljinat (OAlg)/İpek Fibroin (SF)'nin CaCO_3 -GDL ve Schiff bazı reaksiyonu kullanılarak eş zamanlı iyonik jelleşme yoluyla çift çapraz bağlanmasıyla yerinde şekillendirilebilen hidrojenler sentezlenmiştir. Bu hidrojenlerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik uyumluluk özellikleri değerlendirilmiş olup çift çapraz bağlanmış Alg/OAlg/SF hidrojeninin basınç modülünün fiziksel olarak çapraz bağlanmış aljinat hidrojeniliyle kıyaslandığında 28 kPa'dan 67 kPa'ya yükseldiği raporlanmıştır. Bu durumun kovalent imin bağı oluşumuna bağlı olduğu da bildirilmektedir. Kemik iliği mezenkimal kök hücreleri ile de bu hidrojenlerde farklılaşmalar, ALP aktivitesi, Alizarin Kırmızısı boyama ve gerçek zamanlı PCR ile test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Ghorbani ve ark., 2023). Çalışmanın genel sonucu, Aljinat/Oksitlenmiş Aljinat/İpek Fibroin hidrojen iskelelerinin kemik doku mühendisliği uygulamalarına uygun olduğunu vurgulamaktadır. Sodyum Aljinat ve polivinil alkolü birlikte buluşturan bir başka çalışmada ise elektroeğirme metodu ile nanofiber iskeleler elde edilmiştir. Bu iskelelerin sentezine etki eden voltaj, akış hızı ve çalışma alanı gibi faktörlerin de optimizasyonu yapılmış olup veriler, merkezi kompozit tasarım altında tepki yüzey metodolojisi ile anlamlandırılmıştır. Sentezlenen nanofiberlere taramalı elektron mikroskobu, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi kullanılarak parçalanabilirlik, şişme, çekme dayanımı, gözeneklilik,

nanofiber çapı, temas açısı ve sitotoksosite açısı gibi birçok test uygulanarak fiberlerin sentezi için en iyi oran belirlenmiştir. L929 hücre hattı ile de sitotoksosite testleri yapılmıştır ve 48 saat boyunca yüksek canlılık izlenmiştir. Sonuçlar, 30 kV, 0,55 $\mu\text{L h}^{-1}$ ve 12,50 cm^{-1} ’de düzenli boyut dağılımına (166 nm) sahip, düzgün ve homojen nanofiberlerin sentezlenebileceğini göstermektedir (Jadba-baei ve ark., 2021). Dolayısıyla bu değerlerde ve bu bileşenlerle elde edilen materyaller, biyouyumluluk göstererek doku mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir. Sinir hücrelerinin hasarının onarımı için vücutta anizotropik bir yapı oluşturabilen ve enjekte edilebilir formdaki rejeneratif doku iskelelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara duyulan ilgi artmaktadır. Örnek çalışmada (Ghaderinejad ve ark., 2021), aljinat bazlı ve manyetik özellik kazandırılmış poli(ϵ -kaprolakton) (PCL) kısa nanolifler içeren enjekte edilebilir bir hidrojel sentezlenmiş olup sinir doku rejenerasyonunda bu jellerin etkinliği araştırılmıştır. Farklı uzunluklardaki fiberleri içeren hidrojeller mekanik özellikleri açısından değerlendirilmiş, fiber uzunluğunun artmasıyla mekanik modüllerde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Yapıların sitotoksosite testleri ise Olfaktör ekto-mezenkimal kök hücreleri (OE-MSC) ile gerçekleştirilmiş ve hücrelerin 7 gün boyunca canlı kalabildiği belirlenmiştir. Tüm bulgular, aljinat temelli enjekte edilebilir hibrit hidrojel modellerinin sinir doku rejenerasyonunda minimal invaziv ve yüksek potansiyelde etkili bir biyomalzeme adayı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Hücre büyümesini, farklılaşmasını ve doku yeniden oluşumunu destekleyecek şekilde mekanik ve kimyasal özelliklerinin kolayca modifiye edilebilmesi, aljinatı pek çok rejeneratif tıp uygulaması için ideal bir platform haline getirmektedir. Bu nedenle aljinat temelli hidrojel sistemleri, sinir, kırık, kemik ve yumuşak doku mühendisliği çalışmalarında giderek artan bir önem kazanmaktadır.

3.5. Fonksiyonel Gıda Olarak Aljinat Malzemeleri

Aljinatın yapısal özellikleri ile pH, sıcaklık, çapraz bağlayıcı konsantrasyonu, bekletme süresi ve iyonik güç gibi deneysel parametreler, polimerin jelleşme davranışını doğrudan etkiler. Bu özellikleri sayesinde aljinat; gıda jelleri, kontrollü salım sistemleri ve film bazlı ambalaj çözümleri de dahil olmak üzere gıda endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Bi ve ark., 2022). Gıda endüstrisindeki çalışmalar, aslında insan sağlığını da kapsayarak bireylerin yaşam süreçlerinde sağlıklarının iyi bir şekilde devam etmesine yardımcı olmak-

tadır. Bu konuya örnek olarak verilebilecek bir çalışmada, obezite tedavisine destek olabilecek araştırmalarda aljinatın kullanılabilirliği görülmektedir (Jensen ve ark., 2012). Bahsi geçen çalışmada aljinat, obez bireylerde enerji kısıtlaması için bir gıda takviyesi olarak değerlendirilmekte ve bir diyet çalışmasında yer almaktadır. Bilinen özelliği ile aljinatın, midede hem asidik hem de iyonik jeller oluşturarak pankreas lipazı gibi sindirim enzimlerinin aktivitesini azaltabildiği ve bunun da tokluk hissinin oluşmasına katkı sağlayabildiği bildirilmektedir (Houghton ve ark., 2015; Wilcox ve ark., 2021). Aljinat bazlı jel oluşumuna dayalı bir diğer çalışmaya ise Guo ve ekibi tarafından yürütülmüştür. Onların çalışmalarında, kalsiyum karbonat içeren sodyum aljinat sisteminin mide koşullarında bir jel oluşturduğu gözlemlenmiş ve bu jel yapısının dekstrin ve peynir altı suyu proteini izolatu hidroliz oranına in vitro koşullarda negatif etki ettiği raporlanmıştır (Guo ve ark., 2020). Ek olarak sodyum aljinat içeren uzun süreli diyetle beslenen sıçanlarda gıda alımının, vücut ağırlığının, görünür protein sindirilebilirliğinin ve kan glukoz düzeylerinin azaldığı bildirilmiş olup, bu bulgular aljinatın obezite tedavisinde potansiyel bir uygulama alanına sahip olabileceğini göstermektedir. Liu ve ekibinin yürüttüğü bir çalışmanın sonuçları incelendiğinde; Streptozotosin (STZ) ile tip 2 diyabet modeli oluşturulan ve yüksek yağlı diyetle beslenen farelerde, Sargassum fusiforme kaynaklı aljinatın kan glukozu ile trigliserit (TG) ve toplam kolesterol (TK) düzeylerini anlamlı biçimde azalttığı; HDL-kolesterol seviyelerini yükselttiği ve glikoz toleransını iyileştirdiği bildirilmiştir (Liu ve ark., 2021). Ayrıca, diyabetli farelere aljinat uygulanmasının yağlı karaciğer, iskelet kası ve kalp dokularında gözlenen patolojik değişiklikler üzerinde belirgin iyileştirici bir etkisi olduğu ve oksidatif stresi azalttığı rapor edilmiştir. Aynı kaynaklı (Sargassum fusiforme) aljinatın yer aldığı başka bir çalışmada ise, tip 2 diyabet modeli oluşturulan fareler kullanılmış ve aljinatın bu farelerin bağırsak mikrobiyotasını belirgin biçimde modüle ettiği saptanmıştır. Aljinatın, diyabetli fareler üzerindeki bir diğer etkisi olarak ise, farelerin kolonik ortamında dallı zincirli amino asitler (BCAA'lar) ve aromatik amino asitler (AAA'lar) düzeylerini anlamlı ölçüde düşürmesi olarak rapor edilmektedir. Üstelik çalışmada, Aljinat uygulamasının Lactobacillus, Bacteroides, Akkermansia, Alloprevotella, Weissella ve Enterorhabdus gibi yararlı bakterilerin miktarını anlamlı şekilde artırdığı; buna karşın Turicibacter ve Helicobacter gibi potansiyel zararlı türleri belirgin biçimde azalttığı da ifade edilmektedir. Bu bulgular aljinatın tip 2 diyabet yönetiminde olumlu bir biyolojik etki sağlayabileceğine işaret etmektedir. Bu alandaki bir diğer çalışmada ise, Laminaria türünden elde edilen aljinatın, siklofosfamid ile bağışıklığı baskılanan BALB/c farelerinde bağırsak mikrobiyotasını olumlu yönde etkilediği

gözlemlenmiştir. Aljinat uygulamasının yararlı bakterilerin miktarını artırırken patojenik türleri azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca, aljinat tedavisinin sıkı bağlantı (tight junction) proteinlerinin ekspresyonunu yükselterek bağırsak mukozasındaki hasarı iyileştirebildiği ve bağırsak bariyer fonksiyonunu güçlendirebildiği belirtilmiştir (Huang ve ark., 2021). Bu bulgular, aljinatın bağışıklık fonksiyonunu destekleyici potansiyel taşıdığını göstermektedir. Aljinatın bağırsak mikrobiyotası üzerindeki etkilerini konu alan bir başka çalışmada ise araştırmacılar, aljinat içeren diyetlerin, HFD kaynaklı metabolik sendromu (MetS) baskılayabileceğini, bağırsak mikrobiyotası bileşimini değiştirebileceğini ve yararlı bakteriler grubundan olan *Bacteroides* sayısını artırabileceğini belirtmektedirler (Ejima ve ark., 2021). Kalsiyum çapraz bağlı aljinat aerojellerin günlük 250 mg dozlarla 14 gün boyunca Wistar farelerine uygulanmasını içeren başka bir çalışmada ise, *Clostridia* ve *Bacteroides* gruplarının sadece aerojel uygulandığında değil sonrasında da arttığı, *Erysipelotrichia* ve *Candidatus saccharibacteria* dahil olmak üzere diğer bağırsak bakteri gruplarında ise sadece aerojel uygulaması sırasında artma gözlemlendiği ve bu durumda bir ay gibi bir süre sonra azaldığı tespit edilmiştir (Al-Najjar ve ark., 2021). Çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve literatür bilgileri göstermektedir ki; genellikle aljinat üst sindirim sisteminde sindirilmemekte ve kolona ulaştığında, bağırsak mikropları tarafından kullanılabilir (You ve ark., 2020; Campos-Perez ve ark., 2021). Bu kısımda sindirilirken kısa zincirli yağ asitlerine (SCFA'lar) dönüştürülür ki bu sayede yararlı bakterilerin büyümesi desteklenirken zararlı bakterilerin büyümesi ise baskılanmaktadır. Obezite ve tip 2 diyabet gibi hastalıklarda ise kolondaki SCFA yapılarının konakçı sağlığını korumaya yönelik destek olacağı ve kolon hastalıklarını engelleyebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, aljinat temelli malzemeler fonksiyonel gıda uygulamalarında hem teknolojik hem de fizyolojik açıdan çok yönlü avantajlar sunan değerli biyopolimerlerdir. Jel oluşturma kapasitesi, viskozite düzenleme yeteneği ve prebiyotik etki potansiyeli sayesinde gıda dokusunun iyileştirilmesinden kontrollü bileşen salımına kadar geniş bir kullanım alanı sağlar. Bu özellikler, aljinatı sağlık destekleyici ürün geliştirme süreçlerinde yenilikçi ve sürdürülebilir bir bileşen olarak öne çıkarmaktadır.

3.6. Biyosensör Teknolojisinde Aljinat Malzemeleri

Biyosensörler, analitlerle biyolojik tanıma elementleri arasındaki etkileşimleri dayanarak veriler üretebilen bütünleşik analitik cihazlar olarak bilin-

mektedir. Biyosensörlerin tasarım ve üretimindeki temel belirteçler, analitlerle biyoreseptörler arasındaki özgün iletişimle bağlantılı olup bu sistemlerin duyarlılığını, seçiciliğini ve stabilitesini artırmak temel hedefi belirlemektedir (Abbey ve ark., 2024). Enzimler, antikorlar, nükleik asitler, mikro organizmalar, hücreler veya hücre organelleri gibi biyomoleküller, spesifik analitlerle etkileşime girer. Bir biyosensörün seçiciliği ve özgüllüğü, bu biyoreseptörlerin analitleri tanıma gücüne bağlanmaktadır. Bu sebeple biyoreseptörlerin hedeflenen biyolojik moleküle göre tasarımı bir biyosensörün başarısını da doğrudan etkileyebilmektedir. Bu alandaki çalışmalar, biyolojik algılama bileşenlerinin araştırılmasından, biyolojik materyallerin immobilizasyonuna etki edebilecek destek materyallerinin geliştirilmesine kadar geniş bir alanı kapsamaktadır. Biyomolekülün destek yüzeye immobilizasyonu — yani fonksiyonelleştirme — sensör performansını belirleyen kritik bir adımdır. Fonksiyonelleştirme işlemi, immobilize edilen biyolojik materyalin yapısal bütünlüğünü ve aktivitesini koruyacak veya mümkünse artıracak şekilde gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle, basit, etkin ve biyoyumlu immobilizasyon tekniklerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaca yönelik aljinat bazlı bazı materyaller geliştirilmiş ve bu yeni materyallerin immobilizasyonuna yönelik yeni adımlar denenmektedir. Örneğin bir çalışmada NiFe_2O_4 nanoparçacıkları ile modifiye edilmiş aljinat kriyojelleri kullanılmıştır ve glukoz oksidaz bu jel formundaki kompozit yapının içerisine gömülmüştür. Böylelikle elektrokimyasal reaksiyonlara da-yanan glukoz sensörü geliştirilmiştir. Sensörün duyarlılık başarısına etki eden redoks olaylarının daha etkin bir şekilde algılanabilmesi için ise aljinat yapısına elektriksel iletkenlik kazandıran nanoparçacıklardan yararlanılmıştır (Fatonı ve ark., 2021). Sadece aljinat ile hazırlanan elektrotlara kıyasla, nanoparçacık içeren kompozitlerde oksidasyon ve indirgeme piklerinin belirgin biçimde daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Aljinatın farklı olarak yer aldığı başka bir çalışmada ise biyotin-pirol ve aljinat-pirolün elektrokopolimerizasyonu baz alınmış, bu sayede glukoz oksidaz immobilizasyonunu sağlayan duyarlı bir amperometrik glukoz sensörü geliştirilmiştir. Bu yapıda biyotinle glukoz oksidaz, avidin köprüleri aracılığıyla B-Py'ye bağlanmış ve ardından alginat-pirol ile kopolimerize edilmiştir. Modifiye edilmemiş aljinat kullanıldığında sensör performansının belirgin biçimde düştüğü gösterilmiştir (Niğâ ve ark., 2009). Aljinatın aljinat-pirol konjugatları ve bunlardan türetilen iletken formdaki aljinat-polipirol kompozitleri, amperometrik biyosensör geliştirmesinde enzim immobilizasyonu araştırmasına konu olmuştur. Abu-Rabeah ve çalışma arkadaşları (2005), polipirolün elektrokimyasal polimerizasyonu sırasında polifenol oksidaz (PPO) enziminin aljinat matrisine fiziksel olarak hapsediği bir sensör

geliştirmiştir (Abu-Rabeah ve ark., 2005). Aljinat kompozitlerinin elektriksel iletkenliğe olan etkisini inceleyen başka bir çalışmada, yüzey immobilizasyon teknikleri araştırılmıştır. Aljinatın toksik olmaması ve jel oluşturabilme kapasitesinin elektriksel iletkenlik sağlayan aljinat kompozitlerinin eldesine olumlu katkı sağladığı bildirilmiştir. Biyotin ile kovalent olarak modifiye edilmiş aljinat yapısından, genetiği değiştirilmiş biyoluminesans raporlayıcı hücrelerin mikrokürelere enkapsülasyonunu içeren çalışmalarda faydalanılmıştır (Polyak ve ark., 2004). Bu aljinat bazlı yapı, streptavidin kaplı çok modlu bir optik fiberin uç kısmına bağlanmış ve ışık sinyalinin iletilmesinin sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu sayede aljinatın optik sensörlerde de uygulama alanına sahip olduğu raporlanmıştır. Bakterilerin quorum sensing mekanizmasına dayanan bir başka çalışmada ise (Li ve ark., 2017) quorum sensing moleküllerini algılamak üzere aljinat-metakrilat içeren tüm hücre temelli hücre biyosensörünün geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bu tasarımda, genetik olarak düzenlenmiş raporlayıcı bakteriler, hem iyonik hem de fotokimyasal çapraz bağlanma yoluyla hazırlanan stabil mikroboncuklara enkapsüle edilmiştir. *P. aeruginosa* tarafından sentezlenen GFP floresansının üretildiği ve bunun otoindükleyici moleküllerin konsantrasyonuna bağlı olduğu bildirilmiştir. Aljinat içeren mikroboncuklar sayesinde bakterilerin boncuklardan sızma davranışında azalma gözlemlenmiş ve yüksek stabilite görülmüştür. Yüksek morbidite ve mortalite oranları gösteren ve erken teşhisinde sorunlar olabilen hepatosit karsinomunun tanısı için alfa-fetoprotein (AFP) serum biyobelirtecinin tespitine ve miktarına bakılmaktadır. Ancak hastalığın erken evrelerinde bu biyobelirtecin tanısız özgüllüğü ve duyarlılığı oldukça düşük olmaktadır. Bu hastalığın erken tanısına amacıyla AFP'nin tespitinin farklı AFP konsantrasyonlarına sahip bir aljinat polimerine gömülmüş biyosensör 3,3'-bis-(dimetil[6,6']bi[benzo[b]fenoksazinil]-3,3'-iliden) amonyum klorür [fenoksazinil]'in 349 nm'deki floresan yoğunluğundaki değişimini inceleyen bir çalışmada, aljinat bazlı sensörün sağlıklı ve hasta kişilerin örneklerini başarıyla ayırt edebildiği raporlanmıştır. ELISA ile karşılaştırıldığında sırasıyla %93,33 ve %90,0'luk yüksek duyarlılık ve özgüllük ile AFP değerlendirmesinde bu yeni sensör yapısının kullanılabileceği ifade edilmiştir (Attia ve ark., 2022).

Tüm bu çalışmalar ve sonuçlarına dayanılarak aljinat ve aljinat türevi kompozitler, elektrokimyasal, optik ve hücre temelli biyosensörlerin geliştirilmesinde önemli bir biyomateryal olarak değerlendirilmeye devam edeceği ön görülmektedir. Aljinatın biyosensör teknolojisindeki kullanımı, biyolojik ajanların stabil, biyoyumlu ve fonksiyonel bir matriks içinde immobilizasyonuna olanak tanıyarak sensör performansını belirgin şekilde artırmaktadır. İyonik

çapraz bağlanma ile oluşturulan aljinat yapıları, enzim, hücre veya nanoparçacıkların biyolojik aktivitelerini korurken aynı zamanda analit difüzyonunu düzenleyerek yüksek hassasiyet ve seçicilik sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde aljinat, özellikle tıbbi tanı, çevresel izleme ve gıda güvenliği uygulamalarında yeni nesil biyosensör platformlarının geliştirilmesinde stratejik bir biyopolimer olarak öne çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aljinatın fonksiyonel modifikasyona olan yatkınlığı sayesinde aljinat bazlı malzemelerin elde edilmesi ve bu malzemelerin biyoyumlu davranış sergilemesi ile biyomedikal, farmasötik, gıda ve sensör teknolojileri gibi birçok alanda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aljinatın yer aldığı akıllı polimerik yapıların başarılı bir şekilde sentezlenmesi ile yeni hidrojel sistemleri elde edilmiş ve bu sayede akıllı ilaç salım teknolojileri ve minimal invaziv doku mühendisliği yaklaşımları için önemli bulgular kazanılmıştır. Ek olarak aljinatın polimerik yapıların sentezinde yer alması ile malzemelerin; absorbans kapasiteleri iyileştirilmiş, biyosensörlerin tasarımında fonksiyonel yüzey oluşturabilme yetenekleri artırılmış ve fonksiyonel gıdalar üzerinde stabilite sağlayıcı etkisi geliştirilmiştir. Aljinat üzerinde gerçekleştirilen bu çok yönlü çalışmalar sayesinde aljinat, birçok alanda kullanım imkanı oluşturmaktadır.

Aljinatın özelliklerine ve kullanıldığı alanlara değinen bu çalışma, bizlere aljinat ile ilgili geliştirilebilecek alanlar ve konular hakkında çeşitli öngörüler de sunmaktadır. Örneğin özellikle ilaç salım sistemlerinde sıklıkla yer alan sıcaklığa duyarlı sistemlere aljinatın eklenmesi ile optimizasyon işlemleri gerekebilmektedir. Bu amaçla, sıcaklığa duyarlı kopolimerlerle (ör. PNIPAAm, Pluronic) oluşturulan hibrit sistemlerin, mekanik dayanımının ve biyoyumluluğunun artırılmasını hedefleyen yeni sentez yöntemlerinin geliştirilmesi gerekebilir. Aljinat kullanımının fazlaca tercih edildiği yara iyileşme platformlarında antibakteriyel ajanların, büyüme faktörlerinin aljinatla beraber fonksiyonelleştirilmesine yönelik çalışmalar artırılabilir ve klinik etkinliği yüksek yeni nesil yara örtülerinin sentezi mümkün olabilir. İlaç salım sistemlerinde ise kontrollü ve hassas salım mekanizmalarının, aljinatın ve mikro/nano-kapsülasyon tekniklerinin bir arada kullanılmasıyla ilaç kinetiğinin oldukça hassas bir şekilde kontrol altında tutulabildiği sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmalıdır. Hücre tutunumu ve farklılaşmasını destekleyecek aljinat temelli iskeleler, farklı moleküllerde tutunmayı kolaylaştıracak şekilde

hücre-malzeme etkileşimini iyileştiren yaklaşımların oluşmasında büyük önem taşımaktadır. Aljinatın modifiye edilmiş türevlerinin, probiyotiklerin korunumu ve stabilite artırıcı teknolojilerde yer alması ile fonksiyonel gıdalarda yeni nesil aljinat uygulamaları mümkün olmaktadır. Grafen, altın nano parçacıklar ve iletken polimerlerle sağlanan aljinat temelli kompozit yapıların sensör tasarımı ve üretiminde kullanılabilir olduğu gösterilmesi ile duyarlılığı yüksek sensör yapılarının sentezi sağlanabilmektedir. Aljinatın çok farklı alanlarda kullanımı mümkün olmakla birlikte, klinik ve endüstriyel uygulamalar gibi devamlılığın gerekli olduğu üretim bazlı çalışmalarda kalite kontrol, saflaştırma ve üretim prosedürlerinde standart oluşturulması da büyük önem taşımaktadır.

Yazar Katkıları

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanması sırasında dil geliştirme, dil bilgisi inceleme ve görsel illüstrasyon için ChatGPT ve Gemini gibi yapay zeka destekli platformlardan yararlandılar.

KAYNAKÇA

- Abbey Paul, A., Markus, V., Kristollari, K., & S. Marks, R. (2024). Alginate-Based Applications in Biotechnology with a Special Mention to Biosensors. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.110737.
- Abu-Rabeah K., et al. (2005). Synthesis and characterization of a pyrrole– alginate conjugate and its application in a biosensor construction, 6(6):3313-3318.
- Ahmady, A. R., Solouk, A., Saber-Samandari, S., Akbari, S., Ghanbari, H., & Brycki, B. E. (2023). Capsaicin-loaded alginate nanoparticles embedded polycaprolactone-chitosan nanofibers as a controlled drug delivery nanoplatfrom for anticancer activity, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 638, Pages 616-628, ISSN 0021-9797, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.01.139>.
- Al-Najjar, M. A. A., Athamneh, T., AbuTayeh, R., Basheti, I., Leopold, C., Gurikov, P., & Smirnova, I. (2021). Evaluation of the orally administered calcium alginate aerogel on the changes of gut microbiota and hepatic and renal function of Wistar rats. *PLoS ONE*, 16, e0247633.
- Athamneh, T., Amin, A., Benke, E., Ambrus, R., Leopold, C. S., Gurikov, P., & Smirnova, I. (2019). Alginate and hybrid alginate-hyaluronic acid aerogel microspheres as potential carrier for pulmonary drug delivery. *J. Supercrit. Fluids*, 150, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.04.013>.

- Attia, M. S., Mohamed, A. A., El-Saady, M. M., Abou-Omar, M. N., Afify, H. G., Amin, T. A., Hosny, A. H., Youssefa, A. O., and Mohy-Eldin, M. S. (2022). A new method for early diagnosis of liver cancer using a biosensor embedded in an alginate polymer thin film. *J. Mater. Chem. C*, 10, 6464-6472.
- Ayub, A. D., Chiu, H. I., Mat Yusuf, S.N.A., Abd Kadir, E., Ngali, S. H., & Lim, V. (2019). Biocompatible disulphide cross-linked sodium alginate derivative nanoparticles for oral colon-targeted drug delivery, *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 47, <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1557672>.
- Bi, D., Yang, X., Yao, L., Hu, Z., Li, H., Xu, X., & Lu, J. (2022). Potential Food and Nutraceutical Applications of Alginate: A Review. *Marine Drugs*, 20(9), 564. <https://doi.org/10.3390/md20090564>.
- Borazjani, N. J., Tabarsa, M., You, S. G., Rezaei, M. (2017). Effects of extraction methods on molecular characteristics, antioxidant properties and immunomodulation of alginates from *Sargassum angustifolium*. *Int J Biol Macromol*, 101:703–711. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.128>.
- Campos-Perez, W., & Martinez-Lopez, E. (2021). Effects of short chain fatty acids on metabolic and inflammatory processes in human health. *Biochim. Biophys. Acta (BBA) Mol. Cell Biol. Lipids*, 1866, 158900.
- Cao, L., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: a review. *Carbohydr Polym*, 242:116389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116389>.
- Choi, Y., Park, K., Choi, H., Son, D., & Shin, M. (2021). Self-healing, stretchable, biocompatible, and conductive alginate hydrogels through dynamic covalent bonds for implantable electronics. *Polymers*, 13:1133. <https://doi.org/10.3390/polym13071133>.
- Ciocoiu, O. N., Staikos, G., & Vasile, C. (2018). Thermoresponsive behavior of sodium alginate grafted with poly(N-isopropylacrylamide) in aqueous media. *Carbohydr Polym*, 184:118. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.059>.
- Fatoni, A. et al. (2021). Alginate NiFe₂O₄ nanoparticles cryogel for electrochemical glucose biosensor development. *Gels*, 7(4):272.
- Ghorbani, M., Vasheghani-Farahani, E., Azarpira, N., Hashemi-Najafabadi, S., & Ghasemi, A. (2023). Dual-crosslinked in-situ forming alginate/silk fibroin hydrogel with potential for bone tissue engineering, *Biomaterials Advances*, Volume 153, 213565, ISSN 2772-9508, <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213565>.
- Ghaderinejad, P., Najmoddin, N., Bagher, Z., Saeed, M., Karimi, S., Simorgh, S., &

- Pezeshki-Modaress, M. (2021). An injectable anisotropic alginate hydrogel containing oriented fibers for nerve tissue engineering. *Chemical Engineering Journal*, Volume 420, Part 3, 130465, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130465>.
- Guo, L., Goff, H.D., Xu, F., Liu, F., Ma, J., Chen, M., & Zhong, F. (2020). The effect of sodium alginate on nutrient digestion and metabolic responses during both in vitro and in vivo digestion process. *Food Hydrocoll.*, 107, 105304.
- Houghton, D., Wilcox M. D., Chater, P. I., Brownlee, I. A., Seal, C. J., & Pearson, J. P. (2015). Biological activity of alginate and its effect on pancreatic lipase inhibition as a potential treatment for obesity. *Food Hydrocoll.*, 49, 18–24.
- Huang, J., Huang, J., Li, Y., Wang, Y., Wang, F., Qiu, X., Liu, X., & Li, H. (2021). Sodium alginate modulates immunity, intestinal mucosal barrier function, and gut microbiota in cyclophosphamide-induced immunosuppressed BALB/c mice. *J. Agric. Food Chem.*, 69, 7064–7073.
- Jadbabaei, S., Kolahdoozan, M., Naeimib, F., & Ebadi- Dehaghanic, H. (2021). *RSC Adv.*, 11, 30674.
- Jensen, M.G., Kristensen, M., & Astrup, A. (2012). Effect of alginate supplementation on weight loss in obese subjects completing a 12-wk energy-restricted diet: A randomized controlled trial. *Am. J. Clin. Nutr.*, 96, 5–13.
- Kim, E., Seok, J. M., Bin Bae, S., Park, S. A., & Park, W.H. (2021). Silk fibroin enhances cytocompatibility and dimensional stability of alginate hydrogels for light-based three-dimensional bioprinting, *Biomacromolecules*, 22, <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00034>.
- Kolawole, O. M., Ifeanafor, A. R., Ifade, W. A., Akinleye, M. O., Patrojanasophon, P., Silva, B. O., & Osuntoki, A. A. (2023). Formulation and evaluation of pacitaxel-loaded boronated chitosan/alginate nanoparticles as a mucoadhesive system for localized cervical cancer drug delivery, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Volume 87, 104810, ISSN 1773-2247, <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104810>.
- Lee, C., Shin, J., Lee, J. S., Byun, E., Ryu, J. H., Um, S. H., Kim, D. I., Lee, H., & Cho, S. W. (2013). Bioinspired, calcium-free alginate hydrogels with tunable physical and mechanical properties and improved biocompatibility. *Biomacromol.*, 14:2004–2013. <https://doi.org/10.1021/bm400352d>.
- Lefnaoui, S., Moulai-Mostefa, N., Yahoum, M. M., & Gasmi, S. N. (2018). Design of antihistaminic transdermal films based on alginate–chitosan polyelectrolyte complexes: characterization and permeation studies, *Drug Dev. Ind. Pharm.* 44, <https://doi.org/10.1080/03639045.2017.1395461>.

- Li, P. et al. (2017). Encapsulation of autoinducer sensing reporter bacteria in reinforced alginate-based microbeads. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(27):22321-22331.
- Liang, M., Chen, Z., & Wang, F. et al. (2019). Preparation of self-regulating/anti-adhesive hydrogels and their ability to promote healing in burn wounds. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, 107 (5), pp. 1471-1482, 10.1002/jbm.b.34
- Liu, M., Song, X., Wen, Y., Zhu, J. L., & Li, J. (2017). Injectable thermoresponsive hydrogel formed by alginate-g-poly(N-isopropylacrylamide) releasing doxorubicin-encapsulated micelles as smart drug delivery system. *ACS Appl Mater Interfaces*, 9:35673–35682. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b12849>
- Liu, J., Wu, S., Cheng, Y., Liu, Q., Su, L., Yang, Y., Zhang, X., Wu, M., Choi, J.-I., & Tong, H. (2021). Sargassum fusiforme alginate relieves hyperglycemia and modulates intestinal microbiota and metabolites in type 2 diabetic mice. *Nutrients*, 13, 2887
- Lv, X., Liu, Y., Song, S., Tong, C., Shi, X., Zhao, Y., Zhang, J., & Hou, M. (2019). Influence of chitosan oligosaccharide on the gelling and wound healing properties of injectable hydrogels based on carboxymethyl chitosan/alginate polyelectrolyte complexes, *Carbohydr. Polym.*, 205, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.067>.
- Maity, C., & Das, N. (2022). Alginate-Based Smart Materials and Their Application: Recent Advances and Perspectives. *Top Curr Chem (Z)* 380, 3. <https://doi.org/10.1007/s41061-021-00360-8>.
- Mirrahimi, M., Beik, J., Mirrahimi, M., Alamzadeh, Z., Teymouri, S., Mahabadi, V. P., Eslahi, N., Ebrahimi Tazehmahalleh, F., Ghaznavi, H., Shakeri-Zadeh, A., & Moustakis, C. (2020). Triple combination of heat, drug and radiation using alginate hydrogel co-loaded with gold nanoparticles and cisplatin for locally synergistic cancer therapy. *Int. J. Biol. Macromol.*, 158, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.272>.
- Mndlovu, H., du Toit, L. C., Kumar, P., Marimuthu, T., Kondiah, P.P.D., Choonara, Y. E., & Pillay, V. (2019). Development of a fluid-absorptive alginate-chitosan bioplatfrom for potential application as a wound dressing. *Carbohydr. Polym.*, 222, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114988>.
- Mohandas, A., Kumar, P.T.S., & Raja, B. et al. (2015). Exploration of alginate hydrogel/nano zinc oxide composite bandages for infected wounds[J]. *Int. J. Nanomedicine*, 10 (Suppl 1), pp. 53-66, 10.2147/IJN.S79981
- Montaser, A. S., Jlassi, K., Ramadan, M. A., Selem, A. A., & Attia, M. F. (2021). Algi-

- nate, gelatin, and carboxymethyl cellulose coated nonwoven fabrics containing antimicrobial AgNPs for skin wound healing in rats. *Int. J. Biol. Macromol.* 173, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.123>.
- Murab, S., Gupta, A., Włodarczyk-Biegun, M. K., Kumar, A., van Rijn, P., Whitlock, P., Han, S. S., & Agrawal, G. (2022). Alginate based hydrogel inks for 3D bioprinting of engineered orthopedic tissues, *Carbohydr. Polym.*, 296, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119964>.
- Niță II et al. (2009). Amperometric biosensor based on the electro-copolymerization of a conductive biotinylated-pyrrole and alginate-pyrrole. *Synthetic Metals.*, 159(12):1117-1122.
- Polyak, B., Geres, S., & Marks, R. S. J. B. (2004). Synthesis and characterization of a biotin-alginate conjugate and its application in a biosensor construction. *Biomacromolecules*, 5(2):389-396.
- Qosim, N., Dai, Y., Williams, G. R., & Edirisinghe, M. (2024). Structure, properties, forming, and applications of alginate fibers: A review. *International Materials Reviews*. 69(5-6):309-333. doi:10.1177/09506608241280419.
- Razmjooee, K., Oustadi, F., Golaghaei, A., & Nassireslami, E. (2022). Carboxymethyl chitosan–alginate hydrogel containing GSNO with the ability to nitric oxide release for diabetic wound healing, *Biomed. Mater.*, 17, <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ac877c>.
- Reddy, O. S., Subha, M.C.S., Jithendra, T., Madhavi, C., & Rao, K. C. (2021). Curcumin encapsulated dual cross linked sodium alginate/montmorillonite polymeric composite beads for controlled drug delivery. *J. Pharm. Anal.*, 11, <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2020.07.002>.
- Roquero, D. M., & Katz, E. (2022). Smart alginate hydrogels in biosensing, bioactuation and biocomputing: State-of-the-art and perspectives, *Sensors and Actuators Reports*, 4:100095. ISSN 2666-0539, <https://doi.org/10.1016/j.snr.2022.100095>.
- Sahoo, D. R., & Biswal, T. (2021). Alginate and its application to tissue engineering. *SN Appl Sci*, 3:30. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-w>.
- Saji, S., Hebden, A., Goswami, P., & Du, C. (2022). A brief review on the development of alginate extraction process and its sustainability. *Sustainability*, 14, 5181.
- Sarheed, O., Dibi, M., Ramesh, K.V.R.N.S., & Drechsler, M. (2021). Fabrication of alginate- based o/w nanoemulsions for transdermal drug delivery of lidocaine: influence of the oil phase and surfactant, *Molecules*, 26, <https://doi.org/10.3390/molecules26092556>.

- Shahbazizadeh, S., Naji-Tabasi, S., & Shahidi-Noghabi, M. (2022). Development of soy protein/sodium alginate nanogel-based cress seed gum hydrogel for oral delivery of curcumin, *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 9;41, <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00304-4>.
- Siew, C. K., Williams, P. A., & Young, N. W. G. (2005). New insights into the mechanism of gelation of alginate and pectin charge annihilation and reversal mechanism. *Biomacromol*, 6:963–969. <https://doi.org/10.1021/bm049341l>.
- Sudhakar, M., Nallasamy, V. D., Dharani, G., & Buschmann, A. H. (2024). Applications of sea weed biopolymers and its composites in dental applications. *J. Appl. Biol. Biotechnol.*, 12, 62–68.
- Tan, J., Luo, Y., Guo, Y., Zhou, Y., Liao, X., Li, D., Lai, X., & Liu, Y. (2023). Development of alginate-based hydrogels: Crosslinking strategies and biomedical applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 239: 124275, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124275>.
- Teng, K., An, Q., Chen, Y., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2021) Recent development of alginate-based materials and their versatile functions in biomedicine, flexible electronics, and environmental uses. *ACS Biomater Sci Eng*, 7:1302–1337. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.1c00116>.
- Wang, Y., Shen, Z., Wang, H., Song, Z., Yu, D., Li, G., Liu, X., & Liu, W. (2024). Progress in research on metal ion crosslinking alginate-based gels. *Gels*, 11, 16.
- Wang, J., Liu, S., Huang, J., Ren, K., Zhu, Y., & Yang, S. (2023). Alginate: Microbial production, functionalization, and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242:3, 125048.
- Wilcox, M.D., Chater, P.I., Stanforth, K.J., Woodcock, A.D., Dettmar, P.W., & Pearson, J.P. (2021). The rheological properties of an alginate satiety formulation in a physiologically relevant human model gut system. *Ann. Esophagus*, 5, 3.
- Xu, M., Qin, M., Cheng, Y., Niu, X., Kong, J., Zhang, X., Huang, D., & Wang, H. (2021) Alginate microgels as delivery vehicles for cell-based therapies in tissue engineering and regenerative medicine. *Carbohydr Polym*, 266:118128. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118128>.
- Xu, D., Qiao, T., Wang, Y., Wang, Q. S., & Cui, Y. L. (2021)-A. Alginate nanogels-based thermosensitive hydrogel to improve antidepressant-like effects of albiflorin via intranasal delivery, *Drug Deliv.*, 28, <https://doi.org/10.1080/10717544.2021.1986604>
- Yang, X., Lu, Z., Wu, H., Li, W., Zheng, L., & Zhao, J. (2018). Collagen-alginate as bioink for three-dimensional (3D) cell printing based cartilage tissue engi-

- neering, Mater. Sci. Eng. C, 83, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.09.002>.
- You, L., Gong, Y., Li, L., Hu, X., Brennan, C., & Kulikouskaya, V. (2020). Beneficial effects of three brown seaweed polysaccharides on gut microbiota and their structural characteristics: An overview. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 55, 1199–1206.
- Zhang, Y., Jiang, G., Yu, W., Liu, D., & Xu, B. (2018). Microneedles fabricated from alginate and maltose for transdermal delivery of insulin on diabetic rats. *Mater. Sci. Eng. C*, 85, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.12.006>.
- Zhang, H., Cheng, J., & Ao, Q. (2021). Preparation of alginate-based biomaterials and their applications in biomedicine. *Mar Drugs*, 19:264. <https://doi.org/10.3390/md19050264>.
- Zheng, W., Chen, C., Zhang, X., Wen, X., Xiao, Y., Li, L., Xu, Q., Fu, F., Diao, H., & Liu, X. (2021). Layer-by-layer coating of carboxymethyl chitosan-gelatin-alginate on cotton gauze for hemostasis and wound healing, *Surf. Coat. Technol.*, 406, 126644, <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2020.126644>.

10. BÖLÜM

GİYİLEBİLİR SAĞLIK TEKNOLOJİLERİNDE POLİMER BİLİMİNİN GELECEĞİ

Asst. Prof. Dr. Elif IŞIKÇI KOCA

Işık University

Faculty of Engineering and Natural Sciences,

Electrical and Electronics Engineering Department,

Biomedical Engineering Program

<https://orcid.org/0000-0002-2636-1467>

1.GİRİŞ

Giyilebilir sağlık teknolojileri, biyomedikal mühendisliğinde birey odaklı izleme ve erken tanı yaklaşımlarının önünü açan en dinamik araştırma alanlarından biridir. Bu teknolojilerin temelini oluşturan Nano-BioMEMS (Nano-Biyomikroelektromekanik Sistemler), mikro ve nano ölçekli sensör, aktüatör ve akışkanlık bileşenlerin biyolojik sistemlerle bütünleştirilmesini sağlar. Nano düzeydeki bu entegrasyon, biyosinyallerin yüksek hassasiyetle algılanmasına, çoklu fizyolojik parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve kişiselleştirilmiş sağlık çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanır. Esnek, biyoyumlu ve enerji verimli bu sistemler; kardiyovasküler izleme, metabolik analiz, nörolojik kayıt ve yara takibi gibi klinik uygulamalarda önemli yenilikler sunmaktadır. Bu bölüm, Nano-BioMEMS üretiminde kullanılan sentetik, doğal ve biyobozunur polimerlerin temel özelliklerini, biyoyumlu mikro-nano sistemlerdeki işlevsel rollerini ve malzeme seçimini yönlendiren kritik tasarım kriterlerini kapsamlı biçimde ele almaktadır.

Giyilebilir sağlık teknolojileri ile BioMEMS cihazların birleşimi ile hasta-

lardan hızlı, sürekli ve hassas fizyolojik verilerin toplanması mümkün olmaktadır. Bu sayede erken teşhis ve kişiselleştirilmiş tedavilerin sağlanması ile sağlık yönetiminde yeni bir yaklaşım oluşmuştur. İnsan vücudu ile uygun materyaller seçilerek üretilen BioMEMS cihazlarının vücuda sorunsuz entegrasyonu ile invaziv olmayan tekniklerle özellikle kronik hastalık bulgusu taşıyan hastalıkların sürekli takibi sağlanabilmektedir. Elde edilen verilerin bulut sistemleri ile birleşimi sayesinde ise bilgi aktarımı ve bilgilere daimî ulaşım gerçekleştirilerek hasta bakım teknolojilerine yenilik kazandırılabilir.

2. NANO-BioMEMS KAVRAMI

Nano-BioMEMS, biyolojik süreçlerin izlenmesi veya düzenlenmesi amacıyla mikro ve nano ölçekli bileşenlerin entegre edildiği sistemlerdir. Giyilebilir formda kullanıldığında, insan vücuduyla doğrudan etkileşime girerek gerçek zamanlı sağlık takibi sağlar.

BioMEMS yaklaşımının ortaya çıkması ile modern sağlık hizmetlerine yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Bu cihazların giyilebilir/implante edilebilir özellikleri sayesinde, sürekli, kişiye özel ve minimal formda invaziv izleme, teşhis ve tedavi alanında yeni bir ilerleme kaydedilmiştir. Hastaların biyokimyasal, biyomekanik ve elektrofizyolojik sinyallerinin gerçek zamanlı ve invaziv olarak takip edilebilmesi, bu cihazların sağlık sektörüne eklenmesi ile sağlanmıştır (Abhinav ve ark., 2025). Bu faydaları ile, BioMEMS temelli hizmetlerle hastalara kişiselleştirilmiş çözümler sunulabilir. BioMEMSlerin implante edilebilir özellikleri, yeni çalışmalarla desteklenerek onların kontrollü ilaç salım sistemleri ve teşhiste doğruluğun artırılması gibi alanlarda da öncü olmasını sağlayacaktır (Ho ve ark., 2020).

Biyosensörlerin, mikroakışkan teknolojisinin, kablosuz iletişim ve sinyal işlemenin bir arada toplandığı mikro ölçekli sistemler olan BioMEMSler; malzeme bilimi, mikrofabrikasyon ve elektronik alanındaki çalışmalarla desteklenerek biyolojik sistemlerle entegre olabilir ve invaziv yollarla bu sistemlerle etkileşime girebilirler (Assalve ve ark., 2024; Kassanos ve ark., 2025). Giyilebilir BioMEMS ise, fizyolojik parametre ve biyokimyasal biyobelirteçlerin non-invaziv ve harici olarak izlenmesinde aktif rol alır. Günlük hayata kolaylıkla entegre edilebildikleri için, giyilebilir BioMEMS birçok çalışmanın konusu olmuştur. Bu alana örnek olarak; mikro iğne dizileri, giyilebilir solunum hızı sensörleri ve akciğer sesi dedektörleri (Yin ve ark., 2024), akıllı tekstil ürünleri, giyilebilir EKG monitörleri (Sridhar et al., 2024), basınç sen-

sörleri (göz içi basınç sensörü (Wu ve ark., 2023), biyosensör entegreli bileklik benzeri ürünler verilebilir (Erdem ve ark., 2024). Giyilebilir BioMEMS cihazlarının etkin olarak kullanımı sayesinde günlük hayatta periyodik/sürekli takibi gereken kalp atış hızı, solunum fonksiyonu, glikoz seviyeleri, kas aktiviteleri gibi biyolojik aktiviteler de kolaylıkla izlenebilir (Vo ve ark., 2024). Elektrokimyasal, optik ve mekanik değişimlerin algılanması sayesinde fizyolojik parametreler daha doğru ve tutarlı olarak takip edilebilir (Sanjay ve ark., 2024). Bu izlemlerin kablosuz ünitelerle entegre edilmesi ile de verilerin gerçek zamanlı olarak bulut sistemlerinde kaydedilmesi mümkün olabilmekte ve bu sayede kesintisiz veri ulaşımı sağlanmış olmaktadır. Bu yaklaşım, sağlık sektörüne yenilikçi bir bakış açısı katmaktadır. Öyle ki BioMEMS alanında yapay zekâ, makine öğrenimi ve nesnelerin interneti (IoT) gibi uygulamaların eklenmesi ile cihazın etkinliği artırılabilir. Bu eklentiler ile eş zamanlı olarak kaydedilen fizyolojik veriler hızlıca analiz edilebilir ve bu sayede olumsuz durumların anlık olarak tespiti sağlanabilir. Ek olarak uygulanacak tedavilerin kişiselleştirilmesinde de fayda sağlayacaktır. Özellikle IoT ile geliştirilen cihazların yaygınlaşması ile hastaların takibi uzaktan da mümkün olabilmektedir. Dijital teknolojilerin bu şekilde BioMEMS cihazları ile entegrasyonu sonucunda hem klinikte hem de ev ortamında hastaların düzenli takibi sağlanabilecek ve akıllı sağlık sistemleri oluşturulabilecektir (Alahi ve ark., 2023; Flynn ve ark., 2024).

BioMEMS cihazların tasarım ve üretiminde elektronik alt yapı katkısının yanında uygun malzeme seçimi ve yeni malzemelerin üretimi de büyük önem taşımaktadır (Tablo 1). Cihazın üretiminde, biyolojik dokularla etkileşimi göz önünde bulundurulmalıdır, dolayısıyla malzeme seçiminde cihaza gerekli esnekliği ve elastikliği sağlayabilen, dayanıklılığı hedef dokuyla uyumlu olan biyoyumlu ve biyobozunur malzemeler değerlendirilmelidir (Liu ve ark., 2023). Özellikle implante edilebilir özellikteki BioMEMS cihazları için uzun süreli stabilite sağlayan ve biyoyumluluğu olan materyal seçimi önem taşımaktadır. Üstelik bu cihazların fizyolojik sıvılarla etkileşiminden kaynaklanan enfeksiyon oluşumu, biyofilm oluşumu ve korozyon gibi durumlara rastlanılabilir. Böyle durumlar, cihazın çalışma performansını negatif olarak etkileyebilir ya da cerrahi müdahale ile cihazın biyolojik dokudan ayrılmasını gerektirebilir (Xu and Lee, 2020). Tüm bu etkenler birlikte değerlendirilerek hedeflenen BioMEMS cihazları başarılı bir şekilde amaca uygun olarak üretilmektedir.

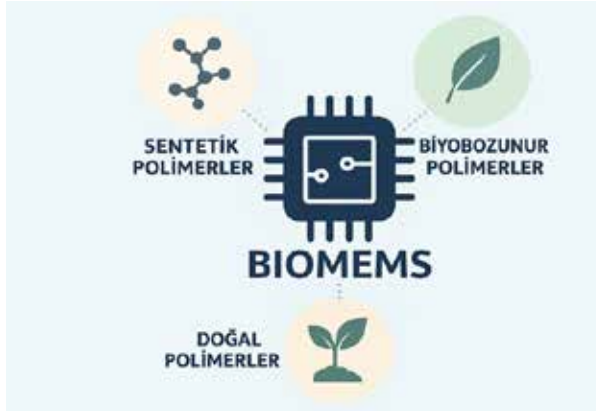
3. BioMEMS CİHAZLARIN ÜRETİMİNDE KULLANILAN POLİMERİK MALZEMELER

BioMEMS cihazları, elektronik alt yapısı içeren minyatür yapılar olarak bilinmekle birlikte bu cihazların biyomedikal mühendisliğindeki uygulama alanları, üretimlerinde kullanılan malzemelere göre değişim gösterebilmektedir. Cihazların tasarım ve üretiminde, fizyolojik ortamlarda kararlı olan, elektronik ve mikrokışkan bileşenlerle entegrasyonu mümkün kılabilen malzemelerin seçimi önemlidir. Malzemelerin uygunluğu, cihazın ergonomik özelliğini doğrudan etkileyeceğinden hasta konforuna da etki edecektir (Menon ve ark., 2013). Ayrıca uygun malzeme seçimi sayesinde cihazın dayanıklılığı artırılabilir, performansı iyileştirilebilir ve ölçülen sinyalin kalitesi geliştirilebilir (Sarhan ve ark., 2025; Welburn ve ark., 2025).

BioMEMS üretiminde kullanılan malzemeler; sentetik ve doğal polimerler, biyolojik olarak emilebilen ve parçalanabilen malzemeler ve hibrit malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Şekil 1). Her malzemenin hedeflenen amaca göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Tablo 1). 2.1. Sentetik Polimerler

3.1. Polidimetilsiloksan (PDMS)

Polidimetilsiloksan (PDMS), silikon bazlı bir polimerdir ve fizikokimyasal özellikleri sebebiyle BioMEMS üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. PDMS'nin yapısı, tekrarlayan $(CH_3)_2SiO$ birimlerinden oluşur ve Si-O omurgası esneklik ve ayarlanabilir mekanik özellikler sağlar (Brook, 2000). Değişen çapraz bağlarla sentezlenebilme özelliği sayesinde PDMS; emülsiyonlar, akışkanlar, reçineler, elastomerler ve kauçuklar da dahil olmak üzere farklı formlarda bulunabilmektedir.



Şekil 1. BioMEMS cihazlarında kullanılan üç temel polimer sınıfı—sentetik polimerler, biyobozunur polimerler ve doğal polimerler.

PDMS' nin düşük moleküller arası etkileşiminin nedeni, yüzey metil gruplarıdır. Bu durum, aynı zamanda düşük yüzey geriliminin de sebebi olup hidrofobik özelliğin ön plana çıkmasında etkilidir (Selvaganapathy, 2008). PDMS, kimyasal kararlılığı yüksek bir maddedir ve bu sayede her çözücü ile reaksiyona girmez. Bu özelliği sayesinde ise kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilebilmektedir (Juárez-Moreno ve ark., 2015; Chen ve ark., 2015; Johnston ve ark., 2014). Ek olarak, malzemenin optik şeffaflığı, geniş dalga boyu (240-1100 nm) aralığında sağlanabildiğinden çeşitli optik ve biyolojik görüntüleme işlemlerinde kullanımı mümkün olmaktadır. Şeffaflığı ve kırılma indisi özellikleri ise minimum ışık saçılımına sebebiyet verdiğinden malzeme, optik algılama temelli mikroakışkan cihazların tasarımında önemli bir yer tutar. PDMS' nin en önemli özelliği ise biyouyumluluğudur. Bu özelliği onu, biyomedikal uygulamalardaki BioMEMS cihazının üretiminde ön plana çıkarmaktadır (Fan ve ark., 2015; Tong ve ark., 2016). Ayrıca yüzey modifikasyonuna açıktır, böylece uygun işlemlerle modifiye yapıldığında hücre yapışmasını da desteklediği gösterilmiştir. PDMS içeren BioMEMS cihazların, canlı dokularla etkileşimi artmaktadır. Biyoloji alanındaki bir diğer önemli özelliği ise PDMS' nin yüksek gaz geçirgenliğidir (Wang ve ark., 2013; Kakati ve ark., 2017; Singh ve ark., 2015). Bu sayede PDMS, verimli oksijen transferini mümkün kılar ve biyomühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilir. PDMS' in mekanik özellikleri incelenecek olursa, oldukça elastik ve esnek yapısı ile bilinmekte ve kopma anındaki uzamasının çapraz bağlama oranına da bağlı olarak %100'ü aştığı raporlanmaktadır (Keskin ve ark., 2018). Birkaç kPa' dan MPa' ya kadar geniş bir Young modülü değerine sahiptir. Esnekliği ve gaz geçirgenliği, özellikle hücrelerin oksijen ihtiyacının önemli olduğu mikro ortamların oluşturulmasında büyük avantaj sağlar. Ayrıca PDMS' nin düşük elastik modül değeri, yapısal bütünlüğünün korunurken deformasyona uğrayabilmesini destekler; bu sayede de elektronik tabanlı giyilebilir cihazlar için kullanımını mümkün kılar (Juárez-Moreno ve ark., 2015; Chen ve ark., 2015). Malzeme, üstün yapışma özellikleri sergiler; böylece UV altında yapışma/yapışmama performansı değişerek mikrofabrikasyon ve desenleme teknikleriyle kolayca işlenebilmesi, PDMS' i hücre kültürü çipleri, mikroakışkan kanalları, organ-çip platformları ve sensör sistemleri için mükemmel bir seçenek haline getirir (Kim ve ark., 2017).

PDMS, kimyasal modifikasyona açıktır; çeşitli yüzeylere seçici bağlanma niteliğine sahiptir. Tüm bu fizikokimyasal özelliklerinin yanında PDMS kompozit malzeme oluşturmaya çok yatkındır. PDMS, nanopartiküller (metal nanopartiküller), karbon bazlı nano yapılar ve iletken polimerler gibi birçok farklı

özellikteki malzeme ile kompozit yapıyı oluşturabilir (Kim ve ark., 2017). Yeni kompozitlerin sentezlenmesi ile farklı özellikler bir araya getirilerek amaca yönelik çok fonksiyonlu yapılar kazanılabilir. Örneğin, titanyum ve altın temelli ince metal filmlerin yanında gümüş nano yapılar ile de PDMS etkileşime girmiş ve işlevsel yetenekleri daha yüksek yeni nano bazlı yapılar elde edilmiştir (Eom ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2015; Abhinav ve ark., 2025). PDMS hidrofobik özellikler göstermektedir; ancak PDMS' in hidrofobik yüzeyi, yüzey modifikasyonları veya kimyasal fonksiyonlandırma ile iyileştirilebilir ve böylece sıvı kontrolü, biyomolekül immobilizasyonu ve sensör hassasiyeti gerektiren, nem içeren ortamlardaki çalışmalar için kullanılmaktadır (Amjadi ve ark., 2016). Tüm bu özellikler PDMS' i, BioMEMS cihazlarının hem araştırma laboratuvarlarında prototip üretiminde hem de klinik uygulamalara yönelik fonksiyonel platformların geliştirilmesinde vazgeçilmez bir malzeme yapmaktadır.

3.1.2. Poliimid

Poliimidler (PI'ler), sentetik polimerlerin iyi bilinen bir diğer sınıfıdır. Bu malzemelerin dayanıklılıkları çok yüksektir, bu sayede formlarını ve mukavemetlerini kaybetmeden çok yüksek sıcaklıklara karşı direnç gösterirler. Hassas cihazların korunmasında, benzersiz elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle kullanılmaktadırlar. Poliimidler, alternatif karbonil (C=O) ve azot (N) gruplarına sahip aromatik heterosiklik zincirlere sahiptir ve bir yük transfer kompleksi oluştururlar. Bu yapı onlara, sert ve kimyasal bozunmaya karşı direnç kazandırır ve bu sayede biyolojik ortamlarda dayanıklı bir davranış sergilerler (Yang ve ark., 2024).

PI' ler, $78,3 \pm 7,3$ MPa' lık çekme dayanımı, %7,4'lük kopma uzaması ve 2,5 GPa' lık Young modülüne sahiptir (Abhinav ve ark., 2025). Bu üstün özellikleri sayesinde BioMEMS cihazlarının üretiminde sıklıkla tercih edilirler. Düşük yoğunluk değerleri sayesinde mekanik dayanıklılıkları yüksek olup, esnek ve hafif yapıları ile biyomedikal alanında oldukça geniş uygulama alanına sahiptirler. Ayrıca diğer malzemelere kıyasla daha yüksek bir cam geçiş sıcaklık değerine (Tg değerleri 325 °C) ulaşabilirler ve yüksek sıcaklık değerlerinde moleküler yapılarını rahatlıkla koruyabilirler (Redolfi ve ark., 2022). Güçlü termal özelliklerine ek olarak PI' ler biyouyumlu malzemeler olarak bilinirler (Hiramoto ve ark., 1989; Yang ve ark., 2024). Yanı sıra üstün kimyasal direnç göstererek biyolojik dokularla etkileşim gerektiren çalışmalarda aranan malzemeler arasında yer alırlar. BioMEMS sentezinde gerekli olan elektriksel yalıtım sorunu ise, üstün dielektrik değerine sahip PI malzemelerin kullanı-

mı ile kolayca giderilmektedir. Fizyolojik ortamlardaki kararlılıkları ise çok az su absorplamalarına ve oksidasyona karşı direnç göstermelerine bağlıdır. Bu özellikleri sayesinde ise dokularla ve fizyolojik sıvılarla temas gerektiren mikro-devrelerin uzun dönem stabilitesini artırır.

3.2.3. Parilen C

Parilen C, BioMEMS cihazlarının üretiminde sıklıkla tercih edilen bir diğer malzemedir. Başta biyoyumlu olarak bilinmesi, Parilen C materyalini özellikle canlı dokularla etkileşim gerektiren çalışmalarda bir adım öne çıkarmaktadır. Ek olarak bu malzeme, mekanik strese karşı dayanıklı olarak bilinmektedir ve esneklik değerinin orta düzeyde olması ile de yapısal bütünlüğü bozulmadan yüzeylere mükemmel bir şekilde uyum sağlamasına yardımcı olmaktadır. Yaklaşık 70 MPa'lık bir çekme mukavemetine sahiptir ve yaklaşık % 200' lük kopma uzaması göstermektedir (Abhinav ve ark., 2025). 4,5 GPa Young modülü ve 35 ila 80 arasında değişen Shore D sertliği sayesinde mukavemetini kaybetmeden hassasiyet gerektiren çalışmalarda bu malzemeyi kullanılabilir kılar. Bu değerler, malzemeye sertlik ve elastikiyet arasında denge kurmasına yardımcı olarak özellikle giyilebilir BioMEMS gibi her iki özelliği de gerektiren uygulamalar için çok uygun bir seçenek olmaktadır (Wang ve ark., 2020; Ware ve ark., 2012). Özellikle mikrofabrikasyon uygulamalarında esnek yüzeylerin kaplamalarında parilen C oldukça sık kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk değerinden ötürü (1,289 g/cm³) ince film kaplamalarındaki uygulamalarda kullanılması ile malzemede minimum ağırlık artışına neden olur. Ayrıca güçlü hidrofobik karakteristiğine sahiptir, implant edilebilir sensörler, nöroprotezler ve mikroakışkan sistemler için ideal bir koruyucu dielektrik tabaka görevi görür. Nemli ortamlardaki uygulamalarda hidrofobik özelliği ile ön plana çıkmakta ve bu özelliği sayesinde de vücut sıvılarıyla temasında şişme profili düşük olmaktadır; bozulmaya karşı güçlü direnç sergiler (Kuo ve ark., 2021; Lecomte ve ark., 2017). Orta düzeydeki biyodegradasyon niteliğinden dolayı, kardiyovasküler stentler, sinir problemleri ve periferik sinir elektrotları gibi uzun süreli kullanım istenilen biyomedikal uygulamalarda kullanımı mümkün olmaktadır (Gholizadeh ve ark., 2023). Oksidasyona ve UV radyasyonuna karşı da oldukça dirençli olduğu bilinmektedir. Elektriksel özellikleri irdelendiğinde ise, Parilen C' nin 1 MHz'de 2,95 dielektrik sabitine sahip (Abhinav ve ark., 2025) mükemmel bir yalıtkan olduğu raporlanmaktadır ve yüksek elektrik yalıtımı sunarak uzun dönem implantasyonlarda elektronik bileşenlerin stabilitesini artırır. Dalga boylarına bağlı olarak da optik şeffaflık gösterebildiğinden biyosensör tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır (Uscanga ve ark., 2023). Esnekliği saye-

sinde de giyilebilir ve implant edilebilir cihazlarda doku uyumunu iyileştirerek ve mekanik gerilimi azaltarak, giyilebilir BioMEMS cihazlarının üretiminde özellikle ince kaplama tabakaların gerekli olduğu çalışmalarda Parilen C ön plana çıkmaktadır.

3.2.4. Poli(metil metakrilat) (PMMA)

Poli(metil metakrilat) (PMMA), biyomedikal ve giyilebilir teknolojilerde özellikle değerli kılan mekanik özelliklere sahip dayanıklı ve çok yönlü bir polimerdir. Genel biyomedikal uygulamalardaki işlevi incelenirse, 60-70 MPa'lık çekme dayanımı ve mekanik strese maruz kaldığında güvenli bir performans sergileyerek diş implantları ve protezler gibi uzun süreli kullanım gerektiren medikal ekipmanların üretiminde sıklıkla yer aldığı gözlemlenmektedir (Abhinav ve ark., 2025). PMMA, sınırlı esneme kapasitesine sahiptir; bu yüzden gerilim uygulandığında aşırı deformasyonu önleyebilir, farklı metallerle birleşerek sertlik değerini değiştirebilir. Özellikle sertlik ve kırılma dayanıklılıklarının önem kazandığı ortopedik cihazların tasarım ve üretiminde aşınma ve çizilmeleri azaltarak yüksek yüzey sertliği gösterebilmektedir (Ali ve ark., 2015). Giyilebilir BioMEMS'lerde üzerinde özellikle durulan ve önemli bir tasarım kriteri olan hafiflik, PMMA ile sağlanabilir. Düşük hidrofilik davranış sergiler ve biyodegradasyon kapasitesi düşüktür. Bu nitelikleri sayesinde uzun süre kullanım gerektiren cihazların/materyallerin üretiminde çok çalışılan bir malzeme olmaktadır. UV ışınlarına ve oksidasyona karşı yüksek dayanıklılık da göstermektedir. 105 °C cam geçiş sıcaklığına, ~166 °C nispeten yüksek erime noktasına ve 0,22 W/mK ısı iletkenlik değerlerine sahiptir (Abhinav ve ark., 2025). Elektriksel karakteri incelendiğinde ise, 1 MHz'deki 3,5' değerindeki dielektrik sabiti değeri ve 1×10^{-19} S/m değerindeki düşük elektriksel iletkenliği ile yüksek yalıtkan performans sergiler ve düşük elektriksel etkileşim gerektiren uygulamalarda bu özelliklerinden faydalanılabilir. Optik şeffaflık sağlayabilmesi ve yüksek optik geçirgenliği, PMMA tabanlı sistemlerde floresan veya absorpsiyon temelli optik analizlerin hassasiyetini gerektiren ve izlenebilen cihazların elde edilmesinde büyük avantaj sağlamaktadır.

3.2.5. Poliüretan (PU)

Poliüretan (PU), proteinlerdeki peptit bağlarına çok benzer yapısı ile tanınır ve bu sayede insan dokuları ile ilgili çalışmalarda oldukça popüler olan bir malzemedir. PU'nun yapısı incelendiğinde, yumuşak segmentler (oligomerik

poliollerden oluşur) ve sert segmentler (diizosiyanatlardan ve dioller veya diaminler gibi küçük molekül zincir genişleticilerden oluşur) dikkat çeker. Bu farklı yapısal durumu sayesinde özellikle kendi kendini iyileştirmeye yönelik biyomedikal çalışmalarda ve tıbbi ihtiyaçlarda ön plana çıkmaktadır (Cui ve ark., 2023). Olağanüstü esneme kabiliyetinin yanı sıra yüksek çekme mukavemeti değerine (18 MPa) de sahiptir. 3,6 ila 88,8 GPa değerleri arasında değişen Young modülü vardır (Abhinav ve ark., 2025). Kendi kendini iyileştirme yeteneği ise dinamik aromatik disülfür değişimi ve güçlü hidrojen bağıyla bağlantılı olup %60 oranında gerildikten sonra bile elektriksel iletkenliğini geri kazanabildiği raporlanmaktadır. -35 °C'lık cam geçiş sıcaklığı ve düşük termal iletkenliği ($0,19 \pm 0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) bulunmaktadır. Dahası biyolojik olarak parçalanabilen ve biyoyumlu nitelik taşıyan bir malzeme olan PU, in vivo çalışmalarda yer almaktadır (Zhang ve ark., 2019). Malzemenin kırılmadan %630'a kadar esneme kabiliyetiyle gösterilen yüksek mukavemeti ve esnekliği sayesinde hem dayanıklılık hem de esneklik gereken kardiyovasküler malzemelerin üretimlerinde mükemmel bir seçenek olmaktadır. PU'nun hem sert hem de elastomerik segmentler içeren yapı özelliği, onu mikroakışkan kanallar, esnek sensör platformları ve implant edilebilir bileşenler için ideal hâle getirir. Ayrıca kimyasal modifikasyona açıktır ve yüzeylerin hidrofilik/hidrofobik profillerinin oluşturulmasına ve bu sayede de hücre adezyonunun ve protein adsorpsiyonunun ayarlanabilir olmasına olanak sağlar. Fizikokimyasal özellikleri ve yapısı ile bir bütün olarak değerlendirildiğinde PU'nun, yüksek yırtılma direnci ve yorulmaya karşı dayanıklılığı ve kendi kendini iyileştirme yetenekleri sayesinde, uzun süreli kullanım gerektiren esnek sensörleri içeren giyilebilir teknoloji ve sağlık izleme alanındaki çalışmalara öncülük edeceği görülmektedir.

3.2.6. Polipirol (PPy)

Polipirol (PPy), iletkenliği ve biyoyumluluğu sayesinde giyilebilir BioMEMS cihazlarının tasarım ve üretiminde sıklıkla kullanılan malzemelerden biridir. Geri dönüşümlü redoks özelliğinden dolayı hızlı yük transferi gerektiren biyoelektronik uygulamalarında fazlaca kullanılmaktadır. Doku mühendisliği uygulamalarında iletken kaplama gerektiren BioMEMS cihaz deneme ve uygulamalarında PPy gerekmektedir (Liang ve ark., 2020). Kırılgan bir yapıya sahip olup kompozit olarak kullanıldığı araştırmalarda ise amaca yönelik kullanım sınırları azaltılabilir. İletkenliği ise yüzey aktif maddelerin ortama eklenmesi ile değiştirilebilir. Ek olarak 300 °C'ye kadar termal özelliklerini koruya-

bilir, yani termal kararlılığı fazladır (Abhinav ve ark., 2025). Bu durum, yüksek sıcaklık gerektiren çalışma ortamlarında malzemenin kullanımını mümkün kılmaktadır. Biyomedikal alanlardaki kullanımı ise genellikle, antibakteriyel özellik sergilemesine dayanan uygulamaları kapsamaktadır. Bu niteliği de ortama farklı katkı maddelerinin eklenmesi ve bu yolla elektrokimyasal ve optik özelliklerinin değiştirilmesi ile amaca uygun olacak şekilde farklılaştırılabilir, bu sayede giyilebilir BioMEMS cihazlar için kullanıma uygun forma sahip olur ve bu cihazlarının geliştirilmesinde kritik rol oynar.

3.2. Biyobozunur Polimerler

3.2.1. Polilaktik Asit (PLA)

Polilaktik asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan elde edilebildiğinden sürdürülebilirlik ve biyoyumumluluğun benzersiz bir kombinasyonunu sunarak tıp alanında dikkat çekici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Biyobazlı ve biyolojik olarak parçalanabilen bir alifatik polyester olarak bilinen bu malzeme (Jacobsen ve ark., 1999), modern tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojideki son gelişmelerle PLA üretimi ve işlenebilirliği geliştirilmiştir ve ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve elektrospinning gibi yeni yöntemlerle kullanıma uygun hale dönüştürülmüştür (Avinc ve ark., 2009). PLA, polistiren, polipropilen ve polietilen tereftalat gibi polimerlerle benzer özelliklere sahiptir; ancak uygulama alanları çeşitli endüstriyel alanları kapsamaktadır. Çevre dostu üretim yöntemlerine ve sürdürülebilir yaklaşıma uygunluğu ile bilinen bu malzeme, tıbbi cihazların konu alındığı çalışmalarda ön plana çıkmaktadır (Corneillie ve ark., 2015). PLA yapısal olarak incelendiğinde, poli- α -hidroksi asit ailesinin (bir tür doğrusal alifatik termoplastik polyester) bir üyesi olduğu anlaşılmaktadır. Polimerik yapısı, laktik asit (şekerlerin fermentasyonundan türetilen) monomerlerinin tekrarlayan ünitelerini içermekte olup PLA'nın temel monomeri, bir hidroksil grubu (-OH) ve bir karboksil grubu (-COOH) içeren laktik asittir (C₃H₆O₃) (Abhinav ve ark., 2025). Ester bağları içeren uzun bir zincir halinde tanımlanan laktik asit polimerizasyonu, laktik ara ürünlerini de kapsayan yoğunlaşma polimerizasyon tekniğine dayanmaktadır. Bu proseste, ester bağlarının oluşma sürecinde, monomerler bağlanırken su molekülleri de ortadan kaldırılır. PLA'nın biyomedikal cihazların yapımında aktif rol oynamasında onun hidrofobik özelliğinin ve gerekli sertliği sunan çok fonksiyonlu olmasının önemi büyüktür. Tıbbi cihazların tasarımında önemli parametreler olarak değerlendirilen; çekme dayanımı, sitotoksisite ve yeni-

den kristalleşme hızı gibi özellikler de PLA kullanımı ile sağlanabilmektedir (Ranakoti ve ark., 2022). Üstelik PLA, nano yapılar ile yeniden işlenebilir, filmler, iskeleler ve dikişler gibi çeşitli yapılarda kullanılabilir. PLA' nın insan vücudundaki biyokimyasal reaksiyonlara maruz kalması durumunda süreç, toksik ve tehlikeli olmayan laktik asit dönüşümü ile sonuçlandığından, PLA, insan vücudu ve fizyolojik sıvılarla ilgili araştırmalarda sıklıkla konu olmaktadır. Bu yaklaşıma bağlı olarak günümüzde kemik stentleri, kardiyovasküler malzemeler (stent, kalp kapakçığı gibi), ameliyatlarda kullanılan dikişler, ilaç salım sistemleri, yara iyileşme süreçleri gibi çalışmalarda PLA kullanımına odaklanılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise PLA' nın işlevselliğini geliştirmek için polietilen glikol (PEG), poliglikolik asit (PGA), poli-l-glikolik asit (PLGA), poli(3-hidroksibutirat-ko-3-hidroksivalerat) (PHBV) gibi polimerler ortama eklenebilmektedir. Örneğin PGA ile PLA birleşimi ile malzemelerin bozunma hızları istenilen düzeylerde değiştirilebilir; göz implantlarına yönelen çalışmalarda ise polivinilpirolidon (PVP) ve PLA'nın birleşimi ile ilaç salım sistemlerinde kullanılabilecek yeni malzemelerin elde edildiği gösterilmektedir (Bikiaris ve ark., 2023; Abhinav ve ark., 2025). Bu çalışmalara ek olarak PLA, doku mühendisliği ve doku iskelesi tasarımlarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca kontrollü ilaç salım sistemlerinde başarılı bir şekilde yer alması ile yara iyileşmesi çalışmalarında da kullanımı mümkün olmuştur. Ek olarak kemik iyileşme süreçlerindeki pozitif katkıları kanıtlandığından kırık veya hasarlı kemiklerin iyileşme süreçlerinde de güçlü bir destek sağlayan PLA bazlı vida ve plakaların da üretiminde yer almaktadır. PLA liflerinin gözlemlenen benzersiz biyouyumluluğu, onların giyilebilir cihazların üretiminde kullanılmasına yönelik çalışmalara avantaj sağlamaktadır.

3.2.2. Polikaprolakton (PCL)

Polikaprolakton (PCL), alifatik özelliklere sahip sentetik, biyolojik olarak parçalanabilir bir polyesterdir. Mekanik dayanımı ve biyo uyumlu davranış sergilediğinden özellikle ilaç salım çalışmalarında ön plana çıkmaktadır. Hidrofobik özelliğinden dolayı yavaş bozunur; bu özelliği ile de uzun süre dayanım gerektiren implante edilebilir cihazlar gibi materyallerin üretiminde yer alır ve uzun süreli mekanik stabilite sunar. Yavaş ve kontrol edilebilir biyobozunurluk profili ve üstün işlemeye uygunluğu sayesinde BioMEMS uygulamalarında sık tercih edilen bir poliestere türüdür. Benzersiz reolojik ve viskoelastik niteliklerinden ötürü doku mühendisliği çalışmalarında da ideal bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Mohamed ve ark., 2016; Abedalwafa ve ark., 2013). Fiziksel karakteri dolayısıyla doku mühendisliği uygulamalarında doku iskelelerinin iş-

lenmesi ve şekillendirilmesi aşamalarında PCL kolayca kullanılmaktadır. Düşük erime noktası değerine sahip olması da onun çeşitli işleme yöntemlerine uygun olduğu göstermektedir ki özellikle 3 boyutlu baskılama tekniğinde PCL kullanılarak doku iskelelerinin başarılı bir şekilde oluşturulabilir (Richert ve ark., 2021; Hegyesi ve ark., 2024). Özellikle kardiyovasküler problemler üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda kasılabilir dokularda yenilenmeye yardım ederek kalp fonksiyonunda iyileşme sağladığı raporlanmaktadır (Abhinav ve ark., 2025). Esnek yapısı sayesinde yaraların iyileşmesine yardımcı olmakla beraber cerrahi dikişlerle ilgili çalışmalarda da kullanımı mümkündür. Ek olarak bu materyalin yüzey pürüzlülüğü ve hidrofilik karakteri amaca yönelik ayarlanabildiğinden ilaç salım sistemleri gibi özellikle canlı dokularla etkileşim gerektiren çalışmalarda PCL, aktif olarak rol alır (Siddiqui ve ark., 2018). PCL, hekzanoat yapısı içerir ve %69'a kadar kristallik derecesine sahip yarı kristalin bir polimerdir. Birim hücresi ortorombiktir, $a = 7,496 \text{ Å}$, $b = 4,974 \text{ Å}$ ve $c = 17,297 \text{ Å}$ kafes sabitleri vardır, burada c lif eksenini temsil etmektedir. Kimyasal formülü $(C_6H_{10}O_2)_n$ olup kaprolakton monomer birimlerini içermektedir. Polimer zincirinin omurgasında ester bağının bir ögesi olan bir karbonil grubu ($C=O$) ile bir oksijen atomu bulunur. Kaprolakton monomerleri, halka açma polimerizasyonu yoluyla birbirine bağlanarak, her tekrar biriminin arasında ester bağları ($-COO-$) yer alan uzun polikaprolakton zincirlerini oluşturur (Abhinav ve ark., 2025). PCL' nin tüm bu özelliklerinin yanı sıra onu giyilebilir cihazların üretim aşamalarında etkili kılan durum, kendi kendini iyileştirme özelliği taşıyabilen çalışmalara da konu olabilmesidir. Bu özellik giyilebilir cihazların tasarımında önemli bir parametredir ve PCL içeren bazı çalışmalarda (kapasitif basınç sensörleri (Yan ve ark., 2024), radyasyon kalkanı malzemeleri (Giuliani ve ark., 2024), kendi kendini iyileştiren ısıtıcı (Choi ve ark., 2023) sağlanabilmektedir. Bu özellikleriyle PCL, hem yapısal stabilite hem de biyolojik entegrasyon gerektiren ileri biyomedikal mikrocihaz tasarımlarında stratejik bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

3.2.3. Polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA)

Polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA), biyouyumlu, toksik olmayan ve çok yönlü sentetik, biyolojik olarak parçalanabilir bir polimerdir. PLGA, poli(laktik asit) (PLA) ve poli(glikolik asit) (PGA) kopolimeridir ve akıllı polimer grubundan bir polimerik yapıdır (Kapoor ve ark., 2015). PLGA' nın içerdiği PLA/PGA oranı değiştirilebilir; bu sayede PLGA' nın bozunma hızı ve hidrofobik davranışı amaca yönelik ayarlanabilir. Bu duruma sıklıkla kontrollü ilaç salım çalışmalarında rastlanılır (Singh ve ark., 2021). Özellikle hücre büyümesini

ve yeni doku oluşumunu destekleyici davranışından dolayı ilaç salım mikrocihazları, mikrokapsüller, mikroigne sistemleri ve doku mühendisliği için mikroölçekli iskelelerin üretimi gibi doku mühendisliği uygulamalarında oldukça popülerdir (Bazgir ve ark., 2021). PLGA, zamanla kendi kendine iyileşen ameliyat dikişleri için, yara örtüleri ve pansuman malzemeleri için ve uzun süreli ilaç salım sistemlerinin üretimi için çok uygun bir materyal olarak değerlendirilmektedir. Bu alanlardaki çalışmalar ile yaralardaki enfeksiyon riski azalmakta, ameliyat sonrasında dikişlerin çıkarılmasındaki ağırlı süreçler giderilmekte ve sık enjeksiyon veya hap kullanımı gerektiren durumların seyri pozitif yönde değiştirilmektedir (Abhinav ve ark., 2025). PLGA' nın bir diğer önemli özelliği, esnekliğidir. Nano boyuttan makro yapılara kadar geniş bir boyut aralığında işlenebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca PLGA, çeşitli organik çözücülere cevap verebilir, bu sayede özellikle biyomedikal mühendisliği çalışmalarında farklı formülasyon denemelerine olanak sağlar. Suda biyolojik olarak parçalanabilir; yapısındaki PLA' nın metil yan gruplarından dolayı hidrofobik niteliği artar, bundan dolayı laktik asit içeriği yüksek form olan PLGA kopolimerinde yavaş bozunma görülür (Ko ve ark., 2021). Ek olarak PLGA' nın bozunma hızı ve oranı, onun cam geçiş sıcaklığı, nem oranı ve moleküler ağırlığı gibi diğer parametrelerine de bağlıdır. Bu özellikleri, PLGA'yı özellikle giyilebilir ve implante edilebilir BioMEMS sistemlerinde uzun süreli, programlanabilir ve güvenli biyolojik etkileşimlerin sağlanmasında stratejik bir malzeme hâline getirmektedir. Özellikle invaziv olmayan, uzun ve etkili destek sağlayabilen ve çevre dostu bir davranış sergileyen ve biyosensör ve terapötik ajanları birleştirebilen, kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri için çok önemli katkılar sağlayacağı öngörülmekte olup son yıllarda üzerinde fazlaca çalışılmaktadır.

3.2.4. Polihidroksibutirat (PHB) ve Polihidroksivalerat (PHV)

Polihidroksialkanoatlar (PHA'lar), çeşitli mikroorganizmalar tarafından üretilen, doğal olarak oluşan, biyolojik olarak parçalanabilen ve biyoyumlu bir polyester sınıfıdır. Bu polimerler, sürdürülebilir yaklaşım içeren endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bakterilerin hücre içi enerji depolama sürecinde görev almaktadırlar (Bugnicourt ve ark., 2014; Kulkarni ve ark., 2010). Polihidroksibutirat (PHB) ve Polihidroksivalerat (PHV), PHA grubunun en popüler olanlarından, yenilenebilir kaynaklardan üretilebilirler ve bu yönleri ile de geleneksel plastik yapılara alternatif olarak düşünülmektedirler ve endüstriyel alanda bir adım öne çıkmaktadırlar. Yapısal olarak PHB' ler, sert ve kristalin yapıdadır, biyobozundur. Kırılabilirlik değeri bazı uygulamalara uygun olmasa da kopolimeri olan PHV tercih edilen çalışmalarda daha esnek

yapıların elde edilebildiği raporlanmaktadır (Abhinav ve ark., 2025; Chen ve ark., 2002). PHB' nin her tekrarlayan biriminde $[-CH_2-CH(CH_3)-COO-]$ bulunmaktadır ki bu sayede karbonil grubunun ($C=O$) bir sonrakinin hidroksil grubuna ($-OH$) bağlanması ile ester bağı destekli ve sürekli olan bir polimer zinciri oluşur. PHV yapısında ise kopolimer yapısı olarak PHB'den 3-hidroksi-butirat ve valerik asitten ($C_5H_{10}O_2$) türetilen 3-hidroksivalerat karışımıza çıkar (Langford et la., 2019). PHV' nin kırılabilirliğinin PHB' ye kıyasla düşük olması ise valerat biriminin (C_5) polimer zincirine dahil edilmesiyle ilişkilendirilmektedir (Urbeliene ve ark., 2025). Bu polimerler her ne kadar çevreci ve sürdürülebilir üretim yöntemleri ile elde edilebiliyor olsa da üretim adımları geleneksel olan süreçlere göre daha karmaşık ve pahalı olmaktadır. Ancak benzersiz biyo uyumlulukları ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri onları özellikle biyomedikal uygulamalarda daha öne çıkarmaktadır. Öyle ki, *Ralstonia eutropha*, *Azotobacter* ve çeşitli *Bacillus* suşları gibi türler, glikoz, süktroz veya yağ asitleri gibi bol miktarda karbon açısından zengin substrat sağlandığında PHB ve PHV üretme yetenekleri tetiklenir, enerji depolama başlar ve PHB birikmeye başlar. Ancak bu tetiklemeyle ilgili birikim, azot veya fosfor sınırlı bulunduğu yani beslenmede stres oluşturulduğunda gerçekleşir. Her iki polimerin de biyolojik parçalanabilir özelliğinden dolayı biyomedikal alanında oldukça geniş uygulamaları bulunmaktadır. Özellikle kendiliğinden bozunma davranışları, onları çıkarılma gerektirmeyen cerrahi işlemlerde (ilaç taşıma sistemleri, doku mühendisliği uygulamaları, damar greftleri üretimi gibi) tercih edilebilir hale getirmektedir. Doku yenilenmesine yönelik çalışmalarda PHB' nin öne çıkması ise onun piezoelektrik özelliğine de bağlanmaktadır (Khan ve ark., 2024). PHB' nin kristal fazları (özellikle ortorombik α -fazı ve elektroaktif β -fazı), mekanik strese maruz kaldığında bu polimerin elektrik yükleri üretimini indükler. Bu sayede hücresel aktiviteyi uyarıcı etkiler gösterebilir ve doku yenilenmesinde etkili olan piezoelektrik iskelelerde aktif kullanılmasının yolunu açar. PHB, kristal yapısı ve nispeten yüksek modülü ile yapısal stabilite gerektiren mikrocihaz bileşenlerinde kullanılabilirken, PHV ilavesi malzemenin kırılabilirliğini azaltarak esnekliğini artırır ve sensör yüzeyleri ya da mikroakışkan kanal membranları gibi hareket veya deformasyona dayanıklı alanlarda avantaj sağlar. PHB/PHV kopolimerleri, kontrollü bozunma profilleri sayesinde özellikle implant edilebilir mikro cihazlarda ilaç salım modülleri, biyobozunur mikroaktüatörler ve geçici tanısal platformlar için avantaj sağlar. Ek olarak PHV ilavesi ile malzemelerin kırılabilirlik dereceleri değiştirilebilir ve malzemelerin deformasyona uzun süre maruz kalabilmelerini sağlar. Tüm bu özellikler ele alındığında PHB ve PHV içeren materyallerin üretimi, sürdürü-

lebilir üretim proseslerinde değerlendirilebilir, bu sayede de çevre dostu yeni nesil materyaller olarak giyilebilir sağlık ürünlerinin tasarımı, modellemesi ve üretimlerine büyük katkı sağlarlar.

3.2.5. Polidioksanon (PDO)

Polidioksanon (PDO), polidioksanon sütür (PDS) olarak da bilinir, biyolojik olarak parçalanabilen bir polimerdir. PDO, organometalik bir katalizör ve termal enerji varlığında p-dioksanonun halka açma polimerizasyonu yoluyla sentezlenir (Abhinav ve ark., 2025). Benzersiz mekanik özellikleri sayesinde yüksek elastikiyet gerektiren yumuşak doku rejenerasyonuna dayalı çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ek olarak -10 °C ile 0 °C arasındaki cam geçiş sıcaklığı sayesinde de düşük sıcaklıklarda kolaylıkla işlenebilmektedir. Ayrıca kristalinitesi %55 olarak belirtilmekte ve 110-115 °C' lik değerlerde erime sıcaklığına sahip olduğu bilinmektedir. Bu fiziksel karakteri sayesinde de üretimleri sırasında kendiliğinden depolimerizasyonları olmamaktadır (Goonoo ve ark., 2015). Bu materyal, şekil hafıza davranışı da sergilemektedir; bu özelliği ile kardiyovasküler alanındaki biyomalzeme çalışmalarında ön plana çıkmaktadır. Özellikle doku reaksiyonunun en az seviyelerde olmasına yardımcı olan antijenik ve pirojenik olmayan davranışlarından ötürü biyouyumluluğu ile biyomedikal mühendisliği uygulamalarında oldukça elverişli materyaller olarak kullanılmaktadır (Martins ve ark., 2020; Kumar ve ark., 2023). Biyobozunur olduğu bilinmekle birlikte bozunma süreci esnasında oluşan ürünlerin de metabolik olarak uyumlu olduğu, vücutta tamamen metabolize edildiği ve karbondioksit olarak vücuttan atıldığı da bilinmektedir. Ekstraselüler matrise benzer mekanik yapısal özelliği, düşük erime noktası, şişme kapasitesinin uygunluğu gibi özellikleri ile de doku mühendisliği uygulamalarını içeren giyilebilir sağlık ürünlerinin üretiminde kullanımı mümkün olmaktadır.

PDO'nun tıp alanındaki en yaygın kullanımlarından biri dikiş materyali olmasıdır. Hidroliz yoluyla kontrollü parçalanma profili sayesinde doku mühendisliğinde mikroçip, biyolojik bariyer modellere ve tasarımı, implant edilebilir sensörlerin tasarımı, geçici mekanik destek gerektiren mikro ölçekli cihazların üretimi gibi çeşitli uygulamalarda yer almaktadır (Saska ve ark., 2021). Kalıplama ve litografi gibi üretim teknikleri için uygun olmasından dolayı da hücre kültürü ve doku iskelesi modellemesi ve ilaç salım modüllerinin planlamasını kapsayan çalışmalarda tercih edilmektedirler.

3.3. Doğal Polimerler

3.3.1. Polisakkaritler

Polisakkaritler, 20'den başlayıp 60.000'e kadar çıkabilen sayıda monosakkarit biriminin birbirine bağlanmasıyla oluşan, karmaşık yapılı doğal polimerlerdir. Bu büyük moleküller hem yaşam süreçlerinin işleyişinde hem de doğal sistemlerde kritik görevler üstlenir. Polisakkarit kimyasının araştırılması; bu moleküllerin doğada nasıl bulunduğu, nasıl sınıflandırıldığı ve hangi yapısal bileşenlerden oluştuğu gibi çeşitli temel başlıkları içerir. Bu polimerlerin temel (birincil) yapısının belirlenmesi; spektroskopik analizler, kromatografik yöntemler ve enzimatik ayrıştırma teknikleri gibi farklı yapısal inceleme yöntemleriyle yapılmaktadır. Polisakkaritlerin değeri yalnızca biyolojik süreçlerde üstlendikleri görevlerle sınırlı olmayıp, tıp ve biyomedikal uygulamalarda da geniş bir kullanım alanına yayılmaktadır. İlaç taşınımında kullanılan sistemlerden yara iyileştirme uygulamalarına kadar birçok alanda önemli faydalar sağlarlar. Bu gibi uygulamalarda daha iyi performans elde edebilmek için polisakkaritlerin yapısal özelliklerinin değiştirilmesi gerekebilir (Harding ve ark., 2017; Maji ve ark., 2019). Bu amaçla, kimyasal, fiziksel veya biyolojik yöntemlerle çeşitli moleküler modifikasyonlar yapılabilir ve her yöntemin kendine has avantajları ile bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu grupta bulunan ve biyomedikal mühendisliği uygulamalarında ön plana çıkan bazı polisakkarit çeşitlerine örnek olarak Aljinat, Kitosan, Hiyaluronik asit ve Selüloz verilebilir (Abhinav ve ark., 2025). Bu doğal polisakkaritler, yüksek biyouyumluluk göstermeleri, toksik olmamaları ve modifikasyon işlemlerine yatkınlıkları ile bilinmekte ve bu sayede de hücresel yapılar içeren çalışmalara kolayca entegre edilebilmektedirler. Hücresel süreçlerle uyumlu davranış göstermeleri sayesinde giyilebilir sağlık teknolojileri ve nano-BioMEMS tabanlı platformlar için ideal yapı taşlarıdır. Aljinatın iyonik çapraz bağlanma kapasitesi, kitosanın antimikrobiyal özellikleri, hiyaluronik asidin su tutma ve doku yenilenmesini destekleme kabiliyeti ile selülozun mekanik dayanımı, giyilebilir sensörlerin ara yüzey tasarımlarında ve deriyle uzun süreli etkileşim gerektiren uygulamalarda kritik avantajlar sağlar. Tüm bu benzersiz niteliklerine ek olarak bu polisakkaritlerin kimyasal modifikasyon işlemlerine kolayca yanıt verebilmeleri, amaca yönelik değişikliklerin gerçekleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla akıllı ve tepkisel (stimuli-responsive) malzemelerin geliştirilmesi ve sentezinde bu polisakkaritlerin kullanımı ile hem çevre dostu yaklaşımlar korunabilmekte hem de giyilebilir BioMEMS sistemlerinde daha güvenli, esnek ve fonksiyonlu yüksek cihazlar üretilebilmektedir.

Aljinat, kitosan, selüloz türevleri, hiyalüronik asit ve dekstran gibi polisak-

karitler; mikroakışkan çiplerde hücre kültürü ortamlarının oluşturulmasından biyosensör yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesine, ilaç taşıma platformlarının tasarımından doku mühendisliği iskelelerinin üretimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler, yüksek nem tutma kapasitesine sahip olup hidrojel oluşturmaya oldukça yatkındırlar. Böylelikle doğal dokulara benzer yapıların elde edilmesine yönelik çalışmalara avantaj sağlarlar. Ek olarak yüzey yapıları, fonksiyonel yapıları ve çapraz bağlanma yetenekleri de kontrol edilebilir/değiştirilebilir, bu sayede giyilebilir cihazların üretiminde sıklıkla tercih edilirler. Bu cihazların üretim aşamalarında da biyosensörlerde seçici biyotanıma yüzeyleri oluşturmaları amacıyla kullanılmaktadırlar. İlaç salım sistemlerinde yer aldıklarında ise taşınan moleküllerin salım kinetiklerinin hassas biçimde ayarlanmasını mümkün kılmaktadırlar. Doğal ve biyobozunur olmaları, bu malzemeleri implant edilebilir, geçici veya tek kullanımlık giyilebilir BioMEMS cihazları için ideal bir seçenek haline getirmektedir.

Aljinat, kahverengi yosunlardan elde edilen iyonik çapraz bağlanabilir bir polisakkarit olup yumuşak, biyouyumlu ve kolay jelleşen yapısı sayesinde mikroakışkan sistemlerde hücre kapsülleme, sensör kaplamaları ve ilaç salım mikro depoları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Wang ve ark., 2023). Özellikle Ca^{2+} ile hızlı jel oluşturma kapasitesi, aljinatı BioMEMS için ideal bir hidrojel bileşeni haline getirir.

Kitosan, kitinin deasetilasyonu ile elde edilen katyonik bir biyopolimerdir. Antibakteriyel, biyobozunur ve mukoadhezif özelliklere sahip olup biyosensör yüzey fonksiyonelleştirme, elektrot modifikasyonu, mikro iğne kaplamaları ve kontrollü ilaç salım sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Kou ve ark., 2022). Ek olarak BioMEMS cihazlarında, elektriksel iletkenliği iyileştirilebilir olduğundan elektrokimyasal sensörler için önemli olmaktadır.

Selüloz ve selüloz türevleri, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal stabilite sunarlar. Selüloz temelli nanokristaller ve nanofibriller de bu kapsamda değerlendirilmekte olup esnek yapıları sayesinde giyilebilir sensörlerde, biyouyumlu mikroakışkan çiplerde ve biyoelektronik ara yüzlerde mekanik güçlendirici gibi yapıların elde edilmesinde kullanılırlar (Liu ve ark., 2024).

Hyalüronik Asit (HA), doğal olarak dokularda bulunan viskoelastik bir polisakkarittir (Salih ve ark., 2024). Yüksek su tutma kapasitesi, hücrelerle biyokimyasal uyumu ve kolay modifiye edilebilmesi sayesinde özellikle organ-on-chip sistemlerinde, yumuşak dokuları taklit eden mikro çevrelerde ve giyilebilir biyosensörlerde arayüz malzemesi olarak değerlendirilir (Chang ve ark., 2024).

3.3.2. Proteinler

Proteinler, temel doğal polimer türlerinden olup karmaşık moleküler yapıya sahiptir. Canlı organizmaların hücrelerinde, dokularında ve organlarında yapısal görevler üstlenir. Ek olarak bu yapıların işlevlerinin düzenlenmesinde de görevlidirler. Proteinin 3B benzersiz şeklini almasını sağlayan amino asit olarak bilinen küçük yapılardan oluşan ve peptit bağı içeren zincirlerden oluşurlar. Proteinlerin dört farklı yapısal sınıfı vardır: birincil yapısı, doğrusal bir amino asit zincirini içerirken ikincil yapısı alfa heliks ve beta tabakaları gibi yapılara polipeptit zincirinin katlanmasını kapsar. Üçüncül yapı, bir proteini oluşturan ikincil yapı elemanlarının —örneğin α -sarmalların ve β -tabakalarının— kendi aralarında belirli bir düzen içinde kıvrılması ve katlanmasıyla ortaya çıkan üç boyutlu bütünsel formu ifade eder. Bu yapı, proteinin biyolojik işlevini yerine getirebilmesi açısından kritik öneme sahiptir; çünkü aktif bölgelerin konumu, katlanma motifleri ve moleküler etkileşim yüzeyleri bu seviyede belirginleşir. Dördüncül yapı ise proteinin tek bir zincirle sınırlı olmadığı durumlarda ortaya çıkar; birden fazla polipeptit zincirinin (alt birim veya “subunit”) bir araya gelerek daha büyük, işlevsel bir kompleks oluşturmasını tanımlar (Kessel ve ark., 2018). Bu alt birimlerin birbirleriyle kurdukları düzenli etkileşimler, proteinin stabilitesini, özgülüğünü ve işlevsel kapasitesini doğrudan etkiler. Kolajen, jelatin, ipek fibrionları, prolin, fibrinojen gibi yapılar protein bazlı gruplarda çalışmalara en çok konu olan yapılar olarak örnek verilebilir. Kolajen, jelatin, ipek fibrionları, prolin ve fibrinojen gibi protein temelli biyomalzemeler hem biyoyuymumlulukları hem de doğal yapısal işlevleri nedeniyle biyoteknoloji ve giyilebilir sağlık sistemlerinde en sık araştırılan yapıların başında gelmektedir. Mekanik dayanıklılıkları ve elastik yapıları ile bu protein bazlı yapılar, özellikle giyilebilir BioMEMS platformlarının geliştirilmesinde önem taşımaktadır. Ayrıca hücrelerin tutunmasını destekleyen ve biyolojik sinyallere duyarlılık gösteren sistemlerin geliştirilmesinde de bu protein türevlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Protein mühendisliğinin gelişmesiyle birlikte bu moleküllerin modifiye edilmesi veya tamamen yeni protein dizilerinin tasarlanması, sensör yüzeylerinin daha seçici hâle getirilmesi, biyosensörlerin stabilitesinin yükseltilmesi ve deriyle uzun süreli etkileşime uygun biyohibrit tabakaların geliştirilmesi gibi olanaklar sunulmaktadır. Bu çalışmaların bir bütün olarak değerlendirilmesi ile de giyilebilir sağlık teknolojilerinin gelişimine yönelik yeni nesil malzeme tasarımlarında proteinlerin yeri ön plana çıkmaktadır.

Protein mühendisliği alanında son yıllarda dikkat çeken önemli bir eğilim, yalnızca mevcut doğal proteinleri değiştirmekten öteye geçerek tamamen yeni protein dizilerinin sıfırdan tasarlanmasına odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, “de

novo protein tasarımı” olarak da bilinir ve doğal proteinlerin yapısal çerçevesine bağlı kalmaksızın istenilen fonksiyonlara sahip yeni moleküller geliştirmeyi hedefler. Bu tasarım aşamaları oldukça karmaşık süreçleri barındırır; ayrıca hesaplamalı deneysel çalışmalara dayanmaktadır (Kortemme, 2024). Ancak bu süreçlerle birlikte ilaç salım sistemlerinin tasarımı, sentetik biyoloji dalındaki gelişmeler ve protein-ilâç etkileşimine dayanan problemlerin çözümü gibi birçok alanda oldukça farklı bakış açıları kazanılacağı kesindir. Dolayısıyla, doğal proteinlerde basit modifikasyonlarla elde edilemeyecek nitelikte yeni fonksiyonları keşfetme potansiyeli taşıdığı için bu yönelim, protein mühendisliği disipliniinde giderek daha fazla önem kazanan stratejik bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Protein mühendisliği alanındaki hızlı gelişmeler ve yaklaşımlar, proteinlerin modifikasyon yeteneklerinin incelenmesine bağlı kalmayıp yeni dizilerin tasarımı ve bu tasarımlarla dokuların etkileşimini inceleyen araştırmalara odaklanmaktadır. Bu farklı çalışmalarla kazanılan yeni bilgiler, giyilebilir sağlık teknolojileri ve nano-BioMEMS tabanlı platformlar ile birleştirilebilir. Böylelikle BioMEMS cihazları için vazgeçilmez olan seçici biyosensör yüzeyleri, hızlı yanıt veren algılayıcı sistemler ve uzun ömürlü biyohibrit bileşenler gibi geliştirilmesi faydalı olacak bileşenler için sistemlerin işlevselliğini artırıcı çalışmalar gerçekleştirilebilir. Böylece biyolojik prensiplerin ileri mühendislik çözümleriyle bütünleşmesi, kişiye özel sağlık takibi, gerçek zamanlı biyobelirteç analizi ve sürekli fizyolojik izleme gibi alanlarda giyilebilir teknolojilerin geleceğini şekillendirerek hem tıbbi uygulamalarda hem de günlük yaşamda daha etkili ve güvenilir çözümlerin önünü açmaktadır. Biyouyumlu yapıları ve hücrelerle doğal etkileşim kurabilme yetenekleri sayesinde protein bazlı yapılar, BioMEMS çalışmalarında sıkça yer almaktadır. Kolajen, jelatin, fibrin ve elastin gibi proteinler; doku mühendisliği iskeleleri, mikroakışkan hücre kültürü sistemleri, sensör yüzey kaplamaları ve ilâç salım mikrosistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Abhinav ve ark., 2025). Bu polimer yapılarda, hücre adezyonunu ve proliferasyonunu destekleyen doğal bağlanma bölgeleri bulunmaktadır, bu sayede mikro ölçek biyosensör tasarımı ve kaplamalarında tercih edilmektedirler. Ayrıca proteinlerin farklı alanlarda kullanımlarının yoluna açacak olan mekanik ve kimyasal özelliklerinin değişimi de çeşitli çapraz bağlayıcıların kullanılması ile mümkün olabilmektedir. BioMEMS ölçeğinde kolay işlenebilirlikleri ve biyolojik sinyallere duyarlılıkları sayesinde proteinler, gelecek nesil giyilebilir ve implant edilebilir sağlık teknolojilerinin tasarımında önemli bir yapı taşı olarak öne çıkmaktadır.

Kolajen, vücuttaki bağ dokuların temel yapısı olan proteindir. Doğal bozunabilmesi, benzersiz biyouyumluluğu ve hücre adezyonunda aktif yer alması

ile BioMEMS uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle mikroakışkan çiplerde hücre kültürü platformu olarak, deri benzeri biyosensörlerde biyomimetik ara yüz olarak ve doku mühendisliği iskelelerinde mekanik dayanımı artırıcı biyomalzeme olarak görev alır (Shenoy ve ark., 2022). Kolajenin doğal fibriller oluşturma kapasitesi, hücrelerin fizyolojik ortamda davranışlarını taklit eden 3B mikro çevrelerin tasarlanmasını kolaylaştırır (Kolliopoulos ve ark., 2024).

Jelatin, kolajenin hidrolizi ile elde edilmektedir. Düşük maliyetli üretim süreci ile birçok uygulamada yer almaktadır (Mikhailov, 2023). Üstelik işlenebilirliği yüksektir, sıcaklığa duyarlı polimerik yapıların sentezini kapsayan çalışmalarda kullanılması, BioMEMS cihazlarının üretim ve tasarım çalışmalarına katılmasını sağlamaktadır (Lukin ve ark., 2022). Mikrovalf membranları, ilaç salım mikro kapsülleri, yumuşak biyoelektronik kaplamalar ve geçici biyoadhezyon katmanları gibi çok sayıda uygulamada kullanılır.

İpek Fibroin, ipek böceği kozasından elde edilir. Yüksek mekanik dayanımı, optik açıklığı, gaz geçirgenliği ve biyouyumluluğu nedeniyle BioMEMS cihazlarında benzersiz avantajlar sunar (Zhang ve ark., 2022). Mikro imalat teknikleri ile kolayca şekillendirilebilmesi ve üstün mekanik özellikleri sayesinde Giyilebilir sensörlerde esnek dielektrik tabaka, biyosensörlerde immobilizasyon matrisi ve implant edilebilir mikroporde/dokular için dayanıklı bir biyokompozit bileşeni olarak yaygın olarak yer almaktadır. Ek olarak yavaş bozunma davranışı sayesinde uzun süreli biyomedikal uygulamalar için uygundur (Lujerdean ve ark., 2022).

Fibrinojen/Fibrin, fibrinojenin trombin ile fibrine dönüşmesi sonucu oluşan doğal ağ yapısı, hızlı jel oluşumu gerektiren mikroakışkan doku modelleri için oldukça idealdir. Fibrin hidrojel, hücre göçünü ve anjiyogenezi desteklediği için BioMEMS tabanlı organ-on-chip platformlarında gerçekçi mikroçevreler sağlar. Ek olarak kontrollü ve hedefe yönelik ilaç salım cihazlarında biyoçözünür taşıyıcı olarak görev alabilir (Sierra-Sánchez ve ark., 2025).

Tablo 1. Özelliklerine ve türlerine göre polimerlerin sınıflandırılması

Polimer	Tür	Temel Özellikler	BioMEMS Avantajları	Sınırlamalar / Dezavantajlar
PDMS	Sentetik	Esnek, optik şeffaflık, biy-ouyumlu	Mikroakışkanlar, yumuşak litografi	Hidrofobiklik, molekül Emilimi
Polimid (PI)	Sentetik	Yüksek termal/kimyasal kararlılık	Esnek elektronikler	İnce filmlerde kırılabilirlik
Parlyene C	Sentetik	Mükemmel bariyer özellikleri	Konformal (uyumlu) kaplamalar	Yavaş biriktirme süreci
PMMA	Sentetik	Sert, şeffaf	Optik BioMEMS	Düşük kimyasal direnç
PU (Poliüretan)	Sentetik	Elastik, dayanıklı	Giyilebilir sensörler	Hidrolytik bozunma (değişken)
PPy (Polipirrol)	Sentetik (İletken)	İletken, tepkisel (responsive)	Elektrokimyasal sensörler	Zayıf mekanik dayanım
PLA	Biyobozunur	Biyobozunur, iyi mukavemet	Geçici implantlar	Kırılgan yapı
PCL	Biyobozunur	Yavaş bozunma, esnek	Doku iskeleleri / Giyilebilirler	Düşük mukavemet
PLGA	Biyobozunur	Ayarlanabilir bozunma hızı	İlaç salınım sistemleri	Asidik bozunma ürünleri
PHB/PHV	Biyobozunur	Yüksek kristallik	Sürdürülebilir malzemeler	Kırılgan, işlenmesi zor
PDO	Biyobozunur	Elastik, emilebilir	Geçici cihazlar	Sınırlı mekanik sağlamlık

Polisakkaritler	Doğal	Hidrofilik, biyoaktif	Biyouyumlu kaplamalar	Zayıf mekanik özellikler
Proteinler	Doğal	Hücre etkileşimli, biyobozunur	Doku entegrasyonu	Parti (Batch) bazlı değişkenlik

SONUÇLAR

Nano-BioMEMS tabanlı giyilebilir platformlar, biyomedikal mühendisliği alanında hem tanı hem de tedavi süreçlerini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler, kişiselleştirilmiş sağlık takibi ve sürekli fizyolojik izleme açısından geleceğin klinik uygulamalarında merkezi bir rol oynayacaktır. Malzeme alanındaki önemli gelişmeler ile gerçek zamanlı ve sürekli veri sağlayabilen giyilebilir BioMEMS cihazların kullanımının yaygınlaşması, özellikle kişiselleştirilmiş sağlık hizmetlerinde büyük gelişmelere yol açacaktır. Bu alandaki çalışmalar, tamamen vücuda entegre edilebilir, biyolojik dönüşümleri ve değişiklikleri eş zamanlı olarak algılayabilen, otonom halde çalışabilen, verileri tanımlayabilen ve biyobozunur niteliklere sahip olabilen cihazların üretimine yönelmektedir. Kişiye özel ilaç salım sistemlerinin çip destekli üretimleri, implante edilebilir biyosensörlerden oluşan elektronik sistemleri, organların fonksiyonlarının takibini sağlayan biyoelektronik sistemleri, sinir bilim alanına hizmet edebilecek sinir arayüzleri gibi öncül çalışmaların başarı ile sonuçlanmasıyla giyilebilir sağlık teknolojileri alanında yeni bir çağa geçilebileceği öngörülmektedir. Bu yenilikçi yaklaşımlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde ise gelecekte herkese eşit düzeyde sağlık hizmeti sunabilecek, kapsayıcı ve hasta merkezli sağlık hizmetlerinin sağlanabilmesi hedeflenmektedir.

Yazar Katkıları

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanması sırasında dil geliştirme, dil bilgisi incelemesi ve görsel illüstrasyon için ChatGPT ve Gemini gibi yapay zekâ destekli platformlardan yararlandılar.

KAYNAKÇA

- Abedalwafa, M., Wang, F., Wang, L., & Li, C. (2013). Biodegradablepoly-epsilon caprolactone (PCL) for tissue engineering applications:A review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 34, 123–140.
- Abhinav, V., Basu, P., Verma, S. S., Verma, J., Das, A., Kumari, S., Yadav, P. R., & Kumar, V. (2025). Advancements in Wearable and Implantable BioMEMS Devices: Transforming Healthcare Through Technology. *Micromachines*, 16(5), 522. <https://doi.org/10.3390/mi16050522>.
- Alahi, M. E. E., Sukkuea, A., Tina, F. W., Nag, A., Kurdthongmee, W., Suwannarat, K., & Mukhopadhyay, S. C. (2023). Integration of IoT- enabled technologies and artificial intelligence (AI) for smart city scenario: recent advancements and future trends. *Sensors*, 23, 5206.
- Ali, U., Karim, K. J. B. A., & Buang, N. A. (2015). A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate) (PMMA). *Polym. Rev.*, 55, 678–705.
- Amjadi, M., Kyung, K. U., Park, I., & Sitti, M. (2016). Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review. *Adv. Funct. Mater.*, 26, 1678–1698.
- Assalve, G., Lunetti, P., Di Cagno, A., De Luca, E.W., Aldegheri, S., Zara, V., & Ferramosca, A. (2024). Advanced wearable devices for monitoring sweat biochemical markers in athletic performance: A comprehensive review. *Biosensors*, 14, 574.
- Avinc, O., & Khoddami, A. (2009). Overview of Poly (lacticacid) (PLA) Fibre. *Fibre Chem.*, 41, 391–401.
- Bazgir, M., Zhang, W., Zhang, X., Elies, J., Saeinasab, M., Coates, P., Youseffi, M., & Sefat, F. (2021). Degradation and characterisation of electrospun polycaprolactone (pcl) and poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) scaffolds for vascular tissue engineering. *Materials*, 14, 4773.
- Bikiaris, N. D., Koumentakou, I., Samiotaki, C., Meimaroglou, D., Varytimidou, D., Karatza, A., Kalantzis, Z., Roussou, M., Bikiaris, R. D., & Papageorgiou, G. Z. (2023). recent advances in the investigation of poly(lactic acid) (PLA) nanocomposites: incorporation of various nanofillers and their properties and applications. *Polymers*, 15, 1196.
- Brook, M. (2000). *Silicon in Organic, Organometallic and Polymer Chemistry*. John Wiley&Sons. Inc., New York, NY, USA.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential appli-

- cations in packaging. *Express Polym. Lett.*, 8, 791–808.
- Chang, W., Chen, L., & Chen, K. (2024). The bioengineering application of hyaluronic acid in tissue regeneration and repair. *Int. J. Biol. Macromol.*, 270, 132454.
- Chen, D., Chen, F., Hu, X., Zhang, H., Yin, X., & Zhou, Y. (2015). Thermal stability, mechanical and optical properties of novel addition cured PDMS composites with nano-silica sol and MQ silicone resin. *Compos. Sci. Technol.*, 117, 307–314.
- Chen, L. J., & Wang, M. (2002). Production and evaluation of biodegradable composites based on PHB–PHVcopolymer. *Biomaterials*, 23, 2631–2639.
- Choi, S. B., Meena, J. S., Joo, J., & Kim, J. W. (2023). Autonomous self-healing wearable flexible heaters enabled by innovative MX-ene/polycaprolactone composite fibrous networks and silver nanowires. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 6, 227.
- Corneillie, S., & Smet, M. (2015). PLA architectures: The role of branching. *Polym. Chem.*, 6, 850–867.
- Cui, M., Chai, Z., Lu, Y., Zhu, J., & Chen, J. (2023). Developments of polyurethane in biomedical applications: A review. *Resour. Chem. Mater.*, 2, 262–276.
- Eom, H., Lee, J., Pichitpajongkit, A., Amjadi, M., Jeong, J. H., Lee, E., Lee, J. Y., & Park, I. (2014). Ag@ Ni core–shell nanowire network for robust transparent electrodes against oxidation and sulfurization. *Small*, 10, 4171–4181.
- Erdem, A., Eksin, E., Senturk, H., Yildiz, E., & Maral, M. (2024). Recent developments in wearable biosensors for healthcare and biomedical applications. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 171, 117510.
- Fan, X., Jia, C., Yang, J., Li, G., Mao, H., Jin, Q., & Zhao, J. (2015). A microfluidic chip integrated with a high-density PDMS-based microfiltration membrane for rapid isolation and detection of circulating tumor cells. *Biosens. Bioelectron.*, 71, 380–386.
- Flynn, C. D., & Chang, D. (2024). Artificial Intelligence in Point-of-Care Biosensing: Challenges and Opportunities. *Diagnostics*, 14, 1100.
- Gholizadeh, S., Lincoln, D. M., Allahyari, Z., Widom, L. P., Carter, R. N., & Gaborski, T. R. (2023). Optimization of Parylene C and Parylene N thin films for use in cellular co-culture and tissue barrier models. *Sci. Rep.*, 13, 4262.
- Giuliani, C., De Stefano, I., Mancuso, M., Fiaschini, N., Hein, L.A., Mirabile Gattia, D., Scatena, E., Zenobi, E., Del Gaudio, C., & Galante, F., et al. (2024). Advanced electrospun composites based on polycaprolactone fibers loaded with micronized tungsten powders for radiation shielding. *Polymers*, 16, 2590.

- Goonoo, N., Jeetah, R., Bhaw-Luximon, A., & Jhurry, D. (2015). Polydioxanone-based bio-materials for tissue engineering and drug/gene delivery applications. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 97, 371–391.
- Harding, S. E., Tombs, M. P., Adams, G. G., Paulsen, B. S., Inngjerdingen, K. T., & Barsett, H. (2017). *An Introduction to Polysaccharide Biotechnology*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Hegyesi, N., Balogh-Weiser, D., & Pukánszky, B. (2024). Covalent immobilization of an enzyme on a layered silicate to catalyze the self-degradation of PCL. *Polym. Degrad. Stab.*, 229, 111003.
- Hiramoto, H. (1989). Photosensitive polyimides. *MRS Online Proc. Libr. (OPL)*, 167, 87.
- Ho, D., Quake, S. R., McCabe, E. R. B., Chng, W. J., Chow, E. K., Ding, X., Gelb, B. D., Ginsburg, G. S., Hassenstab, J., & Ho, C. M. et al. (2020). Enabling technologies for personalized and precision medicine. *Trends Biotechnol.*, 38, 497–518.
- Jacobsen, S., Fritz, H. G., Degée, P., Dubois, P., & Jérôme, R. (1999). Polylactide (PLA) A new way of production. *Polym. Eng. Sci.*, 39, 1311–1319.
- Johnston, I. D., McCluskey, D. K., Tan, C. K., & Tracey, M. C. (2014). Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering. *J. Micromech. Microeng.*, 24, 035017.
- Juárez-Moreno, J., Ávila-Ortega, A., Oliva, A., & Avilés, F. (2015). Cauich-Rodríguez, J. Effect of wettability and surface roughness on the adhesion properties of collagen on PDMS films treated by capacitively coupled oxygen plasma. *Appl. Surf. Sci.*, 349, 763–773.
- Kapoor, D. N., Bhatia, A., Kaur, R., Sharma, R., Kaur, G., & Dhawan, S. (2015). PL-GA: A unique polymer for drug delivery. *Ther. Deliv.*, 6, 41–58.
- Kassanos, P., & Hourdakis, E. (2025). Implantable Passive Sensors for Biomedical Applications. *Sensors*, 25, 133.
- Keskin, D., Mokabbar, T., Pei, Y., & Van Rijn, P. (2018). The relationship between bulk silicone and benzophenone-initiated hydrogel coating properties. *Polymers*, 10, 534.
- Kessel, A., & Ben-Tal, N. (2018). *Introduction to proteins: structure, function, and motion*. Chapman and Hall/CRC: Boca Raton, FL, USA.
- Khan, A., Joshi, R., Sharma, M. K., Huang, C. J., Yu, J. H., Wang, Y. L., & Lin, Z. H. (2024). The potential of organic piezoelectric materials for next-generation implantable biomedical devices. *Nano Trends*, 6, 100032.

- Kim, K. K., Hong, S., Cho, H. M., Lee, J., Suh, Y. D., Ham, J., & Ko, S.H. (2015). Highly sensitive and stretchable multidimensional strain sensor with prestained anisotropic metal nanowire percolation networks. *Nano Lett.*, 15, 5240–5247.
- Kim, D. S., Jeong, Y. J., Lee, B. K., Shanmugasundaram, A., & Lee, D. W. (2017). Piezoresistive sensor-integrated PDMS cantilever: A new class of device for measuring the drug-induced changes in the mechanical activity of cardiomyocytes. *Sens. Actuators B Chem.*, 240, 566–572.
- Ko, K. W., Choi, B., Kang, E. Y., Shin, S. W., Baek, S. W., & Han, D. K. (2021). The antagonistic effect of magnesium hydroxide particles on vascular endothelial activation induced by acidic PLGA degradation products. *Biomater. Sci.*, 9, 892–907.
- Kolliopoulos, V., & Harley, B. A. C. (2024). Mineralized collagen scaffolds for regenerative engineering applications. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 86, 103080.
- Kortemme, T. (2024). De novo protein design—From new structures to programmable functions. *Cell*, Volume 187, Issue 3, Pages 526-544, ISSN 0092-8674, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2023.12.028>.
- Kou, S., Peters, L., Mucalo, M. (2022). Chitosan: A review of molecular structure, bioactivities and interactions with the human body and micro-organisms. *Carbohydr. Polym.*, 282, 119132.
- Kulkarni, S. O., Kanekar, P. P., Nilegaonkar, S. S., Sarnaik, S. S., Jog, J. P. (2010). Production and characterization of a biodegradablepoly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHB-co-PHV) copolymer by moderately haloalkalitolerant *Halomonas campisalis* MCM B-1027 isolated from Lonar Lake, India. *Bioresour. Technol.*, 101, 9765–9771.
- Kumar, P., Kandasamy, G., Singh, J. P., & Maurya, P. K. (2023). *Oxides for medical applications*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- Kuo, W. C., Wu, T. C., Wu, C. F., & Wang, W.-C. (2021). Bioperformance analysis of parylene C coating for implanted nickel titanium alloy. *Mater. Today Commun.*, 27, 102306.
- Langford, A., Chan, C. M., Pratt, S., Garvey, C. J., & Laycock, B. (2019). Themorphology of crystallisation of PHBV/PHBVcopolymer blends. *Eur. Polym. J.*, 112, 104–119.
- Lecomte, A., Degache, A., Descamps, E., Dahan, L., & Bergaud, C. (2017). In vitro and in vivo biostability assessment of chronically-implanted Parylene C neural sensors. *Sens. Actuators B Chem.*, 251, 1001–1008.

- Liang, Y., Goh, J.C.-H. (2020). Polypyrrole-incorporated conducting constructs for tissue engineering applications: A review. *Bioelectricity*, 2, 101–119.
- Liu, Y., Yu, Q., Yang, L., & Cui, Y. (2023). Materials and biomedical applications of implantable electronic devices. *Adv. Mater. Technol.*, 8, 2200853.
- Liu, J., Lv, S., Mu, Y., Tong, J., Liu, L., He, T., Zeng, Q., & Wei, D. (2024). Applied research and recent advances in the development of flexible sensing hydrogels from cellulose: A review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 281, 136100.
- Lujerdean, C., Baci, G.-M., Cucu, A.-A., & Dezmirean, D.S., (2022). The contribution of silk fibroinin biomedical engineering. *Insects*,13, 286.
- Lukin, I., Erezuma, I., Maeso, L., Zarate, J., Desimone, M. F., & Al-Tel, T.H., Dolats-hahi-Pirouz, A., Orive, G. (2022). Progressin gelatin as biomaterial for tissue engineering. *Pharmaceutics*, 14, 1177.
- Maji, B. Maiti, S., Jana, S., Eds., (2019). Introduction to natural polysaccharides. in functional polysaccharides for biomedical applications, Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 1–31.
- Martins, J. A., Lach, A. A., Morris, H. L., Carr, A. J., & Mouthuy, P. (2020). A. Poly-dioxanone implants: A systematic review on safety and performance in patients. *J. Biomater. Appl.*, 34, 902–916.
- Menon, K., Joy, R.A., & Sood, N. et al. (2013). The applications of BioMEMS in diagnosis, cell biology, and therapy: A Review, *BioNanoSci.* 3, 356–366.
- Mikhailov, O.V. (2023). Gelatin as It Is: History and Modernity. *Int. J. Mol. Sci.*, 24, 3583.
- Mohamed, R.M., & Yusoh, K. (2016). A review on the recent research of polycaprolactone (PCL). *Adv. Mater. Res.*, 1134, 249–255.
- Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S.K., Singh,T., Sharma, S., Ilyas, R.A., & El Khatib, S. (2022). Critical reviewon polylactic acid: properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. *Materials*, 15, 4312.
- Redolfi Riva, E., D’Alessio, A., & Micera, S. (2022). Polysaccharide layer-by-layer coating for polyimide-based neural interfaces. *Micromachines*, 13, 692.
- Richert, A., & Da browska, G.B. (2021). Enzymatic degradation and biofilm formation during biodegradation of polylactide and polycapro- lactone polymers in various environments. *Int. J. Biol. Macromol.*, 176, 226–232.
- Salih, A.R.C., Farooqi, H.M.U., Amin, H., Karn, P.R., Meghani, N., & Nagendran, S. (2024). Hyaluronic acid: Comprehensive review of a multifunctional biopolymer. *Future J. Pharm. Sci.*, 10, 63.
- Sanjay, Kumar, V., & Vohra, A. (2024). Sensitivity enhancement using triple metal gate

- work function engineering of junctionless cylindrical gate all around SiNW MOSFET based biosensor for neutral biomolecule species detection for upcoming sub 14 nm technology node. *Mater. Sci. Eng. B*, 306, 117459.
- Sarhan, O. M., Gebril, M. I., Yahia, E.E.H., Ali, S. M., Abo-Ghazala, T. A. A., Ahmed, M. M., Adbul-Latif, M. S., & Moussa, Y. A., (2025). BIOMEMS for Therapeutics and sensing: advances in drug delivery, diagnostics, and microfluidics, *Mol. Pharmaceutics*, <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.5c00724>.
- Saska, S., Pilatti, L., Silva, E. S.d.S., Nagasawa, M.A., Câmara, D., Lizier, N., Finger, E., Dyszkiewicz Konwinska, M., Kempisty, B., & Tunchel, S. (2021). Poly-dioxanone-based membranes for bone regeneration. *Polymers*, 13, 1685.
- Selvaganapathy, P. R. (2008). 1.04-Polymers. In *Comprehensive Microsystems*; Gi-anchandani, Y.B., Tabata, O., Zappe, H., Eds.; Elsevier: Oxford, UK, pp. 75–105.
- Shenoy, M., Abdul, N. S., Qamar, Z., Al Bahri, B.M., Al Ghalayini, K.Z.K., Kakti, A., Murad, M., Fadul, M., Alamri, M.A.M., & Alqarni, M.A. (2022). Collagen structure, synthesis, and its applications: A systematic review. *Cureus*, 14, e24856.
- Sierra-Sánchez, Á., Sanabria-de-laTorre, R., Ubago-Rodríguez, A., Quiñones-Vico, M. I., Montero-Vilchez, T., Sánchez-Díaz, M., & Arias-Santiago, S. (2025). Blood plasma, fibrinogen or fibrin biomaterial for the manufacturing of skin tissue-engineered products and other dermatological treatments: a systematic review. *J. Funct. Biomater.*, 16, 79.
- Singh, S., Kumar, N., George, D., & Sen, A. (2015). Analytical modeling, simulations and experimental studies of a PZT actuated planar valveless PDMS micro-pump. *Sens. Actuators A Phys.*, 225, 81–94.
- Siddiqui, N., Asawa, S., Birru, B., Baadhe, R., & Rao, S. (2018). PCL-Based composite scaffold matrices for tissue engineering applications. *Mol. Biotechnol.*, 60, 506–532.
- Singh, S. & Singha, P. (2021). Effect of modifications in poly(lactide-co glycolide) (plga) on drug release and degradation characteristics: a mini review. *Curr. Drug Deliv.*, 18, 1378–1390.
- Sridhar, A.R., Cheung, J.W., Lampert, R., Silva, J.N.A., Gopinathannair, R., Sotomonte, J.C., Tarakji, K., Fellman, M., Chrispin, J., & Varma, N. (2024). State of the art of mobile health technologies use in clinical arrhythmia care. *Commun. Med.*, 4, 218.
- Tong, L., Zhou, W., Zhao, Y., Yu, X., Wang, H., & Chu, P.K. (2016). Enhanced cyto-compatibility and reduced genotoxicity of poly-dimethylsiloxane modified

- by plasma immersion ion implantation. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, 148, 139–146.
- Urbeliene, N., Gasparaviciute, R., Vaitekunas, J., Meškiene, R., Valantinaite, U., Kruopis, P., Gudiukaite, R., & Meškys, R. (2025). A screening method for polyester films-degrading microorganisms and enzymes. *J. Hazard. Mater.*, 487, 137177.
- Uscanga, F.A.R., Pierce, M.C., & Zahn, J.D. (2023). Fabrication and development of novel micromachined parylene-based electroactive membranes with embedded microfluidic architectures. *J. Micromech. Microeng.*, 33, 095010.
- Vo, D. K., & Trinh, K.T.L. (2024). Advances in wearable biosensors for healthcare: current trends, applications, and future perspectives. *Biosensors*, 14, 560.
- Wang, X., Gu, Y., Xiong, Z., Cui, Z., & Zhang, T. (2013). Silk-molded flexible, ultra-sensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals. *Adv. Mater. (Deerfield Beach Fla.)*, 26, 1336–1342.
- Wang, X., Hirschberg, A.W., Xu, H., Slingsby-Smith, Z., Lecomte, A., Scholten, K., Song, D., & Meng, E. (2020). A parylene neural probe array for multi-region deep brain recordings. *J. Microelectromechanical Syst.*, 29, 499–513.
- Wang, J., Liu, S., Huang, J., Ren, K., Zhu, Y., & Yang, S. (2023). Alginate: Microbial production, functionalization, and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242:3, 125048.
- Ware, T., Simon, D., Arreaga-Salas, D.E., Reeder, J., Rennaker, R., Keefer, E.W., & Voit, W. (2012). Fabrication of responsive, softening neural interfaces. *Adv. Funct. Mater.*, 22, 3470–3479.
- Welburn, L., Javadi, A. M. M., Nguyen, L., & Desai, S. (2025). Prospects and trends in biomedical microelectromechanical systems (mems) devices: A Review. *Biomolecules*, 15(6), 898.
- Wu, K.Y., Mina, M., Carbonneau, M., Marchand, M., & Tran, S.D. (2023). Advancements in wearable and implantable intraocular pressure biosensors for ophthalmology: a comprehensive review. *Micromachines*, 14, 1915.
- Xu, J., & Lee, H. (2020). Anti-biofouling strategies for long-term continuous use of implantable biosensors. *Chemosensors*, 8, 66.
- Yan, X., Wang, S., Nie, G., Gao, Y., Li, L., Zhang, T., Long, Y.-Z., & Han, W. (2024). The iontronic sensor based on biodegradable polycaprolactone for interfacial capacitive pressure sensing. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 35, 1093.
- Yang, X., Shu, J., Zhou, Z., & Liang, H. (2024). Polyimide as a biomedical material: advantages and applications. *Nanoscale Adv.*, 6, 4309–4324.

- Yin, Z., Yang, Y., Hu, C., Li, J., Qin, B., & Yang, X. (2024). Wearable respiratory sensors for health monitoring. *NPG Asia Mater.*, 16, 8.
- Zhang, S., Zhang, H., Yao, G., Liao, F., Gao, M., Huang, Z., Li, K., & Lin, Y. (2015). Highly stretchable, sensitive, and flexible strain sensors based on silver nanoparticles/carbon nanotubes composites. *J. Alloys Compd.*, 652, 48–54.
- Zhang, D., Liu, W., Wu, X.-D., He, X., Lin, X., Wang, H., Li, J., Jiang, J., & Huang, W. (2019). Efficacy of novel nano-hydroxyapatite/polyurethane composite scaffolds with silver phosphate particles in chronic osteomyelitis. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 30, 59.
- Zhang, H., Xu, D., Zhang, Y., Li, M., & Chai, R. (2022). Silk fibroin hydrogels for biomedical applications. *SmartMed.*, 1, e20220011.

11. BÖLÜM

TiO₂ NANO KATKILI İZOLATÖR YÜZEYİNİN DEŞARJ DAVRANIŞININ IPT TESTİ İLE İNCELENMESİ

Arş. Gör. Dr. Fatih ATALAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

fatih.atalar@iuc.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-0179-3108>

Prof. Dr. Aysel ERSOY

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

<https://orcid.org/0000-0003-1164-7187>

1. GİRİŞ

İzolasyon performansının niteliği ve niceliği, elektriğin kullanıldığı her türlü sistemde güç kalitesini doğrudan belirleyen temel unsurlardan biridir (Angalane & Kasinathan, 2022; Choudhary vd., 2022). Bir başka deyişle, bir elektrik tesisinde gerilim ne kadar doğru seviyede ve dalga formu ne kadar ideal olursa olsun, yalıtım sistemi zayıfsa bu durumun sürekliliğini sağlamak mümkün değildir (Angalane & Kasinathan, 2022; Choudhary vd., 2022). Özellikle orta ve yüksek gerilim seviyelerinde, yalıtım sisteminin tasarımı; seçilen malzemenin dielektrik özellikleri, malzeme kalınlığı, geometrisi, ortam koşulları ve montaj kalitesi gibi pek çok parametre, sistemin güvenilir çalışması ve arıza sıklığı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Domingos vd., 2025; Jin, 2025).

Elektrik mühendisliği disiplinde “zorlanma” veya “stres” olarak adlandı-

rılan parametreler; elektrik alan şiddeti, sıcaklık, mekanik gerilmeler, çevresel etkiler (nem, kimyasal kirlilik, radyasyon vb.) ve geçici aşırı gerilimler gibi girişimsel ve girişimsel olmayan pek çok etkiyi kapsamaktadır (Jin, 2025). Bu etkilerin her biri, yalıtkan malzemenin iç yapısında ve yüzeyinde mikro ölçekte bozulmalara neden olarak, zaman içinde malzemenin izolasyon direnci seviyesini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle kısmi deşarjlar, termal zorlanmalar ve tekrarlayan darbe gerilimleri; dielektrik malzemede geri dönüşü zor hasarlar oluşturmakta, dielektrik kayıpları artırmakta ve sonuç olarak arıza gerilimi (elektiriksel delinme) seviyesini düşürmektedir.

Bunlara ek olarak, işletme ömrü boyunca maruz kalınan yaşlanma (aging) etkisi de izolasyon sisteminin zayıflamasında kritik bir faktördür. Yaşlanma süreci; termal, elektiriksel, kimyasal ve mekanik zorlanmaların birleşik etkisi sonucu ortaya çıkmakta ve zamanla dielektrik malzemenin moleküler yapısında bozulmalara, çatlaklara, boşluklara ve iletken yolların oluşmasına yol açmaktadır (Choudhary vd., 2022; Jin, 2025). Önce yüzeyde başlayan bu bozulmalar, ilerleyen safhalarda malzemenin gövdesine (bulk bölgeye) doğru ilerlemektedir. Bunun sonucunda, yalıtkan malzeme hem yüzeyden hem de hacimsel olarak elektiriksel iletken köprüler oluşturmaya daha yatkın hâle gelmekte ve bu durum delinme (breakdown) riskini önemli ölçüde artırmaktadır.

Benzer mekanizmalar yalnızca katı izolasyon sistemlerinde değil, sıvı ve gaz yalıtkanlar için de geçerlidir (Kadim vd., 2021; Li vd., 2021). Sıvı ve gaz yalıtkanlarda doğrudan katı yüzeylerde görülen tipik yüzey deşarjları gözlenmesi de, bu ortamların katı malzemelerle temas ettiği bölgelerde, yani ara yüzey (interfacial zone) olarak adlandırılan kısımlarda dielektrik dayanımın görece düştüğü bilinmektedir (Rehman vd., 2025). Bu ara bölgelerde; alan yoğunlaşmaları, malzeme uyumsuzlukları, nem veya yabancı madde birikimleri ve geometrik düzensizlikler nedeniyle lokal zorlanmalar artmaktadır (Kadim vd., 2021; Rehman vd., 2025). Gerek katmanlı (kompozit) yalıtım sistemlerinde gerekse yekpare sıvı veya gaz dolu izolasyonlarda bu ara yüzeyler, sistemin en zayıf halkalarından biri hâline gelebilmektedir. Dolayısıyla yalnızca malzemenin kendisi değil, malzemeler arası geçiş bölgelerinin tasarımı ve kalitesi de izolasyon performansının ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir (Angalane & Kasinathan, 2022; Kadim vd., 2021; Rehman vd., 2025).

Elektriğin iletimi ve dağıtımında, üretim noktalarından son kullanıcıya kadar kullanılan her türlü elektirikli ekipmanda (transformatörler, kablolar, anahtarlar, elemanları, bara sistemleri, ölçü ve koruma ekipmanları vb.) yalıtım malzemesinin etkin ve güvenilir çalışması büyük önem taşımaktadır (Angalane & Kasinathan, 2022; Domingos vd., 2025). Son yıllarda bu alanda yapılan

bilimsel ve teknolojik çalışmalar sayesinde; yeni nesil yüksek performanslı dielektrik malzemeler, nano katkılı izolasyon sistemleri, çevre dostu gaz ve sıvı yalıtkanlar, gelişmiş üretim teknikleri ve durum izleme–diagnostik yöntemleri geliştirilmiştir (Kadim vd., 2021; Li vd., 2021; Rehman vd., 2025; Slama vd., 2020). Bu gelişmeler sayesinde hem güç kalitesinin iyileştirilmesi hem de arıza oranlarının ve bakım maliyetlerinin azaltılması yönünde önemli kazanımlar elde edilmiştir. Özetle, izolasyon performansının doğru yönetilmesi; yalnızca ekipmanın ömrünü uzatan bir unsur değil, aynı zamanda enerji verimliliği, güç kalitesi, sistem güvenilirliği ve işletme ekonomisi açısından da merkezi bir tasarım ve işletme kriteri olarak öne çıkmaktadır (Kadim vd., 2021; Rehman vd., 2025). Bu bölümde katı yalıtkanlardan olan organik polyeşter malzemenin TiO₂ (titanyum dioksit) nano parçacığıyla modifiye ile yüzey direncinin sonlu elemanlar yöntemleriyle değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu değerlendirmeden önce ise katı yalıtkanlardaki elektriksel deşarj süreci ve türleri geniş olarak anlatılmıştır.

2. YÜZEY DEŞARJI

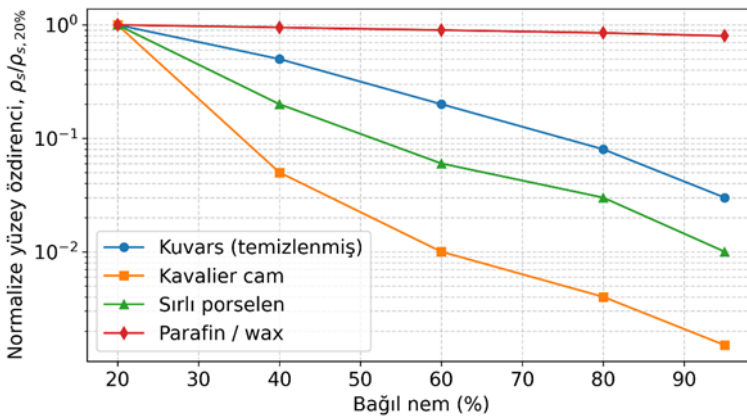
Elektrotlar arasında bulunan katı bir yüzey, gaz ortamı ile katı dielektrik arasındaki arayüzde elektrik alanın yoğunlaştığı bir “sızıntı yolu” oluşturur. Bu yolda gelişen kısmi deşarjlar, izlenme (tracking) ve nihayet yüzey atlaması (surface flashover), hem iç yalıtımda (epoksi reçineler, GIS iç izolatörleri, transformatör döküm reçineleri) hem de dış ortam yalıtımında (silikon izolatör gövdeleri, porselen zincirler) en kritik arızalardan biridir. Yüzey deşarjları, elektrik alanın uzun bir yolu katı yüzey boyunca takip ettiği krepaj (creeping) geometri nedeniyle, aynı gerilim seviyesi için hacimsel delinmeye göre daha düşük dayanım değerlerine inebilir. Özellikle nem, tuzlu kirlenme, ultraviyole ışınım, yüzey bozulması ve yaşlanma gibi çevresel etkiler, yüzey direncini ve yük birikimini değiştirerek bu deşarjların başlama ve ilerleme koşullarını belirler.

Bu kısımda önce yüzey kaçak akımı ve yüzey deşarjı arasındaki ilişki ele alınacak, ardından nem, sıcaklık ve ışık etkilerini klasik bir çalışma temelinde özetleyecek, sonrasında modern modelleme yaklaşımlarını, yüzey deşarjı ölçüm tekniklerini ve polimerik yalıtkanlarda yüzey dayanımını artırmaya yönelik çalışmalar incelenecektir.

3. YÜZEY ÖZDİRENCİ VE KAÇAK AKIMI

Klasik çalışmalarda katı dielektriklerin yüzeyinde iki elektrot arasında ölçülen kaçak akım, “yüzey özdirenci (surface resistivity)” kavramıyla tanımlanır. Özdirenç, elektrot geometrisine göre hesaplanan bir katsayıyla, ölçülen dirençten türetilir. Kuru, temiz bir kuvars ya da amber yüzeyinde, düşük bağıl nemlerde yüzey özdirencinin 10^{15} – 10^{16} Ω mertebelerinde olabildiği; nem arttıkça bazı malzemelerde 8–10 mertebe azaldığı gösterilmiştir (Qiao vd., 2022). Cam ve kuvars numunelerinde yapılan sistematik ölçümler, bağıl nem yaklaşık %30 seviyesinin üzerinde arttıkça yüzey direncinin keskin biçimde düştüğünü, %70’in üzerinde ise değişimin daha az belirgin hâle geldiğini göstermektedir. Bu davranış, yüzeye absorbe olan su tabakasının kalınlığı ve içindeki çözünmüş iyonların iletkenliği ile doğrudan ilişkilidir (Riba vd., 2023).

Waksı (parafin, ceresin vb.) malzemelerde ise su, yüzeye iyi ıslanmayan damlacıklar hâlinde biriktiği için süreksiz bir film oluşturur; bu nedenle nem değişimiyle yüzey kaçak direncinde gözlenen değişimler oldukça sınırlıdır. Bu ayırım, hidrofobik polimer yüzeylerinin nemli ortamlarda bile nispeten yüksek yüzey direncini koruyabilmesini açıklamada hâlâ geçerliliğini korumaktadır. Farklı malzemeler için bağıl neme karşı normalize yüzey özdirencindeki değişimin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Bu şekil, kuvars, cam ve porsele gibi malzemelerde nem artışıyla özdirencin hızla düştüğünü, buna karşılık hidrofobik wax benzeri yüzeylerde değişimin çok daha sınırlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 1. Farklı malzemelerde bağıl neme karşı normalize yüzey özdirenci (Qiao vd., 2022; Riba vd., 2023; Nazir vd., 2023).

3.1. YÜZEY KAÇAK AKIMI – DEŞARJ İLİŞKİSİ

Yüzey kaçak akımı ile yüzeydeşarjları arasında çift yönlü bir bağ vardır:

Çok düşük yüzey iletkenliği: Yüzeyde biriken yükler uzun süre dağılmadan kalır, özellikle DC ve yarı-DC gerilimlerde lokal alan yoğunlaşmaları sonrası yüzey boyunca kanal (streamer) gelişimine zemin hazırlar.

Orta seviyede kontrollü iletkenlik: Yüzeydeşarjlarının daha hızlı dağılmasına yardım ederek alan homojenliğini artırabilir, ancak bu durumdeşarjın karakterine (AC/DC, impuls, gaz basıncı) göre değişir.

Aşırı yüksek yüzey iletkenliği: Yüzey boyunca büyük kaçak akımlar ısınmaya, kuru bant (dry band) oluşumuna ve ark benzeri izlenmedeşarjlarına sebep olur; uzun vadede karbonize izler (tracking) ve malzeme kaybı oluşur.

Dolayısıyla yüzeydeşarjlarının mühendislik açısından yönetimi, yalnızca “yüzeyi mümkün olduğunca yalıtkan yapmak” değil, aynı zamanda yüzeydeşarj birikimini kontrol eden iletkenlik aralığını hedeflemek anlamına gelir.

4. YÜZEY DEŞARJ MEKANİZMALARI

4.1. Gaz Ortamında Sürünen Deşarj (Creeping Discharge) ve Flashover

Gaz ortamında, katı bir yalıtkanın yüzeyi boyunca meydana gelen elektrikseldeşarjlar birkaç temel aşamada gerçekleşir. İlk olarak, uygulanan yüksek gerilim altında özellikle elektrot–gaz–katı üçlü birleşim bölgesinde elektrik alan şiddeti yerel olarak çok yükselir ve gazda iyonizasyon başlar; bu bölgede başlangıç korona ya da kısmideşarjlar oluşur. Bu korona bölgesinden çıkan ve alan doğrultusunda ilerleyen yük taşıyıcıları, yalıtkan yüzeyi boyunca dallanmış ince kanallar meydana getirir; bu kanallar “streamer” olarak adlandırılır vedeşarjın yüzey boyunca yayılmasını sağlar.

Deşarj kanalları belirli bir kritik uzunluğa ve enerjiye ulaştığında, içlerinden daha iletken ve kararlı bir kanal gelişir; bu yapıya öncü kanal denir. Öncü kanal, yüzey boyunca karşı elektroda veya yüksek alan bölgesine kadar uzandığında, katı yalıtkan yüzeyi boyunca tam bir yüzey atlaması (flashover) oluşur ve ark akımı bu iletken yol üzerinden akar; böylece yalıtımın dayanım sınırı aşılmış olur.

Gaz ortamında yüzeydeşarjlarının ve elektriksel atlamaların (flashover) anlaşılması için eşdeğer devre modelleri, alan çözümleri ve streamer–öncü kanal

geçişine dayalı sayısal modeller kullanılmaktadır. Bu modeller; katı yüzey üzerindeki yük geçişi, yüzey iletkenliğini, gaz basıncını ve elektrik alan dağılımını birlikte dikkate alarak, belirli bir yapı için kritik yüzey atlama gerilimini öngörmeyi amaçlar (Slama vd., 2020).

4.2. Vakum Altında Yüzey Atlama Deşarjı

Vakum ortamında katı yalıtkan yüzeyinde elektriksel atlama, gaz boşluklarına göre farklı bir mekanizmaya sahiptir. Genel kabul gören açıklama, ikincil elektron yayını ve yüzey şarj birikimiyle tetiklenen bir ikincil elektron çığı sürecidir (Li, 2020). Vakumda elektrot kenarlarında emisyonla açığa çıkan elektronlar, yüzey boyunca ivmelenerek katı yüzeye çarpar, yeni elektronlar üretir ve yüzey boyunca bir “ikincil emisyon zinciri” oluşturur. Bu zincir, yüzeyde biriken yükler ve alan yoğunlaşması ile birleştiğinde, ani bir yüzey atlamasına yol açar.

Güncel çalışmalar, özellikle yüksek güçlü anahtarlama elemanlarında tekrarlayan mikro saniye darbeleri altında çalışan yüzey yalıtımının ömrüne (surface insulation lifetime, SIL) odaklanmaktadır. Örneğin sıkıştırılmış gaz ortamında (SF₆ ve kuru hava) uzun süreli darbe gerilimlerine maruz bırakılan dielektrik yüzeyler için, çalışma koşullarını temsil eden bir “iş katsayısı” parametresine bağlı SIL kestirimine imkân veren ampirik formüller önerilmiştir (Khan vd., 2020). Bu çalışmalar, çok sayıda darbe altında yüzey yolunun şekli, fotoemisyon ve termal etkilerin yüzey yalıtım dayanımı üzerinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır (Lin vd., 2021).

5. ÇEVRESEL ETKİLER

5.1. Nem ve Yüzey Su Filmi

Yüzey deşarjlarını anlamak için önce nemin yüzey direncine etkisini kavramak gerekir. Klasik ölçümler, temizlenmiş kuvars numunelerinde bağıl nem %90 civarına ulaştığında yüzey öz direncinin yaklaşık $10^{12} \Omega$ mertebesine düştüğünü; bu durumda su tabakasının kalınlığının $\sim 0,005 \mu\text{m}$ olduğu varsayıldığında, yüzey filmindeki suyun iletkenliğinin saf suya yakın değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Cam yüzeylerinde ise çözünen alkali tuzlar nedeniyle su filmindeki iletkenlik çok daha yüksektir; tipik olarak birkaç yüz $\Omega \cdot \text{cm}$

seviyesine inebilir (Li vd., 2024; Yang vd., 2024).

Amber ve benzeri çok az çözünen malzemelerde, kuvars örneğinde olduğu gibi temizlik işlemleri sonrasında nem miktarındaki artışla birlikte yüzey direncinde oldukça belirgin değişimler gözlenirken; wax türü malzemelerde (parafin vb.) su, temas açısının 90° 'nin üzerinde olması nedeniyle süreksiz damlacıklar hâlinde kalmakta ve nemin yüzey kaçak direncine etkisi oldukça sınırlı olmaktadır. Bu bulguların günümüzde polimerik yalıtkanlar için de geçerli olduğu bilinmektedir. Hidrofobik silikon kauçuk ve florlanmış epoksi yüzeylerinde su, sürekli bir film oluşturmaktan ziyade damlacıklar hâlinde birikerek yüzey atlaması riskini azaltırken; cam ve seramik gibi hidrofobik olmayan malzemelerde iletken bir film oluşturarak yüzeydeşarjlarının başlama gerilimini düşürmektedir (Zhang vd., 2021; Qiao vd., 2022).

5.2. Sıcaklık Etkisi

Aynı bağıl nemde sıcaklık değişiminin yüzey direncine etkisi, klasik deneylerde kuvars, cam, seramik ve polimer örnekleri için detaylı olarak incelenmiştir. Yüksek nem (%94) ve 25–31 °C arasında yapılan ölçümlerde, yüzey direncindeki değişim genellikle küçük kalmış; bazı numunelerde artış, bazılarında azalma gözlenmiştir (Nazir vd., 2023). Buna karşılık, hacimsel öz direncin sıcaklığa duyarlılığı çok daha yüksek olduğundan, sıcaklık değişimlerinin pratikte yüzey kaçak akımı üzerindeki etkisinin nem kadar önemli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Modern çalışmalar, dış ortam polimer izolatörlerde yüzeydeşarjlarının çoğunlukla nem, kirlenme ve elektrotermal etkilerin birleşimiyle tetiklendiğini; sıcaklığın ise daha çok yaşlanma hızını etkilediğini ve bu etkilerin uzun süreli işletim boyunca iz oluşumu (tracking) ve erozyon davranışı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Qiao vd., 2022; Riba vd., 2023;

5.3. Işık ve Uv Etkileri

Klasik deneylerde özellikle sert kauçuk ve bazı polimerlerin güneş ışığı ve UV'ye maruziyeti sonrası yüzey görünümünde ve yüzey direncinde zamanla belirgin değişimler gözlenmiştir. UV ışığı, görünür ışığa göre çok daha kısa sürede kimyasal değişimlere yol açarak yüzeyin hem optik hem de elektriksel özelliklerini değiştirebilir.

Güncel çalışmalar ise UV ışığının kontrollü kullanımının, epoksi yüzeyinde polar fonksiyonel grupların oluşumunu teşvik ederek derin tuzak yoğunluğunu artırabildiğini ve buna bağlı olarak vakum altında yüzey atlama gerilimini yaklaşık %20–25 oranında yükseltebildiğini ortaya koymaktadır (Li vd., 2024; Yang vd., 2024). Bu bulgular, UV ışınımının yalıtkan yüzeyler açısından yalnızca bir yaşlandırma etkisi oluşturmadığını, aynı zamanda dikkatli ve kontrollü şekilde uygulandığında performans artırıcı bir araç olarak da kullanılabileceğini göstermektedir.

6. MALZEME TÜRÜ ve YÜZEYSEL İZ İLİŞKİSİ

6.1. Cam, Seramik Ve Klasik Malzemeler

Cam, porselen ve kuvars gibi anorganik dielektrik malzemelerin yüzeyleri, özellikle nemli koşullarda üzerlerinde oluşan ince su filmleri nedeniyle yüzey deşarjlarına oldukça duyarlı hâle gelir. Bu su filmleri, yapılarında çözünmüş tuzlar ve yüzeye absorbanmış iyonik türler taşıdıkları için iyonik iletkenlik kazanır ve sonuçta yüzey boyunca sızıntı akımlarının ve yerel deşarjların oluşmasına zemin hazırlar. Klasik nem–direnç eğrileri, sert Kavalier camı üzerinde yapılan ölçümlerde, temizleme işleminden önce ve sonra elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir; yüzeydeki kir, çözünmüş iyonlar ve artık tabakaların uzaklaştırılması, su filmi ile cam yüzeyi arasındaki etkileşimi değiştirerek yüzey direncini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca çözünürlüğü düşük cam türlerinde, temizleme sonrasında nemin yüzey direnci üzerindeki etkisinin daha da belirgin hâle geldiği, yani nem içeriğindeki değişimlere karşı yüzey direncinin daha hassas tepki verdiği gözlenmektedir (Li 2020).

Bu nedenle modern yüksek gerilim tasarımında, dış ortamda çalışan porselen izolatörlerin yüzey profili ve glaze (sır) tabakasının kalitesi kritik tasarım parametreleri olarak ele alınmaktadır. Yüzeyin pürüzlülüğü, oluk yapısı, eğimleri ve glaze’in mikroyapısı; su filminin kalınlığını, sürekliliğini ve yüzey üzerinde nasıl dağıldığını doğrudan etkiler. Böylece hem potansiyel yüzey deşarj yolları kontrol altına alınmaya çalışılır hem de izolatörün nemli ve kirli ortam koşullarında yüksek yüzey direncini koruması hedeflenir. Bu tasarım yaklaşımları, yüzey flashover riskini azaltmak ve uzun dönemli yalıtım dayanımını güvence altına almak açısından büyük önem taşımaktadır.

6.2. Cam, Seramik ve Klasik Malzemeler

Polimerik yalıtkanlar (epoksi reçineler, silikon kauçuk, polietilen ve benzeri polimer matrisli malzemeler), hafiflikleri, hidrofobik yüzey özellikleri ve montaj kolaylıkları sayesinde özellikle yüksek gerilimli dış ortam izolatörlerinde geleneksel cam ve porselen malzemelerin yerini büyük ölçüde almaya başlamıştır. Ancak bu malzemeler, dış ortamda maruz kaldıkları kirlilik, nem, UV ışıınımı ve termomekanik gerilmeler nedeniyle zamanla yüzey özelliklerinde bozulmalar yaşayabilmektedir. Kirlilik ve nem altında yüzeyde oluşan sürekli veya yarı-sürekli su filmleri, iletken çözeltiler hâline gelerek sızıntı akımlarının akmasına neden olur. Bu sızıntı akımları, yüzeyin belirli bölgelerinde lokal ısınma oluşturur ve su filmindeki buharlaşma sonucunda, iletken çözeltinin kesintiye uğradığı sıcak kuru bölgeler (dry band) meydana gelir. Kuru bant bölgeleri, gerilimin yerel olarak yoğunlaştığı, dolayısıyla tekrarlayan arkdeşarjlarının oluştuğu kritik alanlardır. Zamanla bu arkdeşarjları, polimer zincirlerinin termal ve kimyasal bozulmasına, yüzeyin karbonize olmasına ve sonuçta karbonize iletken izlerin (tracking) oluşmasına yol açar; bu süreç aynı zamanda malzeme kaybına ve makroskopik erozyona neden olarak yalıtım dayanımını kalıcı biçimde düşürür (Choudhary vd., 2022).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, polimerik yalıtkanlarda iz oluşumu (tracking) dayanımının hem doğru şekilde ölçülmesi hem de malzeme ve tasarım düzeyinde iyileştirilmesi konularına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Örneğin, yüksek gerilimli polimerik yalıtkanlarda kullanılan mevcut eğik düzlem (inclined-plane) test yöntemlerini ayrıntılı biçimde değerlendiren ve bu bağlamda araştırma boşluklarını belirlemeyi amaçlayan bir çalışmada; standart test prosedürlerinin gerçek çalışma koşullarını ne ölçüde temsil ettiği, kullanılan elektrolit bileşimi, uygulanan gerilim seviyesi, test süresi ve numune geometrisi gibi parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde tartışılmaktadır. Söz konusu çalışma, farklı polimer sınıfları (örneğin epoksi, silikon, EPDM ve poliolefin türevleri) arasında izlenme dayanımı, yüzey ıslanabilirliği (hidrofobiklikten hidrofilliğe geçiş davranışı) ve seçilen test parametreleri arasındaki ilişkinin sistematik olarak incelenmesine odaklanmakta; böylece elektrikli araç içi dar aralıklı yalıtım yapıları için güvenilir tasarım kriterlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Riba vd., 2023).

Farklı katı yalıtkan sınıflarında karşılaşılan tipik yüzeydeşarj senaryoları ve bu sorunlara yönelik güncel iyileştirme yaklaşımları ise Tablo 1’de özetlenmiştir (Slama vd., 2020; Lin vd., 2021; Qiao vd., 2022; Riba vd., 2023; Nazir vd., 2023).

Tablo 1. Katı yalıtkan yüzeylerinde tipik deşarj mekanizmaları ve iyileştirme yaklaşımları

Malzeme / Uygulama	Yüzey Deşarj Senaryosu	Zorlanma Türü	Güncel İyileştirme Stratejileri
Cam / porselen dış izolatörler	Yüksek nem ve kirlenme altında krepaj deşarjlar ve yüzey atlaması	Yağmur, sis, UV, sıcaklık döngüleri	Yüzey profili optimizasyonu, glaze kalitesi, artan kaçak mesafesi, alternatif gaz ortamları (Slama vd., 2020; Lin vd., 2021; Qiao vd., 2022)
Epoksi iç izolatörler/ (GIS, transformatör vb.)	DC/AC altında yüzey yük birikimi, impuls altında yüzey atlaması	Gaz karışımı (SF ₆ , C ₄ F ₇ N/CO ₂), sıcaklık, kısmi deşarjlar	Nano-kompozitler, florlanmış yüzeyler, UV işlem, ara yüz mühendisliği, Pockels tabanlı yük karakterizasyonu (Li, 2020; Zhang vd., 2021; Li vd., 2024; Yang vd., 2024; Dong vd., 2024)
Silikon kauçuk dış izolatörler	Nem-kirlenme altında iz oluşumu (tracking) ve erozyon; tekrarlayan ark deşarjları	Tuzlu sis, asidik/alkali kirlenme, UV, ısı döngü	ATH ve nano katkısı, yüzey hidrofobikliği, iz/erozyon testleri, alev geciktirici sistemler (Qiao vd., 2022; Riba vd., 2023; Nazir vd., 2023)
Nano-katkılı epoksi kompozitler	Vakum veya gaz ortamında iyileştirilmiş yüzey flashover gerilimi	Yüksek elektrik alan, impuls gerilimler, DC gerilim altında yük birikimi	Al ₂ O ₃ , ZnO ve grafen bazlı nano-katkılar; florlama; UV işlemi; optimizasyon çalışmaları (Khan vd., 2020; Yang vd., 2024; Dong vd., 2024)

Başka bir derleme çalışmasında, yüksek gerilim dış ortam kompozit izolasyon sistemlerinde iz oluşumu (tracking), erozyon ve yanıcılık direncinin iyileştirilmesine yönelik dolgu ve katkı stratejileri kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Bu bağlamda; alüminyum trihidrat (ATH) gibi geleneksel alev dayanımı artırıcı dolguların, çeşitli nano katkıların (nano-silika, nano-alümina, kil türevleri vb.) ve farklı alev geciktirici katkıların polimer matris üzerindeki mikro yapısal ve elektriksel etkileri ayrıntılı olarak incelenmektedir. Derleme çalışması, bir yandan iz oluşumu ve erozyon direncini artırmak amacıyla yüzeyde karbonizasyonu azaltan, ısıyı dağıtan veya koruyucu bir tabaka oluşturan dolgu sistemlerinin tasarımını tartışırken; diğer yandan bu katkıların malzemenin yanma davranışı, mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerindeki olası olumsuz etkilerine de dikkat çekmektedir. Sonuç olarak, kısa boylu iz oluşumu ve erozyon oranı ile eş zamanlı olarak iyi bir yanma performansının (düşük yanıcılık, düşük duman yoğunluğu vb.) sağlanmasının malzeme tasarımı açısından önemli bir optimizasyon problemi olduğu vurgulanmakta; bu dengenin kurulabilmesi için çok bileşenli dolgu sistemlerine, nano kompozit yaklaşımlarına ve uygulamaya özgü test protokollerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir (Nazir vd., 2023).

Tüm bu bilgiler ışığında bu kitap bölümünde, saf organik polyester ile TiO_2 katkılı polyester malzemelerin IPT (Inclined Plane Test) sonrası yüzey durumları sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile karşılaştırılacaktır. Her iki malzeme grubu için de farklı test geçmişine sahip 5 adet numune hazırlanmış ve standart IPT koşullarında yüzeysel iz oluşumu davranışlarını ortaya çıkaracak şekilde gerilim ve iletken çözelti altında yaşlandırılmıştır. Test sonrasında elde edilen yüzey profilleri ve hasar bölgeleri, numune geometrisi ve elektrot konfigürasyonu ile birlikte FEM modeline aktarılacak; böylece yüzey bozulmasının yerel elektrik alan dağılımı üzerindeki etkisi nicel olarak incelenecektir. Saf polyester ve TiO_2 katkılı polyester için elde edilen alan dağılımları ve kritik gerilim bölgeleri karşılaştırılarak, nano katkılı sistemin yüzeysel yalıtım performansına katkısı değerlendirilmiştir.

7. YÖNTEM

Bu bölümde, saf polyester ve TiO_2 katkılı polyester izolatörlerin eğik düzlem testi (Inclined Plane Test, IPT) için hazırlama adımları anlatılmaktadır. Her iki tip numunenin yüksek gerilim testine kadar detaylı hazırlık süreci ele alınmıştır.

7.1. MALZEME SENTEZİ VE NUMUNE HAZIRLAMA

Çalışmada iki tip polyester kompozit numune kullanılmıştır:

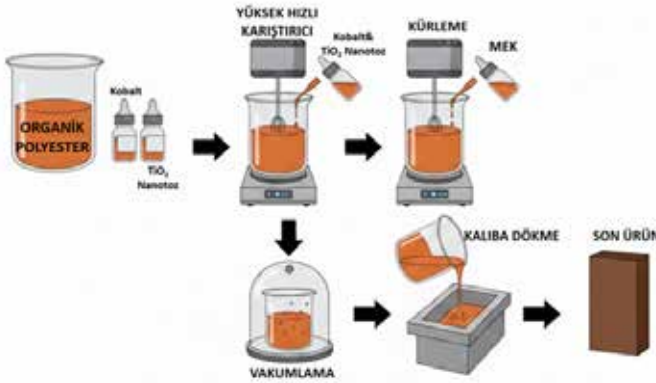
- (i) saf polyester ve
- (ii) %0,5 ağırlıkça TiO₂ nano katkı içeren polyester.

Numunelerin homojen ve tekrarlanabilir özelliklere sahip olması için imalat süreci adım adım kontrol edilmiştir:

Polimer matrisi olarak genel amaçlı bir organik polyester reçine kullanılmıştır. Oda sıcaklığında kürlenme reaksiyonunu başlatmak için reçineye %0.2 oranında kobalt oktoat (hızlandırıcı) eklenmiş ve karışım tekdüze hâle gelinceye kadar karıştırılmıştır.

TiO₂ katkılı numunelerde, nano parçacıklar reçineye %0.5 ağırlıkça oranında ilave edilmiştir. Parçacıkların toplanmasını önlemek ve matris içerisinde düzgün bir dağılım sağlamak için karışım yüksek devirli mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu homojenleştirme adımı, yüzeyel elektriksel davranışın numuneler arasında tutarlı olabilmesi açısından kritik önemdedir.

Son aşamada, polimerizasyonu başlatmak amacıyla sisteme %1 oranında metil etil keton peroksit (MEK) sertleştirici olarak eklenmiştir. Kısa süreli son bir karıştırmanın ardından karışım standart kalıplara (50x120x6mm) dökülmüş ve ortam sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Saf polyester numuneler aynı süreç izlenerek, sadece TiO₂ ilavesi yapılmadan hazırlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Numune hazırlama işlemi.

7.2. Eğik Düzlem (Inclined Plane) Testi

Saf ve TiO₂ katkılı polyester numunelerin yüzey izlenme (tracking) ve erozyon özellikleri, IEC 60587 standardına uygun bir eğik düzlem test düzeneği

kullanılarak değerlendirilmiştir. Numuneler 45° açı yapacak şekilde düzeneğe yerleştirilmiştir. Her bir numunenin elektrotları arasına test süresi boyunca 4.5 kV (RMS) büyüklüğünde sabit bir AC gerilim uygulanmıştır (IEC, 2007). Bu gerilim seviyesinin, iletken çözelti varlığında yüzey deşarjlarının oluşması ve yüzey izlenme sürecinin başlayıp ilerlemesi için yeterli olduğu bilinmektedir (Şekil 3).

Belirlenen test süresinin sonunda numuneler temizlenip kurutulmuş, ardından yüzeyler çıplak gözle ve/veya optik büyütme altında ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Her numune için maksimum iz uzunluğu, iz genişliği ve erozyona uğramış bölgenin genel morfolojisi kaydedilmiş; aynı tip malzemeden hazırlanan 5 numune üzerinde yapılan ölçümler karşılaştırılarak saf polyester ile TiO₂ katkılı polyesterin yüzey dayanımları değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Yüzey Deşarjı için Eğik Düzlem Test Düzeneği.

7.3. Elektrostatik Analiz

Bu çalışma, bir yalıtkan yüzey (polyester) üzerinde bulunan iletken bir iz (karbon iz) boyunca oluşan elektrik alan şiddeti dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz, Maxwell denklemlerinin düşük frekanslı elektrik alan problemleri için sadeleştirilmiş hâline dayanmaktadır. Uygulanan gerilimin frekansı $f=50$ Hz gibi düşük bir değerde olduğundan, elektromanyetik dalga yayılımı ve manyetik alan etkileri ihmal edilebilir. Bu varsayım altında sistem, yalnızca iletim akımı ve yer değiştirme (kapasitif) akımı ile tanımlanır ve problem elektrostatik ile AC frekans alanı yaklaşımı çerçevesinde ele alınır.

Elektrik potansiyeli dağılımı, Gauss yasasının diferansiyel formundan türetilen Poisson denklemi ile ifade edilmektedir. Heterojen dielektrik yapıya sahip

ortamlar için bu denklem aşağıdaki şekilde yazılmaktadır (Cardoso, 2016):

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) = -\rho$$

Burada $\nabla \cdot$ diverjans operatörünü, ϵ_0 vakum dielektrik sabitini ve ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabitini temsil eder. Vakum dielektrik sabiti sayısal olarak, $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}$ “F/m” şeklindedir. Bağıl dielektrik sabiti, malzemeye bağlı olarak büyük değişim göstermekte olup polyeater için yaklaşık $\epsilon_r \approx 3.2$ değerini alır. Ancak karbon esaslı iletken iz için bu değer yaklaşık olarak $\epsilon_r \approx 1000$ mertebesinde. Denklemden yer alan V elektrik potansiyelini (Volt), ρ ise uzay yük yoğunluğunu ifade eder. Yüzey kaçak yolu analizlerinde genellikle serbest uzay yüklerinin ihmal edilebilir olduğu varsayılır ve bu nedenle $\rho = 0$ kabulü yapılır. Bu durumda Poisson denklemi, potansiyel dağılımını yalnızca malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlı olarak belirler. Elektrik alan şiddeti, elektrik potansiyelinin uzaysal değişiminin bir sonucudur ve potansiyelin negatif gradyanı ($E = -\nabla V$) olarak tanımlanmaktadır (ANSYS, 2025). Elektrik alanın birimi V/m olup, iletken iz üzerindeki gerilim stresinin doğrudan bir göstergesidir. Özellikle geometrik olarak keskin uçlara, dar boğazlara veya fraktal benzeri yapılara sahip bölgelerde, alan çizgilerinin yoğunlaşması nedeniyle elektrik alan şiddeti önemli ölçüde artar. Bu durum literatürde “uç etkisi” olarak bilinir ve yüzeyden ark yapma ve kısmi deşarj oluşumu açısından kritik öneme sahiptir.

Zamana bağlı alternatif gerilim uygulandığında, ortamda hem iletim akımı hem de kapasitif akım oluşur. Frekans alanı yaklaşımında, tüm alan ve akım büyüklükleri kompleks fazörler ile temsil edilir. Bu bağlamda elektrik alan, akım yoğunluğu ve potansiyel aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$(E, J, V) \rightarrow (\tilde{E}, \tilde{J}, \tilde{V})$$

Frekans alanında akım yoğunluğu ile elektrik alan arasındaki ilişki, Ohm yasasının AC formu kullanılarak tanımlanır:

$$\tilde{J} = \sigma^* \tilde{E}$$

Buradaki σ^* büyüklüğü, kompleks iletkenlik olarak adlandırılır ve hem iletim hem de yer değiştirme akımını kapsar. Kompleks iletkenlik şu şekilde tanımlanır:

$$\sigma^* = \sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r$$

Bu ifadede σ DC elektriksel iletkenliği, ω açısal frekansı ve j sanal birimi temsil eder. Karbon iz için iletkenlik yaklaşık olarak $\sigma \approx 10^4$ “S/m” mertebesindeyken, polyeater gibi yalıtkan malzemelerde bu değer oldukça düşüktür ($\sigma \approx 10^{-14}$ “S/m”). Analizde uygulanan alternatif gerilim, tepe değeri V_{pe}

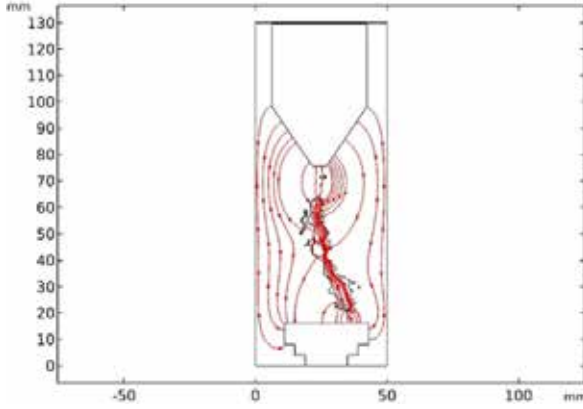
ak=4500 V olan bir AC gerilimdir. Frekans alanı analizinde bu gerilim fazör olarak;

$$(V_{\text{HV}}) = V_{\text{peak}} e^{j0^\circ} = 4500 \text{ "V"}$$

şeklinde tanımlanır. Eğer zaman bağımlı analiz tercih edilirse, potansiyelin zamana bağlı ifadesi $V(t) = V_{\text{peak}} \sin(\omega t)$ şeklinde tanımlanır. Sonuç olarak bu analiz, iletkenlik σ ve bağıl dielektrik sabiti ϵ_r arasındaki çok büyük farktan yararlanarak, 4500 Vpeak AC gerilim altında karbon iz boyunca oluşan maksimum elektrik alan şiddetini E_{max} olarak hesaplamayı amaçlamaktadır. Elde edilen bu maksimum elektrik alan değeri, malzemenin yüzeyden ark yapma ve iz oluşumu (tracking) eğilimini belirleyen en kritik parametrelerden biridir (Zhang, J, 2022).

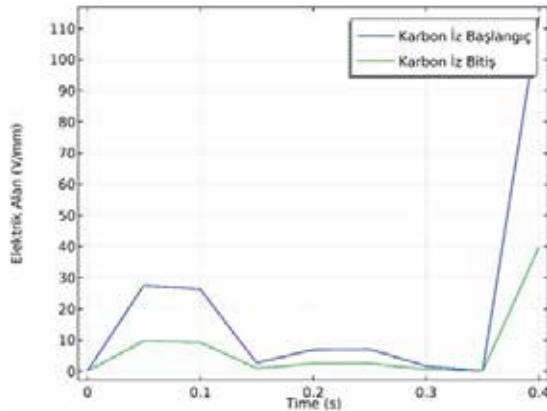
8. BULGULAR

Bu bölümde, IEC 60587 standardına uygun eğik düzlem deneyleri sonucunda elde edilen karbonize yüzey izleri, sayısal görüntü işleme ile belirlenmiş ve bu iz geometrileri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı elektrik alan ve potansiyel dağılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te saf polyester numune için elde edilen elektrik alan çizgileri ve karbonize iz geometrisinin birlikte gösterimi sunulmaktadır. Bu şekilde, elektrik alan çizgilerinin özellikle üst elektrot ucunda yoğunlaştığı ve karbonize iz başlangıç noktasında belirgin bir alan yığılması olduğu görülmektedir. FEM sonuçlarına göre, karbon izinin başlangıç bölgesinde elektrik alan şiddeti yaklaşık 110–120 V/mm seviyelerine ulaşırken, iz boyunca aşağı doğru ilerledikçe alan şiddetinin kademeli olarak azaldığı belirlenmiştir. Karbon izinin alt elektrota yakın bölgelerinde ise alan şiddeti 30–40 V/mm aralığına düşmektedir. Bu durum, yüzey izinin ilerlemesinin ilk aşamalarında elektrik alan tarafından kuvvetle yönlendirildiğini, ilerleyen aşamalarda ise iz geometrisinin alan dağılımını yeniden şekillendirdiğini göstermektedir.



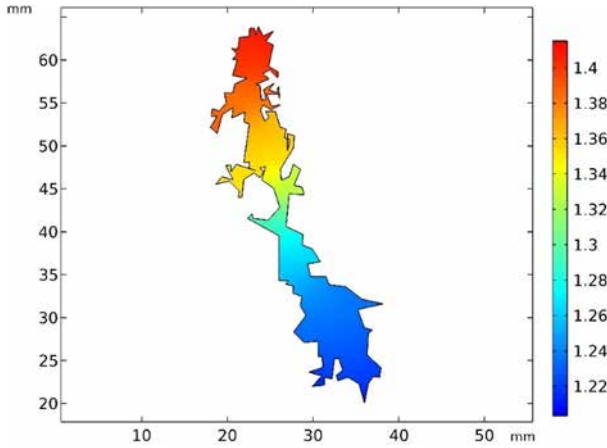
Şekil 4. Saf polyester numune için FEM ile elde edilen elektrik alan çizgileri ve karbonize yüzey izi.

Şekil 5’te saf numune için karbon iz başlangıcı ve bitiş noktalarında zamana bağlı elektrik alan değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde, $t = 0$ ile $t = 0.1$ s aralığında karbon izinin başlangıç noktasında elektrik alan şiddetinin yaklaşık 25–28 V/mm seviyelerinde seyrettiği, bitiş noktasında ise 10 V/mm civarında olduğu görülmektedir. $t = 0.15$ s ile $t = 0.35$ s aralığında alan şiddeti her iki noktada da düşük seviyelerde (5–10 V/mm) kalmıştır. Ancak simülasyonun son adımı olan $t = 0.4$ s anında, karbon izinin başlangıç noktasında elektrik alan şiddetinde ani ve keskin bir artış meydana gelmiş ve değer 110–115 V/mm seviyesine, bitiş noktasında ise 40 V/mm seviyesine yükselmiştir. Bu ani yükseliş, izin ilerlemesiyle birlikte elektriksel stresin aniden kritik bir eşiğe ulaştığını göstermektedir.



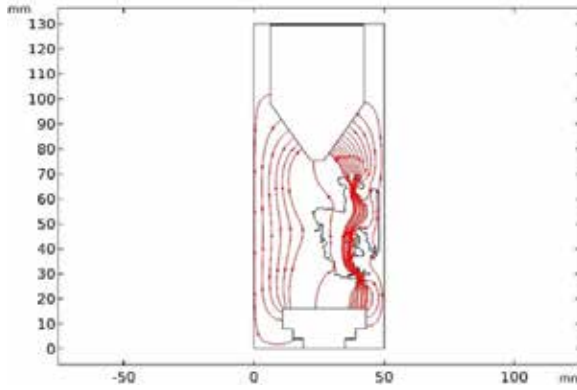
Şekil 5. Saf polyester numunede karbon izinin başlangıç ve bitiş noktalarındaki zamana bağlı elektrik alan değişimi.

Şekil 6’da saf polyester numune için potansiyel dağılımı gösterilmektedir. Potansiyel haritası, karbon izinin üst bölgelerinde yaklaşık 1.40–1.45 kV mertebesinde potansiyel fark değerleri alırken, alt bölgelere doğru bu değerin 1.20–1.25 kV seviyelerine düştüğünü ortaya koymaktadır. Potansiyel gradyanının en yüksek olduğu bölgeler, aynı zamanda karbon izinin en düzensiz ve dallanmış yapıya sahip olduğu alanlar ile örtüşmektedir. Bu durum, yüzey izinin geometrik karmaşıklığının elektriksel stres dağılımını doğrudan etkilediğini göstermektedir.



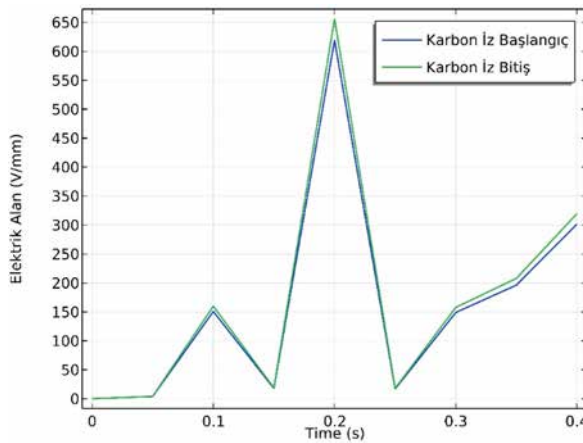
Şekil 6. Saf polyester numunede karbonize yüzey izi boyunca elektrik potansiyel dağılımı.

TiO₂ katkılı polyester numunelere ait FEM sonuçları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da sunulmuştur. Şekil 7’de TiO₂ katkılı numune için elektrik alan çizgileri incelendiğinde, alan çizgilerinin saf numuneye kıyasla daha homojen dağıldığı ve karbonize iz çevresinde daha az keskin yoğunlaşmalar oluşturduğu görülmektedir. Özellikle üst elektrot çevresinde maksimum elektrik alan değerleri saf numunede gözlenen değerlere kıyasla daha düşük olup, yaklaşık 90–100 V/mm aralığında kalmıştır. Bu durum, TiO₂ katkısının dielektrik matris içerisinde alan dağılımını düzenleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

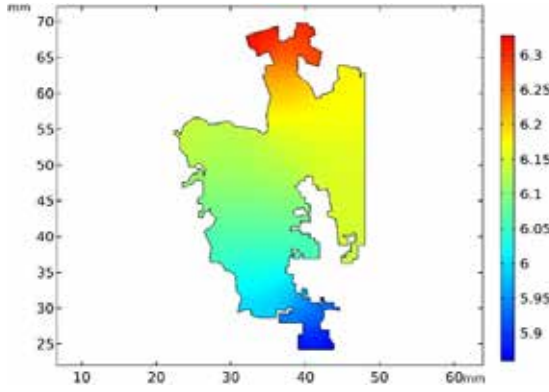


Şekil 7. TiO₂ katkılı polyester numune için FEM ile elde edilen elektrik alan çizgileri ve karbonize yüzey izi.

Şekil 8’de TiO₂ katkılı numune için karbon iz başlangıç ve bitiş noktalarındaki elektrik alanın zamana bağlı değişimi verilmiştir. Grafiklerden elde edilen nümerik sonuçlar, $t = 0.2$ s anında sistemde çok yüksek bir anlık alan stresi oluştuğunu, başlangıç ve bitiş noktalarındaki elektrik alan değerlerinin 600–650 V/mm seviyelerine pik yaptığını göstermektedir. Ancak bu pik değer in ardından alan şiddeti hızla düşüşe geçmiş, $t = 0.25$ s anında 25 V/mm seviyelerine inmiştir. Süreç sonunda alan şiddeti tekrar artış eğilimine girerek 300–320 V/mm bandına ulaşmıştır. Bu dalgalı yapı, nano katkılı malzemenin yüksek stres anlarına anlık direnç gösterdiğini ve yük dağılımını hızla değiştirebildiğini düşündürmektedir.



Şekil 8. TiO₂ katkılı polyester numunede karbon izinin başlangıç ve bitiş noktalarındaki zamana bağlı elektrik alan değişimi.



Şekil 9. TiO_2 katkılı polyester numune karbonize yüzey izi boyunca elektrik potansiyel dağılımı.

Şekil 9’da TiO_2 katkılı numune için potansiyel dağılımı sunulmaktadır. Potansiyel değerlerinin karbon izinin üst bölgelerinde yaklaşık 6.30–6.35 kV, alt bölgelerinde ise 5.90–6.00 kV seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Saf numuneyle kıyasla potansiyel farklarının daha düzgün dağıldığı ve ani potansiyel sıçramalarının azaldığı görülmektedir. Bu durum, TiO_2 nano parçacıklarının yüzey boyunca potansiyel gradientlerini yumuşatarak karbonize yolun düzensiz ilerlemesini sınırlandırdığını göstermektedir.

SONUÇ

Bu kitap bölümünde, saf polyester ve TiO_2 katkılı polyester yalıtkanların eğik düzlem testi (IPT) sonrasında oluşan karbonize yüzey izleri, deneysel gözlemlerle birlikte sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Deneysel ölçümler ve FEM tabanlı elektrik alan–potansiyel dağılım sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, malzeme bileşiminin yüzey izlenme davranışı ve elektriksel stres dağılımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı açıkça ortaya konmuştur. Saf polyester numunelerin IPT testine karşı dayanma sürelerinin 2 dakika 10 saniye ile 12 dakika 27 saniye arasında değiştiği belirlenmiştir. En uzun süre dayanım gösteren saf polyester numune dahi yaklaşık 12.45 dakika sonunda yüzey boyunca belirgin bir karbonize iz oluşturarak testten kalmıştır. Buna karşılık TiO_2 katkılı polyester numunelerde dayanma sürelerinin 7 dakika 49 saniye ile 25 dakika 13 saniye arasında değiştiği ve en uzun test süresinin 25.22 dakika ile TiO_2 katkılı numune elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, TiO_2 katkısının IPT dayanım süresini yaklaşık iki katına kadar artırabildiğini göstermektedir.

Saf polyester numunelerde elde edilen sonuçlar, karbonize iz başlangıç bölgelerinde elektrik alanın belirgin biçimde yoğunlaştığını göstermiştir. İz boyunca aşağı doğru ilerledikçe elektrik alan şiddetinin 30–40 V/mm aralığına düşmesi, yüzey izlenmesinin ilk aşamalarında elektrik alanın yönlendirici etkisinin baskın olduğunu, ilerleyen aşamalarda ise iz geometrisinin alan dağılımını yeniden şekillendirdiğini ortaya koymuştur. İz başlangıcında gözlenen ani alan artışı, yüzey izlenmesi sürecinin kritik bir eşik davranışı sergilediğini ve lokal elektriksel streslerin karbonize iz ilerlemesini hızlandığını göstermektedir. Potansiyel dağılımlarında ise karbon izinin dallanmış ve düzensiz bölgelerinde potansiyel gradyentlerinin arttığı belirlenmiş, bu durum yüzey iz geometrisinin elektriksel stres dağılımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu doğrulamıştır.

TiO₂ katkılı polyester numunelerde elde edilen elektrik alan çizgilerinin daha homojen dağıldığı ve maksimum alan değerlerinin 90–100 V/mm aralığında sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Zamana bağlı elektrik alan analizleri incelendiğinde, 600–650 V/mm seviyelerine ulaşan kısa süreli pikler oluşmasına rağmen, bu yüksek streslerin hızlı bir şekilde sönümlendiğini ve alan dağılımının yeniden dengelendiğini göstermektedir. TiO₂ katkısının ani elektriksel zorlanmalara karşı malzemenin yük dağılımını yeniden düzenleyebildiğini düşündürmektedir. Potansiyel dağılımlarında ise 5.90–6.35 kV aralığında daha düzgün ve yumuşak gradyentler elde edilmiş, ani potansiyel sıçramalarının saf numuneye kıyasla belirgin biçimde azaldığı görülmüştür.

Genel olarak değerlendirildiğinde, saf polyester numunelerde karbonize yüzey izlerinin daha düzensiz, dallanmış ve lokal elektrik alan yoğunlaşmalarına açık olduğu, TiO₂ katkılı numunelerde ise iz geometrisinin daha sınırlı kaldığı ve elektrik alan ile potansiyel dağılımının daha homojen hale geldiği sonucuna varılmıştır. FEM analizleri, deneysel olarak gözlenen daha uzun dayanım süreleri ile uyumlu sonuçlar üretmiş ve TiO₂ nanoparçacık katkısının yüzey izlenmesine karşı elektriksel stresin daha dengeli dağıtılmasını sağladığını sayısal olarak doğrulamıştır. Bu yönüyle çalışma, yüzey iz oluşumu mekanizmasının anlaşılmasında deneysel gözlemler ile sayısal analizlerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya koymakta ve nano katkıların dielektrik malzemelerin yüzey dayanımını artırmadaki rolünü açık biçimde göstermektedir.

KAYNAKÇA

Angalane, S. K., & Kasinathan, E. (2022). A review on polymeric insulation for high-voltage application under various stress conditions. *Polymer Composi-*

- tes, 43(8), 4803–4834. <https://doi.org/10.1002/pc.26793>
- ANSYS, Inc. (2025). Maxwell (Electrostatic/Electromagnetic field solver) – Finite element/field computation documentation. ANSYS Help/Documentation.
- Cardoso, J. R. (2016). Electromagnetics through the finite element method: A simplified approach using Maxwell's equations. CRC Press.
- Choudhary, M., Shafiq, M., Kiitam, I., Hussain, A., Palu, I., & Taklaja, P. (2022). A review of aging models for electrical insulation in power cables. *Energies*, 15(9), 3408. <https://doi.org/10.3390/en15093408>
- Domingos, A. C., Duarte, L., Pinheiro, A. P., Moura, F. A. M., Vasconcelos, L., de Carvalho, D. P., Fadel, F. E. F., & Sakai, P. N. (2025). Comparative analysis of insulation aging in cross-linked polyethylene and ethylene–propylene rubber cables through the progression rate of partial discharge. *Energies*, 18(10), 2653. <https://doi.org/10.3390/en18102653>
- Dong, M., Yang, Z., Xia, G., Zhang, J., Zhan, Z., Xin, W., Wang, Q., Xu, B., Zhang, Y., & Xie, J. (2024). Enhance the surface insulation properties of EP materials via plasma and fluorine-containing coupling agent co-fluorinated graphene. *Nanomaterials*, 14(24), 2009. <https://doi.org/10.3390/nano14242009>
- IEC. (2007). IEC 60587: Electrical insulating materials used under severe ambient conditions—Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion. IEC.
- Jin, J. (2025). Research progress on aging of insulation materials of power equipment under extreme temperature cycles. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical Engineering and Intelligent Control (EEIC 2025)* (Vol. 279, pp. 1–9). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-864-6_20
- Kadim, E. J., Noorden, Z. A., Adzis, Z., & Azis, N. (2021). Nanoparticles application in high voltage insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(4), 1380–1399. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009531>
- Khan, M. Z., Hussain, A., Palu, I., Taklaja, P., & Shafiq, M. (2020). Significantly improved surface flashover characteristics of epoxy resin/Al₂O₃ nanocomposites in air, vacuum and SF₆ by gas-phase fluorination. *Journal of Electronic Materials*, 49(5), 3400–3408. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08001-4>
- Li, S. (2020). Improvement of surface flashover in vacuum. *High Voltage*, 5(2), 122–133. <https://doi.org/10.1049/hve.2020.0021>
- Li, S., Gao, Y., Lu, D., Huang, P., & Du, B. (2024). Phase dependence of surface charge measurement on epoxy insulator in C₄F₇N/CO₂ under AC voltage. *Polymers*, 16(18), 2585. <https://doi.org/10.3390/polym16182585>
- Li, Y., Zhou, Y., Cheng, S., Hu, J., He, J., & Li, Q. (2021). Polymer nanocomposites

- with high energy density utilizing oriented nanosheets and high-dielectric-constant nanoparticles. *Materials*, 14(17), 4780. <https://doi.org/10.3390/ma14174780>
- Lin, T., Zhang, Y., Lu, Z., Wang, Z., Wei, P., Liu, C., & Yang, L. (2021). Dielectric surface flashover under long-term repetitive microsecond pulses in compressed gas environment. *Materials*, 14(12), 3343. <https://doi.org/10.3390/ma14123343>
- Nazir, M. T., Khalid, A., Akram, S., Mishra, P., Kabir, I. I., Yeoh, G. H., & Wong, K. L. (2023). Electrical tracking, erosion and flammability resistance of high voltage outdoor composite insulation: Research, innovation and future outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 156, 100757. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100757>
- Qiao, X., Ming, Y., Xu, K., Yi, N., & Sundararajan, R. (2022). Aging of polymeric insulators under various conditions and environments: Another look. *Energies*, 15(23), 8809. <https://doi.org/10.3390/en15238809>
- Rehman, A. U., Khan, M. S., Khattak, A., Ahmad, N., Imran, K., Khan, Y., & Alkhalid, K. H. (2025). Enhanced high voltage insulation performance of HTV silicon rubber nanocomposites filled with nano-TiO₂ for outdoor applications. *Scientific Reports*, 15(1), 23735. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02730-4>
- Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., & Bogarra, S. (2023). Tracking resistance in polymeric insulation materials for high-voltage electrical mobility applications evaluated by existing test methods: Identified research needs. *Polymers*, 15(18), 3717. <https://doi.org/10.3390/polym15183717>
- Slama, M. E. A., Beroual, A., & Haddad, A. (2020). Surface discharges and flashover modelling of solid insulators in gases. *Energies*, 13(3), 591. <https://doi.org/10.3390/en13030591>
- Yang, F., Zhou, B., Li, M., Gao, Y., & Li, S. (2024). Achieving ultrahigh surface flashover voltage of epoxy resin in vacuum by ultraviolet irradiation. *Journal of Applied Physics*, 135(23), 235304. <https://doi.org/10.1063/5.0210568>
- Zhang, B., Li, S., Zhou, B., & Li, M. (2021). Review of surface transient charge measurement on solid insulating materials via the Pockels technique. *High Voltage*, 6(4), 608–624. <https://doi.org/10.1049/hve2.12073>
- Zhang, J., Shi, J., & Zhang, J. (2022). Analysis of the surface electric field distribution of a 10 kV faulty composite insulator. *Electronics*, 11(22), 3740. <https://doi.org/10.3390/electronics11223740>

12. BÖLÜM

DİFERANSİYEL DENKLEMLER VE YAPAY ZEKA: KLASİK YÖNTEMLERDEN MODERN UYGULAMALARA

Dr. Öğretim Üyesi İnci OKUMUŞ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü
<https://orcid.org/0000-0003-3711-8144>

1. GİRİŞ

Bilim ve mühendislikte, fiziksel fenomenlerin anlaşılmasına yardımcı olmak için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller genellikle bilinmeyen bir fonksiyonun bazı türevlerini içeren bir denklem üretir. Böyle bir denkleme diferansiyel denklem denir.

Diferansiyel denklemler, mühendislik, doğa bilimleri, ekonomi ve hatta işletme alanlarındaki karmaşık problemleri analiz etmek ve çözmek için gerekli olan modern uygulamalı matematiğin temel taşlarından birini oluşturur. Bir veya daha fazla bağımsız değişkene göre sürekli olarak değişen niceliklerin modellenmesi için titiz bir matematiksel çerçeve sağlarlar. Newton'un hareket yasalarından Maxwell denklemlerine, ısı iletiminden biyolojik popülasyon modellerine kadar pek çok fiziksel ve biyolojik sistem diferansiyel denklemler aracılığıyla ifade edilir (Boyce et al., 2017).

Diferansiyel denklemler, soyut matematiksel teori ile gerçek dünya uygulamaları arasında bir köprü oluşturur. Değişimi modellemek, gelecekteki

davranışları tahmin etmek ve karmaşık sistemleri anlamak için temel araçlar sağlarlar. Diferansiyel denklemlere hakimiyet, yalnızca matematiksel becerileri güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda bilim, mühendislik ve ötesinde daha derin içgörülere de kapı açar. Bu nedenle, diferansiyel denklemler hem teorik araştırmalarda hem de pratik uygulamalarda merkezi bir konu olmaya devam etmekte ve çevremizdeki dünyayı anlama biçimimizi şekillendirmeye devam etmektedir.

Ancak bu denklemlerin önemli bir kısmı analitik olarak çözülemez ve bu durum, sayısal yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Klasik sayısal yöntemler arasında Euler yöntemi, Runge-Kutta yöntemleri, sonlu farklar yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi gibi yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler, genellikle doğruluk, hesaplama süresi ve hesaplama maliyetinin yüksek olması, yüksek boyutlu uzaylarda verimliliğin düşmesi, çözüm stabilitesi ve gürültülü veya eksik verilere karşı hassasiyet gibi sınırlamalara sahiptir.

Son yıllarda, yapay zekâ, özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri, karmaşık sistemleri modellemek için önemli bir alternatif yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır (Bakthavatchalam et al., 2022; Han et al., 2018). Yapay zekanın veri temelli öğrenme yeteneği ve karmaşık ilişkileri modelleme kabiliyeti, klasik sayısal yaklaşımların hesaplama açısından pahalı veya uygulanamaz hale geldiği durumlarda diferansiyel denklemlerle tanımlanan sistemlerin çözümüne büyük bir katkı sağlamaktadır (Wang et al., 2024).

Yapay zeka, genel olarak, bir sistemin çevresinden aldığı girdileri analiz ederek rasyonel kararlar alabilme ve belirli hedeflere ulaşabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu bağlamda yapay zeka, yalnızca insan davranışlarını taklit eden sistemleri değil, aynı zamanda insan performansını aşabilen hesaplamalı yöntemleri de kapsar.

Bu bölümde, diferansiyel denklemler ile yapay zeka arasındaki etkileşim incelenerek klasik sayısal yöntemler ile veri temelli ve fizik-bilgili (physics-informed) yapay zeka yaklaşımları karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır.

2. DİFERANSİYEL DENKLEMLER ve SINIFLANDIRILMASI

Bir diferansiyel denklem, bir fonksiyon ve bu fonksiyonun bir veya daha fazla bağımsız değişkene göre türevlerini içeren bir denklemdir. Diferansiyel denklemler, bağımsız değişkenlerin sayısı, en yüksek türevin mertebesi ve doğrusallık dahil olmak üzere çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir (Zill et al., 1997).

Adi diferansiyel denklemler (ADD), tek bir bağımsız değişkene göre türev-

leri içeren denklemlerdir. Genellikle zamana bağlı süreçleri modellemek için kullanılırlar.

n. mertebeden bir adi diferansiyel denklemin genel formu şu şekildedir:

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0.$$

Adi diferansiyel denklemler, klasik mekanikte, elektrik devre teorisinde ve kontrol sistemlerinde temel öneme sahiptir.

Birden fazla bağımsız değişkene göre kısmi türevleri içeren bir diferansiyel denklem ise kısmi diferansiyel denklem (KDD) olarak adlandırılır. KDD'ler, uzamsal olarak dağıtılmış sistemlerin modellenmesi için gereklidir.

$$F(x, y, u, u_x, u_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}) = 0$$

olarak yazılabilir. Bu tür denklemler, ısı iletimi, dalga yayılımı ve akışkan dinamiğinde doğal olarak ortaya çıkar.

Bir adi diferansiyel denklem, bağımlı değişken ve türevlerinin birinci kuvvetlerinin toplamsal kombinasyonları şeklinde ise doğrusal (lineer), aksi takdirde doğrusal olmayan olarak sınıflandırılır. Doğrusal diferansiyel denklemler genellikle daha kolay çözülebilir ve güçlü analitik yöntemlere olanak tanırken, doğrusal olmayan denklemler genellikle çatalanma ve kaos gibi karmaşık davranışlar sergiler. Matematiksel karmaşıklıklarına rağmen, doğrusal olmayan diferansiyel denklemler özellikle önemlidir çünkü gerçek dünyadaki birçok sistem doğası gereği doğrusal değildir.

3. DİFERANSİYEL DENKLEMLER ve UYGULAMALARI

Diferansiyel denklemlerin önemi, doğal ve mühendislik sistemlerini yöneten temel prensipleri kodlayabilme yeteneklerinde yatmaktadır. Değişim için evrensel bir dil sağlayarak, hayatımızı şekillendiren dinamik sistemleri anlamayı, tahmin etmeyi ve kontrol etmeyi mümkün kılarlar. Doğadaki ve toplumdaki birçok sistem, statik formüllerle tam olarak tanımlanamaz, ancak bunların nasıl geliştiği anlaşılabilir (Kreyszig, 2007).

Fizikte, diferansiyel denklemler temeldir. Newton'un hareket yasaları, elektromanyetizmadaki Maxwell denklemleri ve kuantum mekaniğindeki Schrödinger denklemi gibi temel fizik yasalarının tümü diferansiyel denklemler olarak ifade edilir. Bu denklemler, bilim insanlarının doğal olayları anlamalarını ve sistemlerin farklı koşullar altında nasıl davrandığını tahmin etmelerini sağlar.

Örneğin, düşen bir cismin hareketi, ivme, hız ve konum arasındaki ilişkiyi gösteren bir diferansiyel denklemle açıklanır.

Mühendislikte, diferansiyel denklemler sistemlerin tasarımı ve kontrolü için vazgeçilmezdir. Elektrik devreleri, mekanik titreşimler, akışkan akışı, ısı transferi, sinyal işleme ve kontrol sistemleri diferansiyel denklemler kullanılarak modellenir. Mühendisler, köprülerden araçlara ve iletişim ağlarına kadar her şeyde güvenlik, verimlilik ve güvenilirliği sağlamak için bu denklemlere güvenirlirler.

Biyolojide, popülasyon dinamiklerini, bulaşıcı hastalıkların yayılmasını ve kalp ritmi ve sinir aktivitesi gibi biyolojik süreçleri modellemek için diferansiyel denklemler kullanılır. Örneğin, salgın yayılım modelleri, bilim insanlarının hastalıkların nasıl büyüdüğünü ve müdahalelerin bulaşmayı nasıl azaltabileceğini anlamalarına yardımcı olur.

Tıpta ise diferansiyel denklemler, vücuttaki ilaç konsantrasyonunu modellemek ve tedavi stratejilerini optimize etmek için kullanılırlar.

Ekonomi de piyasalardaki, yatırımlardaki ve ekonomik büyümedeki değişimleri zaman içinde tanımlamak için diferansiyel denklemlere dayanır. Arz ve talep, faiz oranları ve sermaye birikimi modelleri genellikle değişim oranlarını içerir. Bu modeller, ekonomistlerin büyüme, istikrar ve uzun vadeli eğilimleri anlamalarına yardımcı olarak daha iyi karar alma ve politika geliştirme süreçlerini destekler.

Sosyal bilimlerde de nüfus artışı, göç ve fikirlerin yayılması gibi konuları incelemek için benzer araçlar kullanılır.

Son olarak, bilgisayarların gelişmesiyle birlikte diferansiyel denklemler daha da önem kazanmıştır. Birçok karmaşık denklem tam olarak çözülemez, ancak sayısal yöntemler bilim insanlarına ve mühendislere çözümleri yüksek doğrulukla yaklaşık olarak hesaplama olanağı sağlar.

İklim modellemesi, yapay zeka, robotik ve uzay araştırmaları gibi modern teknolojiler, diferansiyel denklemlere ve bunların sayısal çözümlerine büyük ölçüde dayanmaktadır.

4. DİFERANSİYEL DENKLEMLER ve ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Diferansiyel denklemler, doğa bilimleri, mühendislik ve sosyal bilimlerdeki çok sayıda olayın matematiksel modellemesinde temel bir rol oynamaktadır. Çözümleri, zaman veya mekân içinde evrimleşen sistemlerin davranışını tanımlar. Diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan yöntemler analitik

yöntemler ve sayısal yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bazı diferansiyel denklemler kesin analitik çözümlere izin verirken, birçok pratik problem sayısal yaklaşım teknikleri gerektirir.

Analitik yöntemler, temel veya özel fonksiyonlar cinsinden ifade edilen kapalı form çözümler elde etmeyi amaçlar. Bu çözümler, sistem davranışının kesin tanımlarını sağlar ve teorik analiz için paha biçilmezdir.

Öte yandan, sayısal yöntemler, ayırık noktalarda yaklaşık çözümler üretir. Analitik çözümlerin mevcut olmadığı veya elde edilmesinin pratik olmadığı durumlarda vazgeçilmezlerdir.

4.1. Analitik Yöntemler

Bir diferansiyel denklemin analitik çözümü, sonlu sayıda cebirsel işlem, türev alma, integral alma ve temel veya özel fonksiyonlar cinsinden ifade edilebilen bir çözümdür. Bu tür çözümler, modellenen sistemin niteliksel ve niceliksel davranışına ilişkin kesin ve doğrudan bir fikir verir (Blanchard et al., 1998).

Klasik analitik yöntemler genelde diferansiyel denklemin tipine göre sınıflandırılır. Değişkenlerine ayrılabilir, homojen, doğrusal (lineer), tam ve Bernoulli gibi birinci mertebeden diferansiyel denklemlerin çözümleri için uygun cebirsel işlemler, uygun değişken dönüşümü ve integral çarpanı gibi analitik yöntemler kullanılır.

Yüksek mertebeden lineer diferansiyel denklemlerde homojen denklemlerin çözümleri için analitik yöntem olarak denkleme karşılık gelen karakteristik denklemin köklerinin türüne (reel, karmaşık, çift katlı) göre çözüm elde edilen bir yöntem kullanılırken homojen olmayan denklemlerin çözümleri için ise belirsiz katsayılar yöntemi ve parametrelerin değişim yöntemi gibi analitik yöntemler kullanılır.

Başlangıç değer problemleri ve parçalı tanımlı veya süreksiz fonksiyonlar içeren diferansiyel denklemler için Laplace dönüşümü yöntemi kullanılır. Laplace dönüşümü, diferansiyel denklemleri cebirsel denklemlere dönüştürerek çözümlerini kolaylaştırır.

Değişken katsayılı birçok diferansiyel denklem kapalı formda çözülemez. Bu gibi durumlarda çözümler kuvvet serileri olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşım, Bessel, Legendre, Hermite ve Laguerre fonksiyonları gibi özel fonksiyonların ortaya çıkmasına yol açar.

4.2. Sayısal Yöntemler

Pratik uygulamalarda ortaya çıkan birçok diferansiyel denklem, analitik yöntemlerle kapalı formda çözülemez. Bu gibi durumlarda, çözüm fonksiyonunun belirli noktalarındaki (ayrık noktalarındaki) yaklaşık değerlerini hesaplamaya yönelik sayısal yöntemler kullanılır (Butcher, 2016). Bu yöntemler, doğrusal olmayan sistemlere, karmaşık geometrilere ve gerçekçi sınır veya başlangıç koşullarına sahip problemlerde vazgeçilmezdir.

Sayısal çözüm yöntemleri, sürekli problemlerin ayrıklaştırılmasına dayanır. Bu yaklaşımda bağımsız değişken, sonlu bir nokta kümesine bölünür ve çözümün yaklaşık değerleri bu noktalarda hesaplanır.

Adım boyutu (büyüklüğü), yerel hata, küresel hata, kararlılık ve yakınsama sayısal yöntemler için başlıca kavramlardır.

4.3. Başlangıç Değer Problemleri

Bir başlangıç değer probleminin genel formu

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0$$

dır.

Başlangıç değer problemlerini çözmek için kullanılan sayısal yöntemlerden ilki, en basit sayısal yöntem olan Euler yöntemidir.

$$y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n).$$

Euler yöntemi, belirli bir adım büyüklüğü ile başlangıç değer probleminin yaklaşık bir sayısal çözümünü elde etmeyi amaçlar. Bu yöntem hesaplama maliyeti düşük olmasına rağmen büyük h değerleri kullanıldığında doğruluk ve kararlılık açısından bazı sınırlamalara sahiptir.

İkincisi ise geliştirilmiş Euler yöntemidir.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_n + hf(x_n, y_n))].$$

Euler yönteminin doğruluğunu artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntem, eğimlerin ortalamasını alarak doğruluğu artırır.

Son olarak, Runge-Kutta yöntemleri, en yaygın kullanılan sayısal yöntemler

arasındadır.

Dördüncü mertebe Runge-Kutta (RK4):

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right),$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right),$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3),$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{4}(k_1 + 3k_2 + 3k_3 + k_4).$$

Euler yönteminin bazı sınırlamaları nedeniyle, Runge-Kutta yöntemleri genellikle daha hassas sonuçlar sağlar ve daha karmaşık sistemlerde tercih edilir.

4.4. Çok Adımlı Yöntemler

Adams–Bashforth ve Adams–Moulton yöntemleri olarak ikiye ayrılır.

Adams–Bashforth yöntemleri açık formda çok adımlı yöntemlerdir. Önceki adımlardan elde edilen bilgileri kullanır. Adams–Moulton yöntemleri ise kapalı formda çok adımlı yöntemlerdir. Geliştirilmiş kararlılık özelliklerine sahiptirler.

4.5. Katı Diferansiyel Denklemler

Katı denklemler, açık yöntemler kullanıldığında kararlılık için son derece küçük adım boyutları gerektirir. Geriye dönük Euler yöntemi, yamuk (trapez) yöntemi ve geriye doğru türev alma formülleri (geriye doğru farklılaşma formülleri) bu denklemler için kullanılan en yaygın sayısal yaklaşımlardır.

4.6. Sınır Değer Problemleri

Sınır değer problemlerinin genel formu aşağıdaki gibidir:

$$y'' = f(x, y, y'), \quad y(a) = \alpha, y(b) = \beta.$$

Bu denklemler için genel olarak kullanılan sayısal yöntemler atış yöntemi ve sonlu fark yöntemidir. Atış yöntemi, bir sınır değer problemin bir başlangıç değer problemine indirgenerek çözülmesi yöntemidir. Sonlu farklar yöntemi ise sonlu fark denklemlerinde türevlerin yerine farkların koyulmasıyla gerçekleştirilen ve böylece diferansiyel denklemlerin analitik çözümlerine yaklaşılan bir sayısal yöntemdir. Türevler, fark oranları ile yaklaşık olarak aşağıdaki gibi

$$y'(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}$$

ifade edilir.

5. YAPAY ZEKA VE SINIFLANDIRILMASI

Yapay zekâ, bilgisayar bilimleri, matematik, istatistik, bilişsel bilimler ve mühendislik disiplinlerinin kesişiminde yer alan çok disiplinli bir araştırma alanıdır. Temel amacı, insan zekâsı gerektiren bilişsel süreçleri gerçekleştirebilen yapay sistemler geliştirmektir. Bu süreçler arasında akıl yürütme, öğrenme, algılama, dil kullanımı ve karar verme yer almaktadır (Norvig et al., 1995).

Son yıllarda hesaplama gücündeki artış, büyük ölçekli veri kümelerinin erişilebilir hâle gelmesi ve algoritmik yöntemlerdeki ilerlemeler, yapay zekanın hem teorik hem de uygulamalı boyutlarda hızlı bir gelişim göstermesine neden olmuştur. Günümüzde yapay zeka; akıllı telefonlardan sağlık sistemlerine, finansal analizlerden otonom araçlara kadar hayatın birçok alanında aktif olarak kullanılmaktadır. Bu hızlı yayılım, yapay zekayı modern bilimin ve teknolojinin en önemli konularından biri haline getirmiştir (Nilsson, 2009).

Yapay zekâ sistemleri genellikle kapsamlarına ve yeteneklerine göre sınıflandırılmaktadır:

Dar Yapay Zekâ (ANI): Belirli bir görevi yerine getirmek üzere tasarlanmış sistemlerdir. Günümüzde kullanılan yapay zekâ uygulamalarının büyük çoğunluğu bu gruba girmektedir.

Genel Yapay Zekâ (AGI): İnsan zekasına benzer şekilde farklı alanlarda öğrenme ve problem çözme yeteneğine sahip sistemlerdir.

Süper Yapay Zekâ (ASI): Teorik bir kavram olup, insan zekasını aşan varsayımsal sistemleri ifade eder.

6. YAPAY ZEKA ve TEMEL ALT ALANLARI

Yapay zekâ, farklı problem türlerine göre birçok alt alan içermektedir. Yapay zekanın temel alt alanları:

-Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, sistemlerin açıkça programlanmadan verilerden öğrenmesini ve performanslarını iyileştirmesini sağlayan algoritmalara odaklanır. Denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme yöntemlerini içerir. Sistem, geçmiş verileri analiz ederek geleceğe yönelik tahminler yapabilir. Denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme olmak üzere üç temel yaklaşımı bulunmaktadır. Bu yöntemler, sınıflandırma, regresyon ve örüntü tanıma gibi problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mitchell, 1997).

-Derin Öğrenme

Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağlarına dayanan bir yaklaşımdır. Makine öğrenmesinin bir alt dalıdır ve genellikle büyük veri setleri ile çalışır. Özellikle görüntü işleme, konuşma tanıma ve doğal dil işleme gibi karmaşık problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Goodfellow et al., 2016).

-Doğal Dil İşleme

Doğal dil işleme, makinelerin insan dilini nasıl anlayabileceğini, yorumlayabileceğini ve üretebileceğini inceler. Metin sınıflandırma, makine çevirisi, duygu analizi, konuşma tanıma ve konuşma tabanlı yapay zeka sistemleri gibi uygulamaları içermektedir (Jurafsky et al., 2009).

-Bilgisayarla Görme

Bilgisayarla görme, makinelerin görsel verileri algoritmik yöntemlerle işlemesini ve yorumlamasını sağlar. Nesne tespiti, görüntü sınıflandırması, yüz tanıma ve tıbbi görüntü analizi bu alanın temel uygulamaları arasındadır (Prince, 2012; Szeliski, 2022).

-Bilgi Tabanlı Sistem

Bu alan, makinelerin kurallar, ontolojiler ve mantık tabanlı sistemler kullanılarak akıl yürütmesi, yeni bilgiler çıkarımı yapması ve mantıksal kararlar alması için bilginin nasıl biçimsel olarak temsil edilebileceğine odaklanır. İnsan zekasının bir benzerini taklit etmeye çalışan bir bilgisayar sistemi olarak da tanımlanabilir (Jordan et al., 2015; Stallings, 2016).

-Arama ve Optimizasyon

Arama ve optimizasyon yöntemleri, geniş problem alanlarında en uygun veya en uyguna yakın çözümler bulmayı amaçlamaktadır. Sezgisel arama, kısıtlamalı tatmin ve evrimsel algoritmalar gibi uygulamaları içermektedir (Lens-

tra et al., 2018).

-Uzman Sistemler

Uzman sistemler, belirli alanlarda insan uzmanların karar verme yeteneğini taklit etmek üzere tasarlanmış, bilgi tabanlı yapay zeka sistemleridir (Durkin, 1998).

7. YAPAY ZEKA ve UYGULAMALARI

Yapay zekâ sistemleri günümüzde birçok sektörde karar destek mekanizması olarak kullanılmaktadır (LeCun et al., 2015).

Sağlık alanında tıbbi teşhis, tıbbi görüntü analizi, ilaç keşfi, kişiselleştirilmiş tedavi ve hasta takibi için kullanılmaktadır.

Finans sektöründe dolandırıcılık tespiti, kredi puanlaması, risk analizi, algoritmik işlem ve finansal tahmin gibi uygulamaları yer almaktadır.

Endüstri alanında robotik sistemler, akıllı üretim, kalite kontrol, öngörücü bakım ve tedarik zinciri optimizasyonunda uygulanmaktadır.

Akıllı öğretim sistemleri, kişiselleştirilmiş öğrenme sistemleri, otomatik notlandırma ve öğrenme analitiği, eğitimde yaygın olarak kullanılan yapay zekâ uygulamalarıdır.

Ulaşım alanında ise yapay zekâ ulaşım ağlarında otonom araçları, trafik yönetim sistemlerini, rota optimizasyonunu ve öngörücü bakımı mümkün kılıyor.

Tarım alanında ürün izleme, verim tahmini, hassas tarım ve otomatik sulama sistemleri gibi uygulamaları bulunmaktadır.

Bilgisayar görüntüleme uygulamaları olarak yüz tanıma, gözetim sistemleri, otonom denetim ve tıbbi görüntüleme gibi uygulamaları öne çıkmaktadır.

E-ticaret ve pazarlamadaki öneri sistemleri, müşteri davranış analizi, dinamik fiyatlandırma ve hedefli reklamcılık büyük ölçüde yapay zekaya dayanmaktadır.

Siber güvenlikte ise yapay zeka, izinsiz girişleri, kötü amaçlı yazılımları, anormallikleri ve siber tehditleri gerçek zamanlı olarak tespit etmeye yardımcı olur.

Bu uygulamalar, verimliliği artırmakta ve insan hatasını azaltmaktadır. Ayrıca bu uygulama alanları, yapay zekanın bilimsel, endüstriyel ve toplumsal alanlarda nasıl kilit bir teknoloji haline geldiğini göstermektedir.

8. DİFERANSİYEL DENKLEMLER VE YAPAY ZEKA

Diferansiyel denklemler, fizik, mühendislik, biyoloji ve sosyal bilimlerdeki dinamik süreçleri tanımlamak için temel bir matematiksel çerçeve oluşturur. Adi ve kısmi diferansiyel denklemler, akışkan akışı, ısı transferi, popülasyon dinamikleri ve elektromanyetik alanlar gibi olayları modellemek için sıklıkla kullanılır. Merkezi önemlerine rağmen, pratik açıdan önemli birçok diferansiyel denklem, özellikle doğrusal olmayanlık, yüksek boyutluluk veya karmaşık sınır koşulları söz konusu olduğunda, kapalı formda analitik çözümlere izin vermez. Bu nedenle sonlu fark, sonlu eleman ve spektral yöntemler gibi geleneksel sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Teorik titizliklerine rağmen, klasik sayısal yöntemler belirli varsayımlar altında yüksek doğruluk sağlasa da yüksek boyutlu sistemler için hesaplama maliyetinin hızlı artması, karmaşık geometrilere ağ oluşturma zorlaşması, gürültülü veya eksik verilerin doğrudan kullanılamaması, parametre tahmininde ve belirsizliklerinin modele entegrasyonunun güçlüğü gibi zorluklarla karşılaşabilir.

Bu sınırlamalar, geleneksel yaklaşımları tamamlayabilecek veya bazı durumlarda bunların yerini alabilecek, veri ile öğrenebilen ve esnek yapıya sahip yapay zeka yöntemlerinin önemini artırmıştır (Rackauckas et al., 2020).

Son yıllarda, yapay zekadaki gelişmeler, diferansiyel denklemlerin çözümü ve modellenmesi için alternatif paradigmlar ortaya koymuştur. Bu yöntemler, fiziksel yasaları da içerecek şekilde veri odaklı öğrenmeyi kullanır ve bilimsel hesaplama için yeni olanaklar sunar (Koh et al., 2025).

9. YAPAY ZEKA VE DİFERANSİYEL DENKLEMLERİN ÇÖZÜLMESİ

Yapay zeka, sistemlerin açık programlama gerektirmeden verilerden kâlıplar ve gösterimler öğrenmesini sağlayan yöntemler bütünüdür. Diferansiyel denklemler bağlamında, yapay zeka iki temel şekilde kullanılabilir; denklemi bilinen sistemlerin çözümü ve denklemi bilinmeyen sistemlerin öğrenilmesi.

Makine öğrenmesi algoritmaları, gözlemlenen verilerden doğrudan sistemin dinamiklerini çıkarabilir. Örneğin; parametre tahmini, model tanımlama, indirgenmiş mertebeli modelleme ve pahalı çözücüler için vekil modelleme gibi problemler yapay zeka ile ele alınabilir.

Bu yaklaşımlar, temel denklemlerin kısmen bilindiği veya gözlemsel verile-

rin bol olduğu durumlarda özellikle faydalıdır.

-Sinir Ağları ile Diferansiyel Denklem Çözümü

Yapay sinir ağları, evrensel fonksiyon yaklaşıtııcılar olarak bilinir. Bu da onları diferansiyel denklemlerin çözümlerini temsil etmek için oldukça uygun hale getirir. Bu çerçevede, bilinmeyen çözüm, parametreleri diferansiyel denklemi sağlayacak şekilde optimize edilmiş bir sinir ağı ile yaklaşık olarak bulunabilir.

Çözüm fonksiyonu

$$y(x) \approx NN(x)$$

şeklindedir.

Çözümü bir sinir ağı olarak temsil etmek, türevleri, otomatik türev kullanarak hesaplamak ve diferansiyel denklemi kayıp fonksiyonunun bir parçası olarak formüle etmek bu yaklaşımın temel unsurlarıdır (Chen et al., 2018).

Klasik ayrıştırma tabanlı yöntemlerin aksine, sinir ağı çözümleri tüm etki alanı üzerinde sürekli yaklaşımlar sağlar.

Geometrik Ortalama Optimizasyonu (GMO) algoritması ve yapay sinir ağları, Dirichlet sınır koşullarına sahip diferansiyel denklemlerin sınır koşullarını karşılamak ve küresel optimizasyon yoluyla çözümlerini elde etmek için kullanılmıştır (Gör et al., 2024).

-Fizik-Bilgili Sinir Ağları (PINNs) ile Diferansiyel Denklem Çözümü

Fizik Bilgili Sinir Ağları (PINN'ler), diferansiyel denklemleri doğrudan sinir ağlarının eğitim sürecine entegre eder. Kayıp fonksiyonu, yönetici diferansiyel denklemin kalıntısını, başlangıç ve sınır koşulları kısıtlamalarını ve mevcutsa deneysel veriyi içerecek şekilde tanımlanır (Lu et al., 2021; Raissi et al., 2019; Zhu et al., 2019).

Bu yöntem özellikle Navier-Stokes denklemleriyle yönetilen akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle transferi ve dalga yayılımı ve elektromanyetik alan problemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Cai et al., 2021; Jin et al., 2021; Zhang et al., 2020).

PINN'ler fiziksel tutarlılığı korurken büyük etiketli veri kümelerine olan bağımlılığı azaltır. Bununla birlikte, PINN'lerin eğitimi hesaplama açısından pahalı olabilir ve hiperparametre seçimlerine duyarlıdır.

Zaman bağımlı adi diferansiyel denklemler ve kısmi diferansiyel denklemlerin nümerik hesaplamalarını hızlandırmak için bir makine öğrenmesi çerçe-

vesi önerilmektedir. Yöntem, mevcut nümerik yöntemlerin yapay sinir ağları olarak yeniden ele alınmasına dayanır ve bu ağlardaki eğitilebilir parametreler, uygun kayıp fonksiyonlarını minimize ederek belirlenmiştir. Önerilen makine öğrenmesi çerçevesi, geleneksel nümerik yöntemlere göre hesaplama verimliğinde önemli bir artış sağlamıştır (Mishra, 2018).

-Veri Tabanlı Model Keşfi

Birçok bilimsel alanda, yönetici diferansiyel denklemler önceden bilinmemektedir. Yapay zeka tabanlı model keşfi, alta yatan denklemleri doğrudan gözlemsel verilerden çıkarmayı amaçlar. Bu amaçla seyrek regresyon, sembolik regresyon ve derin öğrenme tabanlı tanımlama gibi teknikler geliştirilmiştir (Raissi et al., 2018; Rudy et al., 2017). Bu yöntemler özellikle sistem biyolojisi, iklim ve çevre modellemesi ve karmaşık sosyo-ekonomik sistemler gibi sistemlerde önemli katkılar sağlamaktadır (Brunton et al., 2016). Model keşfi yaklaşımları, sistem dinamiklerinin yorumlanabilir temsillerini sağlar, ancak gürültü ve tanımlanabilirlik sorunlarının dikkatli bir şekilde ele alınmasını gerektirir (Brunton et al., 2023).

-Derin Öğrenme ile Diferansiyel Denklem Çözümü

Derin öğrenme mimarileri, zamana bağlı sistemlerin modellenmesinde özellikle etkilidir. Tekrarlayan sinir ağları (RNN'ler), uzun kısa süreli bellek (LSTM) ağları ve geçitli tekrarlayan birimler (GRU'lar), zamansal dinamikleri öğrenmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Rubanova et al., 2019). Bu modeller özellikle diferansiyel denklemin açık formu bilinmiyorsa, sistem kaotik veya oldukça doğrusal olmayan davranış sergiliyorsa ve gerçek zamanlı tahmin gerekiyorsa etkili sonuçlar üretmektedir (E et al., 2018). Derin öğrenme modelleri, diferansiyel denklem çözücüleri için veri odaklı vekiller olarak işlev görebilir (Navarro et al., 2023).

Mekanikteki kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için derin öğrenme modellerinin (özellikle DNN) nasıl kullanılabileceği ele alınmıştır. Diğerlerinden farklı olarak, bu çalışmada KDD'ler enerji fonksiyonları üzerinden çözülmüştür. Bu yöntem, Deep Energy Method (DEM) olarak adlandırılmıştır (Samaniego et al., 2020).

Deep Galerkin Method (DGM) derin öğrenme algoritması; diferansiyel operatörü, başlangıç koşulunu ve sınır koşullarını sağlamak üzere eğitilerek yüksek boyutlu kısmi diferansiyel denklemlerin çözümlerini yaklaşık olarak belirlemek için kullanılmıştır. Algoritma, 200 boyuta kadar olan yüksek boyutlu KDD'leri doğru bir şekilde çözebilmiştir (Sirignano et al., 2018).

-Sinirsel Operatörler ve Hızlandırılmış Çözücüler

Yapay zeka, klasik sayısal yöntemleri tamamlayıcı olarak da kullanılır.

Sinirsel operatör yöntemleri, bireysel çözümler yerine fonksiyon uzayları arasındaki eşlemeleri öğrenmeyi amaçlar. Fourier Sinirsel Operatörü (FNO) ve DeepONet gibi yaklaşımlar, diferansiyel denklemin çözüm operatörünü yaklaşık olarak hesaplayarak, değişen başlangıç ve sınır koşulları için hızlı tahminler yapılmasını sağlar (Li et al., 2020; Meuris et al., 2023). Sinirsel operatörler, özellikle belirsizlik nicelleştirme ve gerçek zamanlı kontrol gibi tekrarlanan simülasyonlar gerektiren senaryolarda etkilidir; bu senaryolarda geleneksel çözümler hesaplama açısından çok maliyetli olabilir.

Makine öğrenmesi (ML) görevleri için üretilmiş donanımın, sonlu fark yöntemleri aracılığıyla lineer kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için bir platform olarak kullanma potansiyelini araştırılmıştır. Çalışma, KDD çözümlerinin TensorFlow’da uygulanabileceğini göstermiş, böylece ML hızlandırıcılarının hesaplama gücünden sayısal analizler ve simülasyonlar için faydalanma fırsatları yaratmıştır. Ayrıca, donanımın düşük kullanımı ve düşük aritmetik hassasiyet gibi uygulama sorunları da belirlenmiştir (Boulasikis et al., 2025).

10. YAPAY ZEKA TABANLI YÖNTEMLERİN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI

Diferansiyel denklemlere yönelik yapay zeka tabanlı yaklaşımlar, hız, doğruluk, esneklik, ölçeklenebilirlik ve verileri fiziksel yasalarla entegre etme yeteneği de dahil olmak üzere birçok önemli avantaj sunmaktadır. Ayrıca, analitik çözüm gerektirmemesi ve karmaşık ve yüksek boyutlu problemlere uygulanabilirliği de bu yöntemleri öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte, yüksek hesaplama ve eğitim maliyetleri, öğrenilen modellerin yorumlanabilirliğinin sınırlı olması, hiperparametre seçimlerine duyarlılık gibi önemli zorluklar devam etmektedir. Bu zorlukların ele alınması, yapay zeka yöntemlerinin bilimsel ve mühendislik uygulamalarında güvenilir bir şekilde benimsenmesi için elzemdir.

11. YAPAY ZEKA TABANLI YÖNTEMLER VE SAYISAL YÖNTEMLER

Klasik sayısal yöntemler ve yapay zeka yöntemlerinin karşılaştırılması, her iki yaklaşımın avantajları ve dezavantajlarını anlamak açısından oldukça önemlidir (Gör, 2016; İşman et al., 2024).

Klasik sayısal yöntemlerin en büyük avantajı, çok sayıda farklı tipte diferansiyel denklemi çözme konusunda sağlam bir teorik temele sahip olmalarıdır. Ancak bu yöntemler bazen çok karmaşık sistemlerde, özellikle yüksek boyutlu problemlerde, pratikte çok verimli olmayabilir. Ayrıca, sayısal yöntemlerin hatalarla başa çıkma yeteneği sınırlıdır ve doğruluğu her zaman garanti edilemez. Buna karşın, yapay zeka tabanlı veri temelli yöntemler, genellikle daha esnek ve veriyle doğrudan etkileşim kurarak daha hızlı çözüm üretebilirler. Ancak, bu yöntemlerin bazen fiziksel anlamda doğruluğu ve güvenilirliği sorgulanabilir olabilir. Fizik-bilgili yapay zeka yaklaşımları ise bu sorunu aşmak için devreye girer, çünkü fiziksel yasalar bu modellere entegre edilmiştir.

Sonuç olarak, diferansiyel denklemlerle ilgili sistemlerin modellenmesinde, sayısal yöntemler ile yapay zeka arasındaki iş birliği ve entegrasyon gelecekte daha da önemli hale gelecektir.

12. GELECEK PERSPEKTİFİ

Yapay zekanın diferansiyel denklemlerle entegrasyonu, bilimsel hesaplamada yeni bir paradigma şekillendiriyor. Gelecekte hibrit (sayısal-yapay zeka) yöntemlerin yaygınlaşması, sert sistemler için geliştirilmiş PINN mimarileri, yönetici denklemlerin otomatik olarak keşfi ve belirsizlikten haberdar ve açıklanabilir yapay zeka modelleri gibi alanlarda önemli gelişmeler beklenmektedir.

SONUÇ

Bu bölümde, diferansiyel denklemlerin yapay zeka ile birleştirilmesinin teorik temelleri ve pratik uygulamaları incelenmiştir. Yapay zekâ yöntemleri yalnızca alternatif çözüm teknikleri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karmaşık dinamik sistemlerin keşfedilmesini, yaklaşık olarak hesaplanmasını ve analizini de mümkün kılar. Diferansiyel denklemler ve yapay zekâ arasındaki sinerji, matematiksel modelleme ve bilimsel hesaplamanın geleceğinde merkezi bir rol oynamayı vaat etmektedir.

Gelecekteki araştırmaların hibrit modellere, otomatik denklem keşfine ve yüksek performanslı hesaplama ile daha sıkı entegrasyona odaklanması ve bilimsel makine öğrenimi alanını daha da geliştirmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Bakthavatchalam, T. A., Murugan, S., Ramamoorthy, S., Sankarasubbu, M., Ramaswamy, R., Sethuraman, V., & Malomed, B. A. (2022). Primer on solving differential equations using machine learning techniques. *Romanian Reports in Physics*, 74, 113.
- Blanchard, P., Devaney, R. L., & Hall, G. R. (1998). *Differential Equations*, Brooks. Cole, Pa.
- Boulasikis, M., Gruian, F., & Szasz, R. Z. (2025). Using machine learning hardware to solve linear partial differential equations with finite difference methods. *International Journal of Parallel Programming*, 53(2), 15.
- Boyce, W. E., DiPrima, R. C., & Meade, D. B. (2017). *Elementary differential equations and boundary value problems*. John Wiley & Sons.
- Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the national academy of sciences*, 113(15), 3932-3937.
- Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2023). Machine learning for partial differential equations. *arXiv preprint arXiv:2303.17078*.
- Butcher, J. C. (2016). *Numerical methods for ordinary differential equations*. John Wiley & Sons.
- Cai, S., Mao, Z., Wang, Z., Yin, M., & Karniadakis, G. E. (2021). Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: A review. *Acta Mechanica Sinica*, 37(12), 1727-1738.
- Chen, R. T., Rubanova, Y., Bettencourt, J., & Duvenaud, D. K. (2018). Neural ordinary differential equations. *Advances in neural information processing systems*, 31.
- Durkin, J. (1998). *Expert systems: design and development*. Prentice Hall PTR.
- E, W., & Yu, B. (2018). The deep Ritz method: A deep learning-based numerical algorithm for solving variational problems. *Communications in Mathematics and Statistics*, 6(1), 1-12.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). *Deep learning* (Vol. 1, No. 2). Cambridge: MIT press.
- Gör, İ. (2016). Çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı ile lineer diferansiyel denklem sisteminin çözümü. 18. *Akademik Bilişim Konferansı, Aydın*, 3-5.
- Gör, İ., & Özyörük, T. (2024). Dirichlet Sınır Koşullu Diferansiyel Denklemlerin Bir Sınıfının Geometrik Ortalamalar Optimizasyonu Çözümleri. *ADÜ Fen ve*

Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 19-29.

- Han, J., Jentzen, A., & E. W. (2018). Solving high-dimensional partial differential equations using deep learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(34), 8505-8510.
- İşman, G., & Günel, K. (2024). Periyodik Sınır Değer Problemlerinin Artık Sınır Ağı Çözümleri için Optimizasyon Yöntemleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma. *ADÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 30-39.
- Jin, X., Cai, S., Li, H., & Karniadakis, G. E. (2021). NSFnets (Navier-Stokes flow nets): Physics-informed neural networks for the incompressible Navier-Stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 426, 109951.
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260.
- Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2009). Speech and language processing: An introduction to natural language processing, computational linguistics, and speech recognition. *Prentice Hall Series in Artificial Intelligence*.
- Koh, E., & Kim, N. (2025). Recent progress in scientific machine learning for numerical solutions of partial differential equations. *JMST Advances*, 1-9.
- Kreyszig, E. (2007). *Advanced engineering mathematics 9th edition with Wiley plus set* (Vol. 334). US: John Wiley & Sons.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- Lenstra, J. K., & Aarts, E. (2018). Local search in combinatorial optimization. Princeton University Press.
- Li, Z., Kovachki, N., Azizzadenesheli, K., Liu, B., Bhattacharya, K., Stuart, A., & Anandkumar, A. (2020). Fourier neural operator for parametric partial differential equations. *arXiv preprint arXiv:2010.08895*.
- Lu, L., Meng, X., Mao, Z., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations. *SIAM review*, 63(1), 208-228.
- Meuris, B., Qadeer, S., & Stinis, P. (2023). Machine-learning-based spectral methods for partial differential equations. *Scientific Reports*, 13(1), 1739.
- Mitchell, T. M. (1997). Machine Learning. *Publisher: McGraw Hill*, 31.
- Mishra, S. (2018). A machine learning framework for data driven acceleration of computations of differential equations. *arXiv preprint arXiv:1807.09519*.
- Navarro, L. M., Martin-Moreno, L., & Rodrigo, S. G. (2023). Solving differential equations with deep learning: a beginner's guide. *European Journal of Physi-*

cs, 45(1), 015803.

- Nilsson, N. J. (2009). *The quest for artificial intelligence*. Cambridge University Press.
- Norvig, P., & Russell, S. J. (1995). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall.
- Prince, S. J. (2012). *Computer vision: models, learning, and inference*. Cambridge University Press.
- Rackauckas, C., Ma, Y., Martensen, J., Warner, C., Zubov, K., Supekar, R., ... & Edelman, A. (2020). Universal differential equations for scientific machine learning. *arXiv preprint arXiv:2001.04385*.
- Raissi, M., & Karniadakis, G. E. (2018). Hidden physics models: Machine learning of nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 357, 125-141.
- Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.
- Rubanova, Y., Chen, R. T., & Duvenaud, D. K. (2019). Latent ordinary differential equations for irregularly-sampled time series. *Advances in neural information processing systems*, 32.
- Rudy, S. H., Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2017). Data-driven discovery of partial differential equations. *Science advances*, 3(4), e1602614.
- Samaniego, E., Anitescu, C., Goswami, S., Nguyen-Thanh, V. M., Guo, H., Hamdia, K., ... & Rabczuk, T. (2020). An energy approach to the solution of partial differential equations in computational mechanics via machine learning: Concepts, implementation and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 362, 112790.
- Sirignano, J., & Spiliopoulos, K. (2018). DGM: A deep learning algorithm for solving partial differential equations. *Journal of computational physics*, 375, 1339-1364.
- Stallings, W. (2016). *Computer organization and architecture: designing for performance*. Pearson Education India.
- Szeliski, R. (2022). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Nature.
- Yang, H., Lu, L., Zhong, Y., & Karniadakis, G. E. (2021). Physics-informed neural networks for heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120935.
- Wang, Y., Bai, J., Lin, Z., Wang, Q., Anitescu, C., Sun, J., ... & Liu, Y. (2024). Artificial

intelligence for partial differential equations in computational mechanics: A review. *arXiv preprint arXiv:2410.19843*.

- Zhang, J., & Ma, W. (2020). Data-driven discovery of governing equations for fluid dynamics based on molecular simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 892, A5.
- Zhu, Y., Zabararas, N., Koutsourelakis, P. S., & Perdikaris, P. (2019). Physics-constrained deep learning for high-dimensional surrogate modeling and uncertainty quantification without labeled data. *Journal of Computational Physics*, 394, 56-81.
- Zill, D. G., Cullen, M. R., & Wright, W. S. (1997). *Differential equations with boundary-value problems* (pp. 181-183). Brooks/Cole Publishing Company.

13. BÖLÜM

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ALTINDA *ORIGANUM MINUTIFLORUM*'UN ISPARTA YÖRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ MODELLENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Ali ŞENOL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Orman Fakültesi

Orman Mühendisliği Bölümü

alisenol@isparta.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0003-0237-6215>

Doç. Dr. Serkan ÖZDEMİR

KU Leuven, Department of Earth and Environmental Sciences

Division of Forest, Nature and Landscape

serkanozdemir@isparta.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-9425-3724>

1.GİRİŞ

Türkiye, sahip olduğu stratejik coğrafi konum, iklimsel ve floristik çeşitlilik, yüksek tarımsal üretim potansiyeli ile geniş yüzölçümü gibi özelliklerinden ötürü tıbbi ve aromatik bitkilerin ticareti açısından dünyada önemli bir yere sahiptir (Bayram vd., 2010). Türkiye’de “kekik” olarak kullanılan ve ticareti yapılan türler Lamiaceae familyasına ait bitkiler olmakla birlikte, *Origanum* L. familyanın en önemli cinslerinden biridir. Önemli bir ticari değere sahip olan

ve yaygın olarak ihraç edilen *Origanum* cinsi, Türkiye’de 23 tür ve 32 taksonla temsil edilmektedir (Oflaz vd., 2002).

Küresel kekik piyasasında önemli bir konuma sahip olan *Origanum minutiflorum* O. Schwarz et H. Davis (Lamiaceae), yöresel olarak “Sütçüler kekiği”, “Toka kekiği” veya “Eşek kekiği” olarak da bilinen “Yayla kekiği” yalnızca Türkiye’nin Isparta yöresindeki dağlık alanlarında doğal olarak yetişen endemik bir bitkidir. Bu türün bilinçsiz bir şekilde ve aşırı yoğun olarak toplanması, türün yoğunluğunun her geçen yıl azalmasına sebep olarak türün varlığını tehlikeye sokmaktadır. Doğal sistemler üzerindeki bu tür insan kaynaklı baskılar, sürdürülebilirlik ve risk yönetimi bağlamında farklı disiplinlerde de ele alınmaktadır (Çağlar, 2023). Bu sebeplerden dolayı *O. minutiflorum* türü geleceği tehdit altında gösterilen ve korunması gereken ilk 10 tür arasında yer almaktadır (Özhatay vd., 1997).

Bu tür Anadolu’da hem baharat hem de geleneksel tıbbi bitki olarak kullanılır ve her türlü gıda ürününe çeşni olarak eklenebilir. Türün Türkiye’ye özgü bir dağılıma sahip olması bu çalışmaya büyük önem atfetmektedir. Karvakrol içeriği bakımından zengin olduğu bilinmekte, içeriğinde bulunan uçucu yağ ve bileşenlerinden dolayı eczacılık ve tıp alanında yaygın kullanım alanının olmasından dolayı ayrı bir öneme sahiptir. Nefes açıcı etkisi olup, soğuk algınlığına, boğaz enfeksiyonlarına, diş ağrısına, mide ağrısına ve romatizmaya karşı tedavi amaçlı kullanıldığı bilinmekle birlikte, ayrıca antifungal, antibakteriyel, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri de ihtiva etmektedir (Özhatay vd., 1997; Kılıçgün & Korkmaz, 2014; Albayrak & Aksoy, 2019; Baydar & Avcu, 2020; Yıldız vd., 2023). Endemik *Origanum minutiflorum* türünden elde edilen Sütçüler Kekik Yağı, yüksek karvakrol içeriği ve bölgeye özgü ekolojik koşulları yansıtan karakteristik özellikleri nedeniyle coğrafi işaret belgesiyle tescillenmiştir.

Bir türün coğrafi dağılımı ile çevresel faktörler arasındaki ilişkiyi anlamak ekolojik açıdan önem arz etmektedir. Bitki türlerinin neslini yok olma tehlikesi ile karşı karşıya bırakan, türlerin coğrafi dağılımının ve biyolojik çeşitliliğin azalmasında etkili olan faktörlerin başında küresel iklim değişikliği gelmektedir (Chakraborty vd., 2016; Zhao vd., 2020). Bu süreç, türleri ya uyum sağlamaya ya da yer değiştirmeye zorlar; bu da türlerin devamlılığını tehdit edebilir veya dağılımlarında önemli değişikliklere neden olabilir. Bu bağlamda türlerin iklim değişikliğine verdiği biyolojik tepkilerin 3 farklı durum ile sonuçlanması söz konusudur: (1) Hedef tür, ekolojik nişleri takip ederek başka bir bölgeye göç edebilir, (2) tür, mevcut konumda farklı iklimsel koşullara uyum sağlayabilir ve (3) türde yerel yok oluş gözlemlenebilir (Chakraborty vd., 2016; Dy-

derski vd., 2018).

Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından sunulan 6. Değerlendirme Raporu (AR6) kapsamında küresel sıcaklık artışının 21. yüzyıl sonundaki düzeyinin büyük ölçüde sera gazı emisyonlarının gelecekteki seyrine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre, güçlü ve hızlı emisyon azaltımını içeren SSP1-1.9 senaryosunda küresel ısınmanın yaklaşık 1,5 °C ile sınırlandırılması olası görünürken, daha ılımlı azaltım politikalarını temsil eden SSP1-2.6 senaryosu için sıcaklık artışının 1,8-2,0 °C düzeyinde gerçekleşeceği öngörülmektedir. Orta düzey emisyon eğilimlerinin sürdüğü SSP2-4.5 senaryosunda bu artışın 2,7 °C'ye ulaşabileceği, yüksek emisyon senaryoları olan SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 altında ise küresel sıcaklıkların sırasıyla yaklaşık 3,6 °C ve 4 °C'nin üzerine çıkabileceği bildirilmektedir (IPCC, 2023). Bu projeksiyonlar, iklim değişikliğinin gelecekteki boyutunun emisyon politikalarına doğrudan bağlı olduğunu ve ekosistemler üzerindeki potansiyel etkilerin değerlendirilmesi açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Tür dağılım modellemesi (TDM), sınırlı dağılım verilerinden yararlanarak türlerin ekolojik gereksinimlerini tahmin etmek ve bölgesel ekoloji ile biyocoğrafik özellikler doğrultusunda potansiyel dağılım alanlarını öngörmek amacıyla geliştirilmiş temel bir yöntemdir (Franklin 2013). Türlerin potansiyel dağılım alanlarının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda çeşitli modelleme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında Diskriminant Analizi (DA), Lojistik Regresyon Analizi (LRA), Genelleştirilmiş Eklemeli Model (GAM), Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı Tekniği (CART), Random Forest (RF), GARP ve Maksimum Entropi Yöntemi (MaxEnt) en sık tercih edilen teknikler arasında yer almaktadır. İklim değişikliğinin tür dağılımı üzerindeki etkilerini araştırmak ve habitat uygunluğunu değerlendirmek amacıyla araştırmacılar, mevcut ve gelecekteki tür dağılımını tahmin eden tür dağılım modelleri kullanmışlardır. Türlerin dağılım modellerini daha iyi simüle etmek için son yıllarda maximum entropy (MaxEnt), random forest (RF), GARP gibi çeşitli tür dağılım modelleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu modeller arasında MaxEnt, kısa çalışma süresi, kullanım kolaylığı ve yüksek doğruluk düzeyine sahip tahmin performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu yöntemin ücretsiz MaxEnt 3.4.4 yazılım paketi ve R ve RStudio gibi açık kaynaklı yazılımlarla entegre edilmesi, araştırmacılara erişilebilir ve pratik bir çözüm sunmaktadır (Phillips vd., 2004; Wisz vd., 2008; Phillips vd., 2006; Özdemir, 2022; Çıvğa vd., 2024).

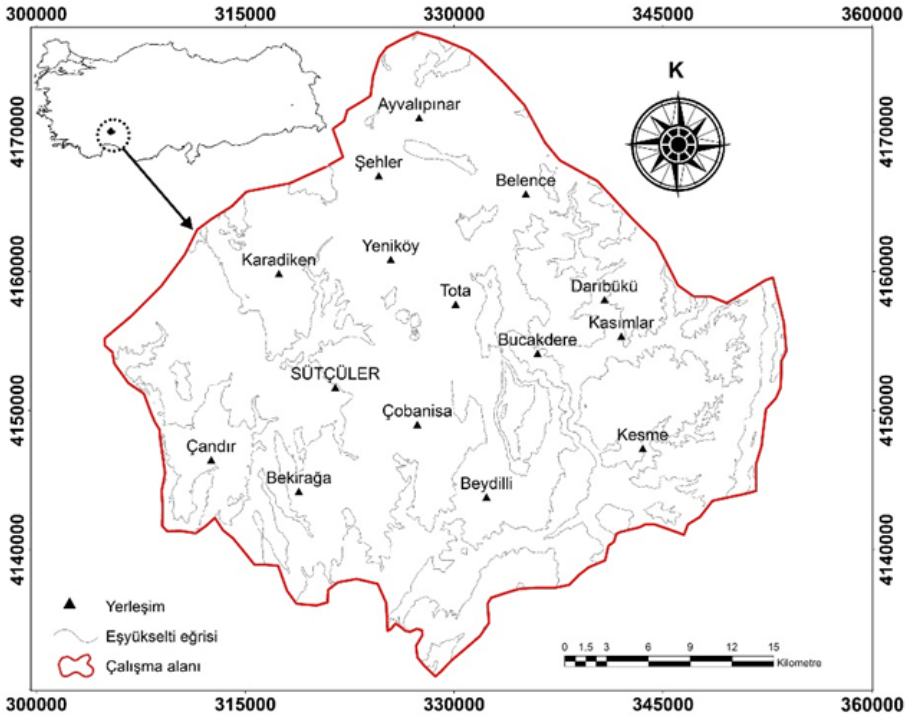
Bu araştırma, Isparta yöresinde doğal yayılış gösteren *O. minutiflorum* türünün günümüz ve gelecekteki potansiyel coğrafi dağılımını modellemeyi

amaçlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin Isparta yöresinde doğal yayılış gösteren *O. minutiflorum* türünün mevcut ve gelecekteki (2100) potansiyel dağılımını MaxEnt yöntemi kullanarak modellemektir. Türün günümüz potansiyel yayılış alanlarını tahmin etmek, iklim değişiminden nasıl etkileneceğini belirlemek amacıyla UKESM1-0-LL iklim değişim modeline bağlı SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarına göre 2081-2100 periyodlarına ait gelecek potansiyel yayılış alanlarını tahmin etmek, günümüz için tahmin edilen potansiyel yayılış alanı ile gelecek senaryolarına göre tahmin edilen alanların nasıl değişim gösterdiğini zamansal ve mekânsal olarak ortaya koymaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı

Bu araştırma, Isparta İli'nin güneyinde yer alan ve yaklaşık 129000 hektarlık bir alanı kaplayan Sütçüler yöresinde yürütülmüştür. Çalışma sahası 30° 47' 49" - 31° 20' 42" doğu boylamları ile 37° 18' 10" - 37° 43' 48" kuzey enlemleri arasında yer almakta olup, yükseltisi ise 200 - 2545 m arasında değişim göstermektedir (Şentürk, 2012). Alanın kuzeyinde Eğirdir ilçesi, Eğirdir Gölü, Kovada Gölü ve Kocadağ (1742 m); kuzeydoğusunda Aksu, Yenişarbademli yerleşimleriyle Beyşehir Gölü, Kuyucak Dağı (2337 m), Tota Yaylası ve Dedegöl Dağı (2980 m); doğusunda Konya iline bağlı Beyşehir, Seydişehir ilçeleri ve Beyşehir Gölünün bir kısmıyla Sarp Dağ (2548 m); güneyinde Antalya İline bağlı Serik, Manavgat ilçeleriyle Akdağ ve Sanlı Yaylası; güneybatısında Karacaören I Baraj Gölü ve Bucak ilçesi; batı ve kuzeybatıdaysa Karadağ ve Burdur Gölü yer almaktadır. Çalışma alanında bulunan yerleşim yerleri ise lokasyon haritasında gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Isparta-Sütçüler yöresinin yer bulduru haritası

Çalışma alanı, Aksu Çayı ve Köprüsu havzalarının oluşturduğu jeomorfolojik birimler içerisinde yer almakta olup, Bozburun, Sarpdağ ve Tota dağları bu iki havzayı birbirinden ayırmaktadır. Arazi genel olarak dik yamaçlı ve engebeli bir topoğrafyaya sahiptir. Araştırma alanının Akdeniz Bölgesi ve Batı Toroslar kuşağı içerisinde konumlanması nedeniyle, jeolojik birimler ağırlıklı olarak kireçtaşı (kalker) litolojisinden oluşmaktadır. Bu litolojik yapı, bölgede karakteristik olarak gelişen kırmızı Akdeniz orman topraklarının (terra-rossa) yaygınlığını desteklemekle birlikte, yükselti ve topografik değişimlere bağlı olarak yer yer esmer orman toprakları da görülmektedir (Şentürk, 2012; Süel, 2014).

Çalışmanın gerçekleştirildiği Sütçüler yöresi floristik açıdan yüksek çeşitliliğe sahip bir ekosistemdir. Özçelik & Korkmaz (2002), yaptıkları çalışmada yörede yaklaşık olarak 63 familya ve 225 cinse bağlı toplam 478 bitki türü tespit etmişlerdir. Bitki türlerinin yarısından fazlası Fabaceae, Asteraceae, Caryophyllaceae, Lamiaceae, Brassicaceae, Boraginaceae, Rosaceae, Apiaceae, Scrophulariaceae ve Ranunculaceae familyalarına ait olup bu türlerden 118 (yaklaşık %25'i) 'inin endemik olduğu ifade edilmiştir. Araştırma alanı, Akde-

niz iklimi ile karasal iklim geçiş bölgesinde yer almaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık 14,1 °C, ortalama yıllık yağış miktarı ise 950,1 mm'dir. En yüksek sıcaklık 37,2 °C ile temmuz ayında, en düşük sıcaklık -12,2 °C ile şubat ayında ölçülmüştür. Yağışın %35,7'si kış aylarında, %20,9'u ilkbaharda, %5,4'ü yaz döneminde ve %38'i sonbaharda gerçekleşmektedir. Bölge, yaz aylarında yaklaşık üç aylık belirgin bir kurak dönem yaşamaktadır (Süel, 2014).

Çalışma alanının seçiminde, bölgenin ekosistem bütünlüğü, yüksek bitkisel çeşitlilik düzeyi ve yaban hayatı varlığı belirleyici unsurlar arasında yer almıştır. Bunun yanı sıra, Akdeniz Havzası'nın iklim değişikliğinden etkilenme potansiyeli en yüksek bölgelerden biri olarak tanımlanması, araştırma sahasının tercih edilmesinde önemli bir gerekçe oluşturmuştur. Dağlık ekosistemlerin türlerin yer değiştirme dinamiklerinin en belirgin şekilde ortaya çıktığı habitatlar arasında bulunması da çalışma alanının seçiminde etkili olan bir diğer faktördür. Nitekim, yüksek rakım ve düşük sıcaklık rejimleriyle karakterize edilen bu ekosistemlerde iklim değişikliğine bağlı etkilerin daha şiddetli ve belirgin biçimde görülebileceği çeşitli araştırmalar tarafından ortaya konmuştur (Pauli vd., 2007; Pauli vd., 2012).

2.2. Arazi Çalışmaları

Bu araştırma *O. minutiflorum* türünün büyük bir çoğunluğunun yayılış gösterdiği Sütçüler İlçesi'nde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle örnek alanların sahaya homojen olarak dağıtılabilmesi için alana keşif gezileri düzenlenmiştir. Yapılan envanter çalışmaları neticesinde 20x20 metre boyutlarında 400 m² büyüklüğünde 219 farklı örnek alan içerisinde bölgede ekonomik öneme sahip hedef türe rastlanılmış ve koordinatları kaydedilmiştir. Dolayısıyla türün görüldüğü alanlarda var verisi, görülmediği alanlarda ise yok verisi kaydedilmiştir. Bu örnek alanlarda ayrıca tanımlayıcı bazı çevresel faktörler (yükselti, eğim, bakı, yamaç konumu, arazi yüzey formu vb.) kaydedilmiştir. Saha çalışmalarının tamamlanmasının ardından hedef türün MaxEnt modellemesiyle potansiyel dağılım alanlarına yönelik haritaları elde etmek amacıyla çevresel faktörlerin sayısal altlık haritaları oluşturulmuştur.

2.3. Çevresel Değişkenlerin Belirlenmesi

Arazi çalışması tamamlandıktan sonra hedef türe ait potansiyel dağılım

alanlarını modellemek ve haritalarını elde etmek amacıyla çevresel değişkenlerin dijital altlık haritaları oluşturulmuştur. Çalışma alanına ilişkin sayısal altlık haritalar, ArcGIS yazılımının ArcMap arayüzü kullanılarak hazırlanmıştır. Sayısal yükseklik modeli (DEM) verileri, EarthData veri tabanından “tif” formatında indirilmiş, ardından ArcMap ortamında birleştirilerek çalışma alanının sınırlarına göre kesilmiştir. Bir sonraki aşamada dem verisi temel alınarak, eğim, bakı ve gölgelenme indeksi haritaları “Spatial Analyst Tools” modülü kullanılarak üretilmiştir (Mitchell, 1999). Topografik pozisyon indeksi (TPI) ve güneşlenme indeksi haritaları ise Jenness (2006) tarafından geliştirilen “Topography Tools” eklentisi aracılığıyla oluşturulmuştur. Engebililik indeksi (ruggedness index) haritası “Terrain Tools” eklentisi kullanılarak, Pürüzlülük indeksi (roughness index) haritası ise “Geomorphometry and Gradient Metrics Tools” eklentisi yardımıyla üretilmiştir (Riley vd., 1999). Solar radyasyon indeksi haritası (solar radiation index) Mitchell (1999) doğrultusunda yine “Spatial Analyst Tools” ile oluşturulmuştur.

Bu temel altlık haritaların oluşturulmasını takiben, literatürdeki farklı denklemler yardımıyla Radyasyon İndeksi (RI) (Denklem 1) (Moisen & Frescino, 2002; Aertsen vd., 2010), Bakı Uygunluk İndeksi (BUI) (Denklem 2) (McCune & Keon, 2002) ve Sıcaklık İndeksi (SI) (Denklem 3) (Parker, 1988) haritaları ArcMap yazılımındaki “Raster Calculator” aracı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu verilen indekslere ilişkin denklemler aşağıda sunulmuştur:

$$RI = (1 - \cos((\pi/180) * (Q - 30))) / 2 \quad (\text{Denklem 1})$$

Formülde kullanılan “Q” terimi, bakının kuzeye göre sahip olduğu açısıl konumu ifade etmektedir (Moisen & Frescino, 2002; Aertsen vd., 2010).

$$BUI = \cos(Q_{\max} - Q) + 1 \quad (\text{Denklem 2})$$

Yukarıdaki denklemde “Q” ifadesi bakı değerini, “Q_{max}” ise bakının radyan cinsinden maksimum değerini temsil etmektedir ve bu değer 202,5° olarak kabul edilmektedir (McCune & Keon, 2002).

$$SI = \cos((A - 202,5) * \tan(Eğim)) \quad (\text{Denklem 3})$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan A terimi bakı değerinin radyan cinsinden ifadesini göstermekte olup, 202,5° değeri ise güney-güneybatı yönelimli yamaçlarda gözlenen maksimum ısı yükü temsil etmektedir (Parker, 1988).

Fick & Hijmans (2017) tarafından geliştirilen 19 farklı biyoklimatik de-

ğişkeni içeren günümüz ve geleceğe yönelik iklim verileri WorldClim veri tabanından temin edilmiştir. 2081-2100 dönemini kapsayan geleceğe yönelik projeksiyonlar için UKESM1-0-LL (United Kingdom Earth System Model) iklim modeli kullanılmıştır (Sellar vd., 2019). Gelecek iklim verileri, üç farklı sosyoekonomik yol (SSP) senaryosu-SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5-altında, 30 ark saniyelik (~1 km) mekânsal çözünürlükte indirilmiştir. Dünya ölçeğinde temin edilen bu altlık haritalar, çalışma alanının sınırlarına uygun biçimde kesilerek, geometrik olarak düzeltilmiş ve istatistiksel analizlerde kullanıma hazır duruma getirilmiştir.

Çalışma kapsamında hedef türün potansiyel dağılım alanlarının modelleme sürecinde, çalışmaya dahil edilen 15 topografik değişken ile 19 biyoiklim değişkeni ve atanan kısaltma kodları aşağıda verilmiştir (Tablo 1). Topografik ve iklimsel değişkenlere ait tüm çevresel altlık haritalar oluşturulduktan sonra, daha sonraki analizler için çalışma alanı ölçeğinde ASCII formatında kaydedilmiştir.

Tablo1. Topografik ve Biyoiklim değişkenlerine ait açıklamalar

Biyoiklim değişkenleri	Birim	Kodlar
Yıllık Ortalama Sıcaklık	°C	Bio1
Gündüz Sınıf Ortalaması	°C	Bio2
Eş Isı	°C	Bio3
Mevsimsel Sıcaklık	°C	Bio4
En Sıcak Ayın Maksimum Sıcaklığı	°C	Bio5
En Soğuk Ayın Minimum Sıcaklığı	°C	Bio6
Yıllık Sıcaklık Aralığı	°C	Bio7
En Nemli Çeyreğin Ortalama Sıcaklığı	°C	Bio8
En Kurak Çeyreğin Ortalama Sıcaklığı	°C	Bio9
En Sıcak Çeyreğin Ortalama Sıcaklığı	°C	Bio10
En Soğuk Çeyreğin Ortalama Sıcaklığı	°C	Bio11

Yıllık Toplam Yağış	mm	Bio12
En Nemli Ayın Yağışı	mm	Bio13
En Kurak Ayın Yağışı	mm	Bio14
Mevsimsel Yağış	%	Bio15
En Nemli Çeyreğin Yağışı	mm	Bio16
En Kurak Çeyreğin Yağışı	mm	Bio17
En Sıcak Çeyreğin Yağışı	mm	Bio18
En Soğuk Çeyreğin Yağışı	mm	Bio19
Yükselti	m	Yükslt
Eğim	°	Eğim
Bakı	°	Bakı
Radyasyon İndeksi		RI
Sıcaklık İndeksi		SI
Topografik Pozisyon İndeksi		TPI
Bakı Uygunluk İndeksi		BUI
Topografik Nemlilik İndeksi		TNI
Solar Radyasyon İndeksi		SOLRAD
Arazi Yüzü Formu İndeksi		AYFI
Gölgelenme İndeksi		GI
Engelilik İndeksi		EI
Pürüzlülük İndeksi		PI
Solar Aydınlanma İndeksi		SAI
Yamaç Konum İndeksi		YKI

2.4. Değişken Seçimi ve İstatistiksel Analiz Süreci

İstatistiksel analiz aşamasında öncelikle modelleme aşamasında ortaya çıkabilecek çoklu doğrusal bağlantı sorununu ortadan kaldırmak amacıyla çevresel değişkenler üzerinde Pearson korelasyon analizi uygulanmıştır (Özdamar, 2002). Çoklu bağlantı problemi, bağımsız değişkenlerin kendi aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle bağımlı değişken üzerindeki gerçek etkinin sağlıklı bir biçimde ortaya konamaması şeklinde tanımlanmaktadır (Alin, 2010). Pearson korelasyon analizi sonucunda yüksek düzeyde ilişkili olduğu belirlenen (Pearson's $r \geq 0,80$) değişken çiftleri arasından seçim, uzman görüşü doğrultusunda yapılmıştır. Başka bir ifadeyle, literatürde türün dağılımı üzerinde daha etkili olduğu bilinen değişken, yüksek korelasyon gösteren iki değişkenden biri olarak tercih edilmiş ve diğeri analizlerden çıkarılmıştır.

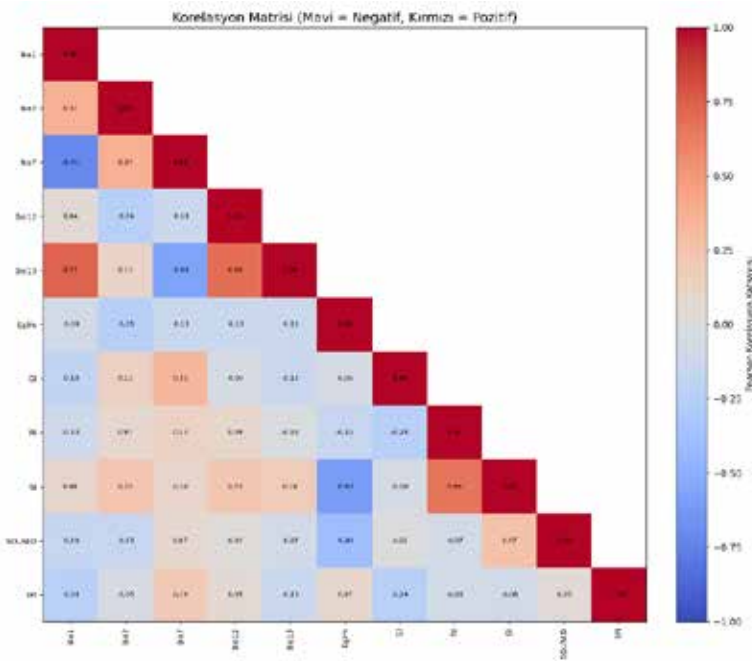
Modelleme aşamasında kullanılan yöntemler bağlantı yöntemleri ve mekanistik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde Mekanistik yöntemlere göre çok daha fazla tercih edilen Bağlantı yöntemleri de kendi içerisinde, profil teknikleri ve grup ayırım teknikleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bağımlı değişkene yönelik olarak sadece var verisinin olması durumunda profil teknikleri, ikili kategorik veri olması durumunda ise grup ayırım teknikleri olarak isimlendirilmektedir. Profil tekniklerine yönelik en bilinen yöntemler Maksimum Entropi (Maximum Entropy: MaxEnt), Ekolojik Niş Faktör Analizi (Ecological Niche Factor Analysis: ENFA), BIOCLIM (Bioclimatic Envelope Models: BIOCLIM) ve GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction:)'dır (Çıvğa, 2023; Özdemir, 2024).

O. minutiflorum türünün potansiyel dağılımını modellemek amacıyla Maksimum Entropi (MaxEnt) yöntemi kullanılmıştır. Son yıllarda ekolojik modelleme çalışmalarında en sık tercih edilen yöntemlerden biri olan MaxEnt, yalnızca var verileriyle çalışabilmesi ve sınırlı veriyle dahi açıklayıcı sonuçlar üretebilmesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, modelleme sürecinde test verisi oranı %10 olacak şekilde bootstrap seçeneği tercih edilmiş ve 10 tekkerrürlü modeller oluşturulmuştur. Bootstrap yöntemi, sınırlı veriyle daha güvenilir sonuçlar ürettiği için tercih edilmiştir. Analizler sonucunda ortaya çıkan modellerin geçerlilikleri ise eğrinin altında kalan alan (AUC: Area Under Curve) değerleri yardımı ile test edilmiştir. Swets (1988), AUC değerlerini sınıflandırdığı çalışmasında, 0,90'ın üzerindeki değerleri "mükemmel", 0,81-0,90 aralığını "iyi", 0,71-0,80 aralığını "orta", 0,61-0,70 aralığını "zayıf" ve 0,60'ın altındaki değerleri ise "başarısız" olarak tanımlamıştır. Yapılan analizler sonucunda, 0-1 aralığında değişen olasılık değerlerine sahip türün potansiyel dağılımını gösteren bir harita elde edilmiştir. Modelin doğruluk değerlendirmesi tamamlandıktan

sonra, 2081-2100 dönemine ilişkin tür dağılım projeksiyonları UKESM1-0-LL projeksiyon sistemi kullanılarak farklı emisyon senaryoları (SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında üretilmiştir. Son aşamada, güncel ve geleceğe yönelik dağılım haritaları karşılaştırılarak, çalışma yöresinde *O. minutiflorum* türünün iklim değişikliğinden en fazla etkilenme olasılığı bulunan alanlar belirlenmiştir.

3. BULGULAR

O. minutiflorum türünün dağılımında etkili olduğu düşünülen çevresel değişkenler metot bölümünde bahsedildiği şekilde elde edilmiştir. Belirlenen çevresel değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantıyı en aza indirmek ve modelin aşırı uyumunu önlemek için Pearson Korelasyon analizi uygulanmıştır (Şekil 2). Modelleme öncesinde, çevresel değişkenler arasındaki çoklu doğrusal bağlantıyı azaltmak amacıyla uygulanan analiz neticesinde $|r| \geq 0,8$ olan çevresel değişkenler elenerek 11 adet değişken ile modelleme aşamasına geçilmesine karar verilmiştir. Modelleme aşamasına dahil edilen değişkenler Bio1, Bio2, Bio7, Bio12, Bio13, Egim, GI, RI, SI, SOLRAD ve TPI olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan çevresel değişkenler arasındaki Pearson korelasyon matrisi

Maksimum entropi ilkesine dayanan MaxEnt yazılımının 3.4.4 sürümü, *O. minutiflorum* türünün habitat uygunluğunun değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Sadece var verileriyle çalışabilmesi ve güçlü istatistiksel temele sahip olması nedeniyle MaxEnt yöntemi, güvenilir tahminsel modeller üretebilmesi açısından yaygın olarak tercih edilmektedir (Phillips vd., 2006). Modelin güvenilirliğini artırmak amacıyla, türlere ait gözlem kayıtlarının %90'ı eğitim verisi olarak kullanılırken, kalan %10'luk kısım doğrulama sürecine ayrılmıştır. Modelleme süreci 1000 iterasyon ile sınırlandırılmış olup ayrıca model doğruluğunu daha da iyileştirmek ve değerlendirmek amacıyla 10 katlı çapraz doğrulama yaklaşımı uygulanmıştır (Al-Khalaf vd., 2023).

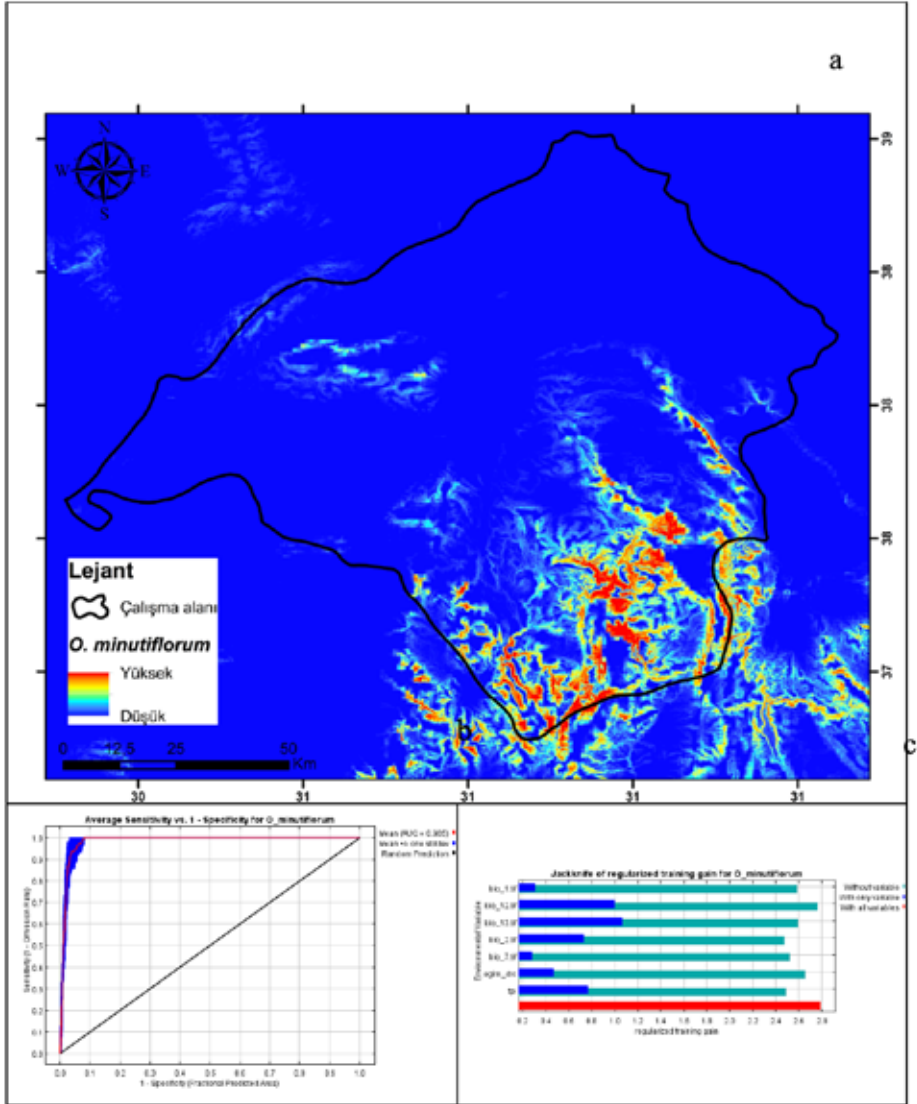
3.1. *O. minutiflorum*'un Günümüz İklim Koşullarına Göre Potansiyel Dağılım Modellemesi

Modelleme sürecinde, bir önceki aşamada günümüz iklim koşulları için seçilen 11 çevresel değişken, MaxEnt yöntemi kullanılarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. *O. minutiflorum* türünün potansiyel dağılım alanlarının belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen MaxEnt modellemesinde 10 katlı çapraz geçerlilik testi uygulanmış ve iterasyon sayısı 1000 olarak ayarlanmıştır (Phillips vd., 2006). Bu süreçte, modele en yüksek katkıyı sağlayan değişkenleri belirlemek için, katkı oranlarına dayalı olarak değişken eleme yöntemi kullanılmış, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki en iyi ilişkiyi açıklayan model seçilmiştir. Modele katkı sağlamayan değişkenler bu aşamada elenmiştir. Tür dağılımı üzerinde etkili olan başlıca çevresel değişkenlerin belirlenmesi amacıyla Jackknife testi uygulanmıştır. (Sallam vd., 2013). Modelin tüm çalışma alanına yaygınlaştırılmasıyla, günümüz iklim koşulları altında türün potansiyel dağılım alanlarını gösteren bir harita elde edilmiştir (Şekil 3a). *O. minutiflorum* türü için oluşturulan modelin ortalama veri setine ait AUC değerlerini gösteren ROC eğrisi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3b). Elde edilen modelin ortalama AUC'si 0,985 olarak tespit edilmiştir. Bu değer, modelin rastgele tahminden belirgin biçimde üstün olduğunu ve türün potansiyel dağılımını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. Swets (1988) tarafından önerilen sınıflandırma esas alındığında, elde edilen model "mükemmel" performans kategorisinde yer almaktadır.

Jackknife testi grafiğinde açık mavi renkli çubuklar, her bir değişkenin modelden çıkarılması durumunda model performansında meydana gelen değişimi temsil etmekte olup, ilgili değişkenin model kararlılığı üzerindeki etkisini gös-

termektedir. Bir değişkenin çıkarılmasıyla eğitim kazancında gözlenen belirgin azalma, söz konusu değişkenin modele anlamlı düzeyde katkı sağladığını ifade etmektedir. Koyu mavi çubuklar, her bir değişkenin modele bağımsız katkısını yansıtırken, kırmızı çubuklar modelde yer alan tüm değişkenlerin birlikte oluşturduğu toplam etkiyi göstermektedir. Model değerlendirme kriterlerine göre, koyu mavi çubukların açık mavi çubukları aşmaması beklenmekte olup, aksi durumlar modelde tutarsızlık olasılığına işaret ederek daha ayrıntılı inceleme gerektirebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen Jackknife testi sonuçları, modele dâhil edilen tüm değişkenlerin tutarlı ve güvenilir biçimde modele katkı sağladığını ortaya koymuştur (Şekil 3c).

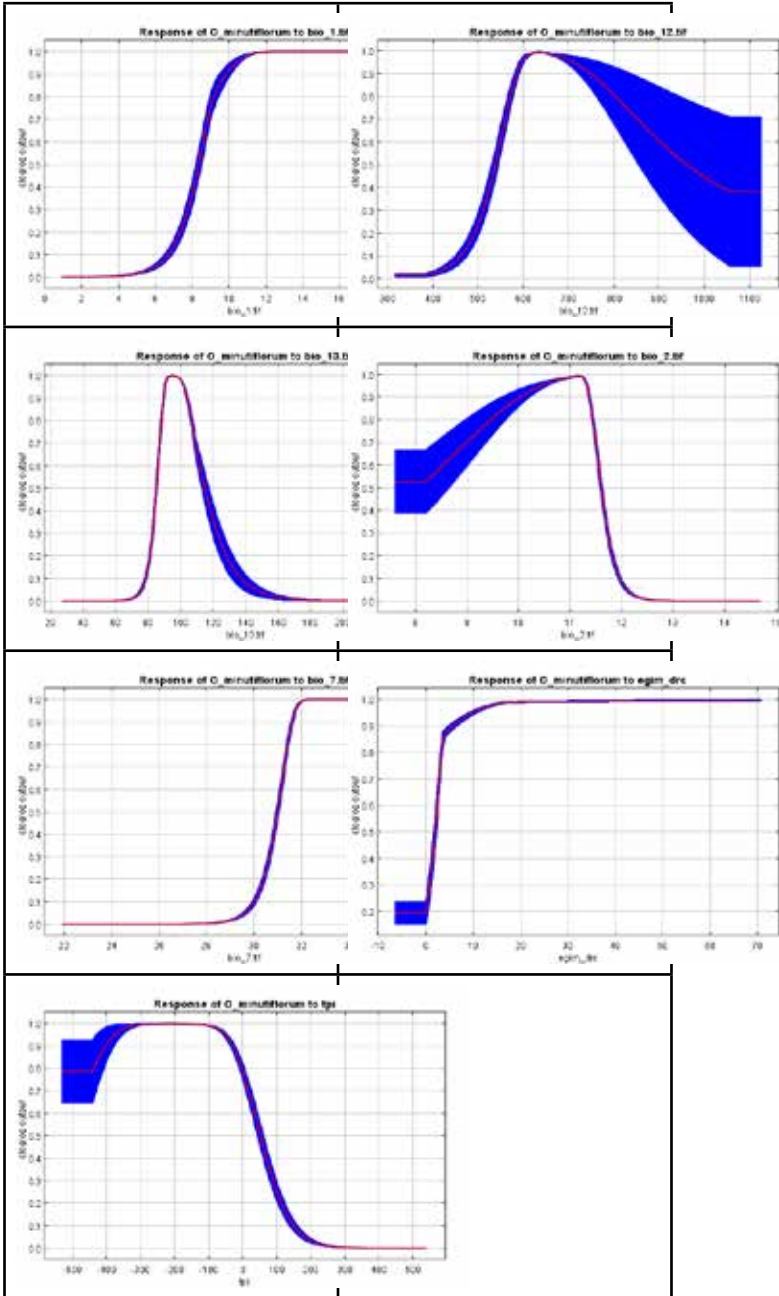
Jackknife testi sonuçları, çevresel değişkenlerin *O. minutiflorum*'un potansiyel dağılımını açıklamadaki göreceli etkilerini ortaya koymuştur. Buna göre, Bio13 (en yağışlı ayın yağışı) değişkeni tek başına kullanıldığında en yüksek düzenlenmiş eğitim kazancını üretmiş olup, tür dağılımını açıklamada güçlü ve bağımsız bir bilgi içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, modelden çıkarıldığında kazancı en fazla düşüren değişkenin Bio2 (günlük sıcaklık farkı ortalaması) olması, bu değişkenin diğer çevresel faktörler tarafından telafi edilemeyen özgün bir bilgi sunduğunu ortaya koymaktadır. Diğer iklimsel ve topografik değişkenler ise modele katkı sağlamakla birlikte, etkilerinin büyük ölçüde iklim değişkenleriyle örtüştüğü anlaşılmaktadır. Bu bulgular, türün potansiyel dağılımının öncelikle yağış ve sıcaklık rejimleri tarafından belirlendiğini göstermektedir.



Şekil 3. a) Günümüz iklim koşullarına göre *O. minutiflorum* türü için elde edilen potansiyel dağılım haritası; b) *O. minutiflorum* türüne ait modelin ortalama veri setine ait ROC eğrisi ve AUC değeri; c) *O. minutiflorum* türüne ait modeli oluşturan değişkenlerin Jackknife testi sonuçları

Modelde yer alan çevresel değişkenlerin etkileri ve bu değişkenlerle hedef tür arasındaki ilişkiler, yanıt eğrileri aracılığıyla değerlendirilmiştir. Modele katkı sağlayan her bir değişkene ait marjinal yanıt eğrileri Şekil 4'te sunulmuş

olup, söz konusu değişkenlerin habitat uygunluğu tahminleri üzerindeki etkileri bu eğriler yardımıyla görsel olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 4. *O. minutiflorum* türüne ait modeli oluşturan değişkenlerin marjinal yanıt eğrileri

Marjinal yanıt eğrileri incelendiğinde, *O. minutiflorum* türünün habitat uygunluğunun Bio1 değişkeni (yıllık ortalama sıcaklık) ile belirgin bir ilişki sergilediği görülmektedir. Buna göre, düşük sıcaklık değerlerinde tür için tahmin edilen uygunluk oldukça sınırlı iken, yaklaşık 7-10 °C aralığında habitat uygunluğunun hızlı bir artış gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu eşik değerin ardından uygunluk değerlerinin doyumluğa ulaştığı ve daha yüksek sıcaklıklarda önemli bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Bu bulgu, türün termal tolerans aralığının görece dar olduğunu ve sıcaklık koşullarının potansiyel dağılım üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Yıllık toplam yağışı temsil eden Bio12 değişkenine ait marjinal yanıt eğrisi, *O. minutiflorum*'un habitat uygunluğunun yağış miktarına duyarlı bir tepki verdiğini göstermektedir. Düşük yağış değerlerinde uygunluk oldukça sınırlı düzeyde kalırken, yaklaşık 450-650 mm aralığında uygunluğun hızlı biçimde arttığı ve bu aralıkta maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu eşik değerin üzerinde, yağış miktarındaki artışa paralel olarak habitat uygunluğunun kademeli biçimde azaldığı gözlenmiştir. Özellikle 800 mm'nin üzerindeki yağış koşullarında uygunluk değerlerindeki düşüşün belirginleşmesi, türün aşırı nemli koşullara karşı olumsuz tepki verdiğini ortaya koymaktadır.

En yağışlı ayın yağış miktarını temsil eden Bio13 değişkenine ait marjinal yanıt eğrisi, *O. minutiflorum*'un habitat uygunluğunun bu değişkene karşı belirgin ve tek tepeli bir yanıt verdiğini göstermektedir. Düşük yağış değerlerinde tür için tahmin edilen uygunluk oldukça sınırlı iken, yaklaşık 80-100 mm aralığında uygunluğun hızla arttığı ve bu aralıkta maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu optimum aralığın aşılmasıyla birlikte, yağış miktarındaki artışa paralel olarak habitat uygunluğunun keskin biçimde azaldığı gözlenmiştir.

Günlük sıcaklık farkının ortalamasını temsil eden Bio2 değişkenine ait marjinal yanıt eğrisi, *O. minutiflorum*'un düşük günlük sıcaklık farkı değerlerinde habitat uygunluğu görece orta düzeylerde seyrederken, yaklaşık 9-11 °C aralığında uygunluğun kademeli olarak arttığı ve bu aralıkta maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Ancak bu eşik değerin aşılmasıyla birlikte, özellikle 11,5 °C'nin üzerindeki günlük sıcaklık farklarında uygunluğun keskin biçimde azaldığı ve tür için elverişsiz koşulların oluştuğu gözlenmiştir. Bu sonuç, günlük sıcaklık farkının türün potansiyel dağılımını sınırlandıran temel iklimsel değişkenlerden biri olduğunu göstermektedir.

Yıllık sıcaklık aralığını temsil eden Bio2 değişkenine ait marjinal yanıt eğrisi, *O. minutiflorum*'un düşük yıllık sıcaklık aralığı değerlerinde tür için tahmin edilen uygunluk oldukça sınırlı düzeyde kalırken, yaklaşık 30-32 °C aralığın-

da uygunluğun hızla arttığı ve bu eşik değer sonrasında maksimum seviyelere ulaştığı belirlenmiştir.

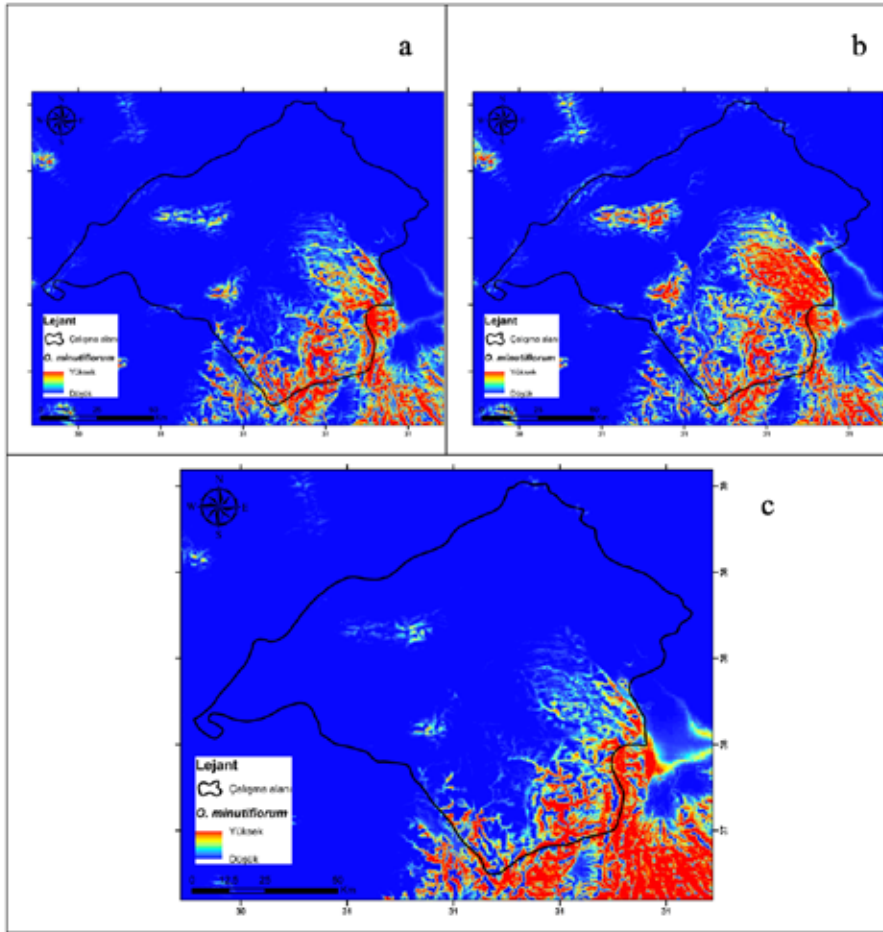
Eğim faktörüne ait marjinal yanıt eğrisi, *O. minutiflorum*'un habitat uygunluğunun bakı koşullarına duyarlı bir tepki verdiğini göstermektedir. Eğim değerinin artmasıyla birlikte habitat uygunluğunun hızlı biçimde yükseldiği ve kısa bir eşik aralığının ardından maksimum seviyelere ulaştığı belirlenmiştir. Yaklaşık 15° ve üzerindeki eğim değerlerinde uygunluğun yüksek ve istikrarlı bir seyir izlemesi, türün belirli bakı yönelimlerine sahip yamaçları tercih ettiğini ortaya koymaktadır.

Topografik Pozisyon İndeksi'ni (TPI) temsil eden değişkene ait marjinal yanıt eğrisi incelendiğinde, negatif TPI değerlerinde, yani vadiler ve alt yamaçları temsil eden alanlarda habitat uygunluğunun yüksek seviyelerde seyrettiği; TPI değerinin artmasıyla birlikte özellikle sifıra yakın ve pozitif TPI değerlerinde yani sırt ve tepe konumlarını ifade eden alanlarda uygunluk değerlerinin hızla düştüğü ve tür için elverişsiz koşulların hâkim olduğu gözlenmiştir. Yanıt eğrisinin bu belirgin azalan eğilimi, *O. minutiflorum*'un topografik olarak daha korunaklı, mikroklimatik açıdan dengeli ve nem tutma kapasitesi yüksek alanları tercih ettiğini göstermektedir.

MaxEnt yöntemiyle elde edilen potansiyel dağılım haritası incelendiğinde, *O. minutiflorum* için yüksek habitat uygunluğuna sahip alanların çalışma sahasının özellikle güney, güneydoğu ve doğu kesimlerinde yoğunlaştığını göstermektedir. Orta yükselti kuşaklarında ve topografik olarak engebeli alanlarda uygunluk değerleri artarken, zirve alanları ile daha düz ve alçak kesimlerde uygunluğun belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Bu mekânsal dağılım, türün mikroklimatik koşulların daha elverişli olduğu habitatları tercih ettiğini ortaya koymaktadır.

3.2. *O. minutiflorum*'un İklim Değişimine Göre Potansiyel Dağılım Modellemesi

Günümüz iklim koşullarına göre potansiyel dağılım haritasının oluşturulmasının ardından, UKESM1-0-LL iklim projeksiyonu kapsamında 2081-2100 dönemine ait üç farklı iklim senaryosu için geleceğe yönelik potansiyel dağılım haritaları üretilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. a) *O. minutiflorum* türü için 2100 yılına ait SSP1-2.6 senaryosuna göre oluşturulan potansiyel dağılım haritası; b) *O. minutiflorum* türü için 2100 yılına ait SSP2-4.5 senaryosuna göre oluşturulan potansiyel dağılım haritası; c) *O. minutiflorum* türü için 2100 yılına ait SSP5-8.5 senaryosuna göre oluşturulan potansiyel dağılım haritası

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Küresel sıcaklık artışı, türlerin varlığını tehdit eden çevresel baskıların en önemlisidir (Duan vd., 2022). Bu çalışma, Isparta İli için endemik bir tür olan *O. minutiflorum*'un dağılımının iklim değişikliğinden nasıl etkilendiğini ayrıntılı biçimde incelemekte; aynı zamanda bu değişimlerin daha geniş ölçekteki ekolojik sonuçlarını değerlendirerek, odun dışı orman ürünü açısından önemli olan bu tür için hedefe yönelik koruma stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Küresel ısınmanın artmasıyla birlikte, söz konusu türün habitatları da önemli ölçüde değişmektedir (Weiskopf vd., 2020). Bitki türlerinin iklim değişikliğine verdiği tepkilerin ortaya konulmasına yönelik çalışmalar, özellikle ekolojik ve ekonomik açıdan büyük öneme sahip türler için etkili koruma ve yönetim planlarının oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır (Khan vd., 2022).

Yaygın olarak kullanılan bir tür dağılım modelleme aracı olan MaxEnt, hedef türe ait var verilerini çevresel değişkenlerle entegre ederek habitat uygunluk haritaları üretmektedir. Bu haritalar, uygunluk derecelerine göre çevresel elverişliliğe sahip alanların mekânsal dağılımını ortaya koyarak, bir türün farklı coğrafyalar üzerindeki potansiyel yayılışını ve yoğunlaşma alanlarını temsil etmektedir (Chen & Peterson, 2000). Türlerin coğrafi dağılımını şekillendiren çevresel faktörler arasında iklim, en belirleyici unsur olarak öne çıkmaktadır (Qin vd., 2017). Özellikle sıcaklık, yağış ve nem gibi iklimsel değişkenler, türlerin yayılışı ve alana yerleşmesi üzerinde temel rol oynamaktadır (Khalaf vd., 2024). Model performansının değerlendirilmesinde ROC eğrisi, eşik değer seçiminden etkilenmemesi sebebiyle oldukça güvenilir bir araç olarak kabul edilmektedir. Model tutarlılığını test etmek için, genellikle on tekrarlı AUC değerleri analiz edilir. Bu çalışmada, on tekerrürün ortalama AUC değeri 0,985'e ulaşmış olup, modelin kestirim gücünün son derece yüksek bir seviyede olduğunu göstermektedir. Mevcut modelleme teknikleri arasında Tür Dağılım Modelleri, güncel ve geleceğe yönelik senaryolar altında tür varlığını belirleyen çevresel etmenleri incelemek amacıyla ekologlar, koruma biyologları ve ormancılık alanında çalışan uzmanlar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır (Khan vd., 2022).

Bitki türlerinin mekânsal dağılımının haritalandırılması, doğal habitatları içerisinde türlerin sürdürülebilir kullanımının sağlanması ve restorasyon çalışmalarının yönlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Franklin, 2013; Zhang vd., 2018). Günümüzde Ekolojik Niş Modellemesi, aşırı sıcaklıklar, nem ve yağış gibi iklimsel faktörlerin türlerin potansiyel coğrafi dağılımları üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Phil-

lips & Dudík, 2008; John vd., 2009; Yang vd., 2013; Çoban vd., 2020). Farklı iklim değişikliği senaryoları altında elde edilen kestirimler, uygun habitat alanlarında belirgin bir azalma eğilimi olduğunu göstermekte olup, bu durum farklı taksonomik gruplar üzerinde yapılan önceki araştırmaları doğrulamaktadır. Söz konusu değişimler, habitatların korunması ve ekolojik açıdan kritik türlerin sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi için sürekli izleme çalışmalarının yürütülmesi ve etkili koruma stratejilerinin hayata geçirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır (Khanum vd., 2013; Dülgeroğlu & Aksoy, 2018; Bowgen vd., 2022). Birçok araştırmada benzer yöntemler kullanılarak, iklim değişikliğinin ekolojik ve ekonomik açıdan önemli türler üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve bu çalışmalar çoğunlukla koruma planlamasına temel oluşturmuştur. Tür Dağılım Modelleri aracılığıyla yapılan bu çalışmalar, iklim projeksiyonlarına bağlı olarak yüksek öneme sahip pek çok türün coğrafi dağılımında daralma yaşanabileceğini ortaya koymuştur (Kumar vd., 2013; Khalid vd., 2022).

İklim değişikliğinin, orman ekosistemlerinde türlerin doğal yayılış alanlarını değiştirmesi ve biyolojik çeşitlilik kaybını hızlandırması öngörülmektedir (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Çevresel stres koşullarına verilen biyolojik tepkilerin yalnızca bitkilerde değil, fauna üzerinde de farklı biçimlerde ortaya çıkabildiği bildirilmektedir (Başkar & Çağlar, 2023). Bu etkilerin azaltılmasında, tür dağılım modelleri; kritik habitatların belirlenmesi ve hassas türlerin hayatta kalma olasılığının en yüksek olduğu alanlara yönelik koruma önceliklerinin yönlendirilmesi açısından önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır (Qin vd., 2017). Bununla birlikte, bu modellerin etkinliği büyük ölçüde doğru ve kapsamlı dağılım verilerinin mevcudiyetine bağlı olup, özellikle sınırlı gözlem kaydına sahip ya da nadir türler söz konusu olduğunda bu durum önemli bir kısıt oluşturmaktadır (Newbold, 2010; Marcer vd., 2013).

Bu çalışmada *O. minutiflorum* türünün güncel ve geleceğe yönelik potansiyel dağılımı MaxEnt modeli ile tahmin edilmiştir. Modelleme sürecinde biyoklimatik ve topografik değişkenler kullanılmış; modele en yüksek katkıyı sağlayan değişkenler sırasıyla bio13, TPI, bio2, bio7, eğim, bio12 ve bio1 olarak belirlenmiştir. Potansiyel dağılım alanları hem günümüz iklim koşulları hem de 2100 yılına yönelik SSP1-2.6, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, günümüzde türün uygun habitatları Isparta ve çevresindeki orta-yüksek alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Bulgular, gelecekte habitat uygunluğunun bölgesel ölçekte artabileceğini, ancak mekânsal dağılım örüntülerinde belirgin kaymaların yaşanabileceğini göstermektedir. SSP1-2.6 senaryosu mevcut alanların korunarak çevre yamaçlara doğru ılımlı bir genişlemeyi ortaya koymuştur. SSP2-4.5 senaryosu, özellikle Isparta'daki

dağılımlarda iklim koşullarının optimalleşmesine bağlı olarak yerel genişlemeler öngörülmektedir. Buna karşılık SSP5-8.5 senaryosu, aşırı ısınma ve kuraklaşma nedeniyle Isparta'nın doğu kesimlerinde yüksek rakımlı alanlarda belirlen uygunluk kayıplarını işaret etmektedir. Ancak aynı senaryo altında çevre bölgelerde yeni uygun habitatların da ortaya çıktığı görülmüştür. Sonuçlar, *O. minutiflorum*'un iklim değişikliğine tepkisinin yerel kayıplar ve bölgesel kazanımların eşzamanlı yaşandığı karmaşık bir süreç olduğunu ortaya koymakta; koruma stratejilerinin hem mevcut popülasyonları hem de gelecekte ortaya çıkabilecek yeni uygun alanları kapsayacak biçimde tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu araştırma, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesine rehberlik edecek önemli bilgiler sunmakta ve koruma ile habitat yönetimi çalışmalarını desteklemektedir. Bu doğrultuda elde edilen bulgular, ekonomik açıdan değerli hedef türün uygun habitatlarda yer alan koruma alanlarında in-situ olarak korunması ve aynı zamanda tohum bankalarında ex-situ koruma altına alınması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, söz konusu türün kritik habitatlarını etkileyebilecek antropojenik baskıların mekânsal dağılımının ortaya konulması ve buna bağlı sosyo-ekonomik etmenlerin analiz edilmesine yönelik ek çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulguların, odun dışı orman ürünlerinin hedef türler olarak potansiyelinin değerlendirilmesinde ve söz konusu türlere yönelik politikaların geliştirilmesinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, *O. minutiflorum* türünün Isparta İli genelinde hangi alanlarda değerlendirilebileceğine ilişkin karar süreçlerine katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra, oluşturulan potansiyel dağılım haritası, türün ticari amaçlarla yetiştirilebileceği uygun alanların belirlenmesine olanak tanıyarak, yerel halk için gelir yaratılmasına yönelik girişimlere temel oluşturabilecektir. Bu bağlamda, model tabanlı haritalar söz konusu amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek en etkili araçlar arasında yer almaktadır. Türler için model tabanlı potansiyel dağılım haritaları, ekosistemlerin korunmasını, restorasyonunu ve sürdürülebilirliğini sağlamaya yönelik ekosistem temelli yönetim planlarının hazırlanmasında da temel veri kaynağı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmanın hem Sütçüler kekiği (*O. minutiflorum*) üzerine yapılacak gelecekteki araştırmalar hem de benzer yöntemlerin kullanılacağı çalışmalar açısından önemli bir katkı sunduğu görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Isparta’nın Dünü, Bugünü, Yarını - III (30 Ekim - 1 Kasım 2025) sempozyumunda sunulmuş ve bildiri özetleri kitabında yayımlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Aertsen, W., Kint, V., Van Orshoven, J., Özkan, K., & Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221(8), 1119-1130.
- Albayrak S, Aksoy A. (2019). Phenolic contents and biological activity of endemic *Origanum minutiflorum* grown in Turkey. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*. 53(1):160–170.
- Alin, A. (2010). Multicollinearity. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, 2(3), 370-374.
- Al-Khalaf, A. A., Nasser, M. G., & Hosni, E. M. (2023). Global potential distribution of *Sarcophaga dux* and *Sarcophaga haemorrhoidalis* under climate change. *Diversity*, 15(8), 903.
- Başkar, V., Çağlar, E. (2023). Deprem Öncesi Anormal Hayvan Davranışları. M. E. Keskin (Ed.), *Yeşil Topraklar ve Güvende Yaşam içinde* (19-28. ss.). İstanbul; Türkiye: Artikel Akademi.
- Baydar, H., Avcu, F. (2020). Yayla Kekliği (*Origanum minutiflorum* O. Schwarz et. P.H. Davis)’nin farklı biçim dönemlerinde uçucu yağ içeriği ve bileşenleri. *Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi*, 2(2): 64-70.
- Bayram E, Kırıcı S, Tansı S, Yılmaz G, Arabacı O, Kızıl S, Telci İ 2010. Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Üretiminin Artırılması Olanakları. *Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi*, 11-15 Ocak, Ankara.
- Bowgen, K. M., Kettel, E. F., Butchart, S. H. M., Carr, J. A., Foden, W. B., Magin, G., ... & Pearce-Higgins, J. W. (2022). Conservation interventions can benefit species impacted by climate change. *Biological Conservation*, 269, 109524.
- Chakraborty, Anusheema, PK Joshi, ve Kamna Sachdeva. 2016. “Predicting distribution of major forest tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region”. *Ecological Engineering* 97:593-609.
- Chen, G.J., Peterson, A.T., 2000. A new technique for predicting distribution of terrestrial vertebrates using inferential modelling. *Zoological Research*, 21, 231–237.

- Çağlar, E. (2023). Türkiye depremleri üzerine değerlendirmeler. C. Kaya (Ed.), Sürdürülebilirlik için akademik araştırmalar – III içinde (25-32.ss.). İstanbul; Türkiye: Artikel Akademi.
- Çıvğa, A. (2023). Sütçüler Kekigi (*Origanum minutiflorum*) Potansiyel Dağılım Modellemesi. 21. Yüzyılda Fen ve Teknik, 10(19), 1-8.
- Çıvğa, A., Özdemir, S., Gülsoy, S. (2024). Prediction of potential geographic distribution of *Capparis spinosa*. *Biological Diversity and Conservation*, 17(3), 206-215.
- Çoban, H. O., Örucü, Ö. K., & Arslan, E. S. (2020). MaxEnt modeling for predicting the current and future potential geographical distribution of *Quercus libani* Olivier. *Sustainability*, 12(7), 2671.
- Duan, X., Li, J., & Wu, S. (2022). MaxEnt modeling to estimate the impact of climate factors on distribution of *Pinus densiflora*. *Forests*, 13(3), 402.
- Dülgeroğlu, C., & Aksoy, A. (2018). Küresel iklim değişikliğinin *Origanum minutiflorum* Schwarz & PH Davis' in coğrafi dağılımına etkisinin maximum entropi algoritması ile tahmini. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 11(2), 182-190.
- Dyderski, M. K., Paż, S., Frelich, L. E., & Jagodziński, A. M. (2018). How much does climate change threaten European forest tree species distributions?. *Global change biology*, 24(3), 1150-1163.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Franklin J (2013). Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. *Divers Distrib* 19:1217–1223.
- IPCC, (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi_jen. avx) extension for ArcView 3. x, v. 1.3 a. Jenness Enterprises.
- John, A.W., Diana, S., Dennis, J., Christine, A.H., Mark, A.S., 2009. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2009 (106), 19729–19736
- Khalaf, S. M., Alqahtani, M. S., Ali, M. R., Abdelalim, I. T., & Hodhod, M. S. (2024). Using MaxEnt modeling to analyze climate change impacts on *Pseudomo-*

- nas syringae van Hall, 1904 distribution on the global scale. *Heliyon*, 10(24).
- Khalid, N., Khan, A.M., Qureshi, R., Saqib, Z., Zahid, N., Bussmann, R.W., 2022. Exploration of important environmental determinants of flowering phenology in the Western himalayan forests of dhirkot, azad jammu and kashmir, Pakistan. *Applied Ecology & Environmental Research*, 2022 (20), 301–337.
- Khan, A. M., Li, Q., Saqib, Z., Khan, N., Habib, T., Khalid, N., ... & Tariq, A. (2022). MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important Chilgoza Pine (*Pinus gerardiana* Wall.) in South Asia. *Forests*, 13(5), 715.
- Khanum, R., Mumtaz, A. S., & Kumar, S. (2013). Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. *Acta Oecologica*, 49, 23-31.
- Kılıçgün, H., Korkmaz, M. (2014). Hepatoprotective and antidiabetic activity of *Origanum minutiflorum* grown wild in Turkey. *Bothalia Journal*, 44(3): 260-267.
- Kumar, R., Shamet, G. S., Chaturvedi, O. P., Avasthe, R. K., & Singh, C. (2013). Ecology of chilgoza pine (*Pinus gerardiana* Wall) in dry temperate forests of North West Himalaya. *Ecology, Environment & Conservation*, 19(4), 1063-1066.
- Marcet, A., Sáez, L., Molowny-Horas, R., Pons, X., & Pino, J. (2013). Using species distribution modelling to disentangle realised versus potential distributions for rare species conservation. *Biological conservation*, 166, 221-230.
- McCune, B., D. Keon, 2002. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of vegetation science*, 13(4), 603-606.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.
- Mitchell-Jones, A., Amori, G., Bogdanowicz, W., Kryštufek, B., Reijnders, P., Spitzenberger, F., Stubbe, M., Thissen, J., Vohralík, V., Zima, J., 1999. The Atlas of European Mammals—Academic Press. London, pp xi, 484.
- Moisen, G. G., & Frescino, T. S. (2002). Comparing five modelling techniques for predicting forest characteristics. *Ecological modelling*, 157(2-3), 209-225.
- Newbold, T. (2010). Applications and limitations of museum data for conservation and ecology, with particular attention to species distribution models. *Progress in physical geography*, 34(1), 3-22.
- Oflaz, S., Kürkçüoğlu, M., Başer, K.H.C., 2002. *Origanum onites* ve *Origanum vulgare subsp. hirtum* üzerinde farmakognozik araştırmalar, 14. *Bitkisel İlaç Ham-maddeleri Toplantısı*, Eskişehir.

- Özçelik, H., Korkmaz, M., 2002. Contributions To The Flora of Sütçüler-Isparta (Turkey). *Bio Science Research Bulletin*, 21(1), 1-18.
- Özdamar, K. (2002). *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi (Çok Değişkenli Analizler)*. II. Kaan Kitabevi.
- Özdemir, S. (2024). Tür Dağılım Modellemesinin Kısa Tarihi: Web of Science üzerinden Bibliyometrik Çalışma. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 20(2), 334-351.
- Özdemir, S., 2022. Modelling the Distribution of Primary Forest Tree Species according to Climate Change in the Western Mediterranean. (PhD thesis), Isparta University of Applied Sciences, Institute of Graduate Studies, Department of Forest Engineering, 149 pp, Isparta.
- Özhatay N., Koyuncu M., Atay S., Byfield A. (1997). Türkiye'nin Doğal Tıbbi Bitkilerinin Ticareti Hakkında Bir Çalışma. Doğal hayatı Koruma Derneği. ISBN: 975-96081-9-7. İstanbul, Türkiye.
- Parker, K. C. (1988). Environmental relationships and vegetation associates of columnar cacti in the northern Sonoran Desert. *Vegetatio*, 78(3), 125-140.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J. L. B., ... & Grabherr, G. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 336(6079), 353-355.
- Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C., & Grabherr, G. (2007). Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global change biology*, 13(1), 147-156.
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning* (p. 83).
- Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R. W., Ma, F., Jian, Z., ... & Pei, S. (2017). Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 10, 139-146.
- Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic

heterogeneity. intermountain Journal of sciences, 5(1-4), 23-27.

Sallam, M. F., Al Ahmed, A. M., Abdel-Dayem, M. S., & Abdullah, M. A. (2013). Ecological niche modeling and land cover risk areas for rift valley fever vector, culex tritaeniorhynchus giles in Jazan, Saudi Arabia. *PLoS One*, 8(6), e65786.

Sellar, A. A., Jones, C. G., Mulcahy, J. P., Tang, Y., Yool, A., Wiltshire, A., ... & Zerroukat, M. (2019). UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4513-4558.

Süel, H. (2014). Isparta-Sütçüler yöresinde av türlerinin habitat uygunluk modellemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Mühendisliği Anabilim Dalı. Doktora Tezi, 151s., Isparta.*

Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293.

Şentürk, Ö. (2012). Sütçüler yöresinde asli orman ağacı türlerinin potansiyel yayılış alanlarının modellenmesi (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., ... & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782.

Wisn, M. S., Hijmans, R. J., Li, J., Peterson, A. T., Graham, C. H., Guisan, A., & NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and distributions*, 14(5), 763-773.

Yang, X. Q., Kushwaha, S. P., Saran, S., Xu, J., & Roy, P. S. (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological engineering*, 51, 83-87.

Yıldız, G., Temel, H.E., Ağalar, H.G., Kırimer, N. (2023). *Origanum minutiflorum*: phytochemical profile and inhibitory effects on keyenzymes associated with inflammation. *Plant Biosystems*, 157(4): 858–864.

Zhang, K., Yao, L., Meng, J., & Tao, J. (2018). Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 634, 1326-1334.

Zhao, Haoxiang, Hua Zhang, ve Cungang Xu. (2020). “Study on *Taiwania cryptomerioides* under climate change: MaxEnt modeling for predicting the potential geographical distribution”. *Global Ecology and Conservation* 24:e01313.