

Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler

Editör: Nilay Akkuş Taş

Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler

Editör:

Nilay Akkuş Taş



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgur yayinlari.com

✉ info@ozgur yayinlari.com

Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler

Editor: Nilay Akkuş Taş

Language: Turkish

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8554-13-7

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub991>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Akkuş Taş, N. (ed) (2025). *Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub991>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgur yayinlari.com/>



Önsöz

Malzeme bilimi, geçtiğimiz yüzyılda kat ettiği yolla insanlık tarihinin teknolojik gelişimine yön veren en önemli dinamiklerden biri olmuştur. Özellikle polimer bilimi, geleneksel “plastik” algısından sıyrılarak nanoteknoloji, biyoteknoloji ve enerji mühendisliği ile iç içe geçmiş; malzemeyi sadece boşluk dolduran bir yapı olmaktan çıkarıp, çevresine yanıt veren, enerji depolayan ve koruma sağlayan “akıllı ve fonksiyonel” sistemlere dönüştürmüştür. Elinizdeki “Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler” başlıklı bu eser, işte bu büyük dönüşümün ve disiplinler arası etkileşimin bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır.

Küreselölçekteyaşananenerjikerizi,çevrekirliliğivesağlıkteknolojilerindeki yeni arayışlar, bilim insanlarını çok daha verimli, sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzemeler tasarlamaya zorlamaktadır. Bu kitap, bahsi geçen küresel sorunlara polimerik malzeme perspektifinden inovatif çözümler sunmak amacıyla, alanında uzman araştırmacıların katkılarıyla titizlikle hazırlanmıştır. Eser, polimerlerin biyolojik kökenli uygulamalarından başlayarak, hibrit enerji sistemlerine kadar uzanan geniş bir yelpazeyi bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır.

Kitabın ilk bölümleri, sürdürülebilirlik ekseninde şekillenen biyopolimerlere odaklanmaktadır. Özellikle biyopolimerlerin radyasyon zırhlamadaki potansiyelinin irdelendiği bölümler, nükleer teknoloji ve medikal alanda çevre dostu koruma kalkanlarına duyulan ihtiyaca stratejik bir cevap niteliğindedir. Bununla birlikte, biyopolimer tabanlı fonksiyonel malzemelerin yapısal tasarımı ve gelecek projeksiyonları, yeşil kimya prensiplerinin ileri teknolojiyle nasıl harmanlandığını gözler önüne sermektedir.

Teknolojinin dijitalleşmesi ve “Nesnelerin İnterneti” kavramının hayatımıza girmesiyle birlikte, algılama teknolojileri hayati bir önem kazanmıştır. Eserimizde yer alan yeni nesil sensörler için iletken polimerler bölümü, malzemenin elektriksel iletkenlik yeteneğinin biyomedikalden çevresel izlemeye kadar nasıl hassas birer “duyu organına” dönüştüğünü anlatmaktadır. Benzer bir yenilikçi yaklaşımla ele alınan iyonik sıvı esaslı polimer kompozitler, çözücü ve malzeme etkileşiminin sınırlarını zorlayarak literatüre yeni bir soluk getirmektedir.

Kitabın en çarpıcı ve güncel odak noktalarından biri ise şüphesiz “Enerji”dir. Enerjinin verimli kullanılması ve depolanması, çağımızın en büyük mühendislik problemlerinden biridir. Bu bağlamda, Polimer/Faz Değişim Malzemesi (FDM) hibrit sistemleri üzerine kurgulanan bölüm, termal enerji depolamada yenilikçi yaklaşımları inceleyerek ısı yönetimi konusunda ufuk açıcı bilgiler sunmaktadır. Eserin finalini yapan Polimer-MOF (Metal-Organik İskeletler) yapıları ise, yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözenek yapılarıyla enerji uygulamalarında (hidrojen depolama, batarya teknolojileri vb.) polimer biliminin ulaştığı son noktayı temsil etmektedir.

Teori ile pratik uygulama arasındaki boşluğu doldurmayı hedefleyen bu çalışma; lisansüstü öğrencilerden tecrübeli akademisyenlere, Ar-Ge mühendislerinden sektör profesyonellerine kadar geniş bir kitleye hitap etmektedir. “Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler” kitabının, ülkemizdeki malzeme bilimi literatürüne katkı sağlamasını, genç araştırmacılara ilham vermesini ve yeni bilimsel iş birliklerine zemin hazırlamasını temenni ediyorum.

Bilime ve geleceğe değer katan tüm okuyucularımıza saygılarımla...

İçindekiler

Önsöz

iii

Bölüm 1

Biyopolimerlerin Radyasyon Zırhlamadaki Rolü	1
<i>Mustafa Ersin Pekdemir</i>	
<i>Serpil Yalçın Kuzu</i>	
<i>Sibel Selçuk Pekdemir</i>	

Bölüm 2

Biyopolimer Tabanlı Fonksiyonel Malzemeler: Yapısal Tasarım, Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri	25
<i>Umut Çelikoğlu</i>	

Bölüm 3

Yeni Nesil Sensörler için İletken Polimerler	45
<i>Recep Taş</i>	

Bölüm 4

İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Gelişimi ve Fonksiyonel Kullanım Alanları	67
<i>Hüseyin Akbaş</i>	

Bölüm 5

Polimer/Faz Değişim Malzemesi (FDM) Hibrit Sistemleri: Termal Enerji Depolamada Yenilikçi Yaklaşımlar	83
<i>Recep Taş</i>	
<i>Derya Kalbaraman Döğüşcü</i>	
<i>Nilay Akkuş Taş</i>	

Biyopolimerlerin Radyasyon Zırhlamadaki Rolü

Mustafa Ersin Pekdemir¹

Serpil Yalçın Kuzu²

Sibel Selçuk Pekdemir³

Özet

Biyopolimerler, sürdürülebilirlik, düşük toksisite, yüksek hidrojen içeriği ve hafiflik gibi üstün nitelikleri sayesinde geleneksel ağır metal bazlı radyasyon kalkanlarının yerini alabilecek güçlü alternatif malzeme sınıfı olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel kurşun esaslı zırh sistemleri yüksek foton soğurma verimliliği sunsa da toksisite, ağırlık ve işlenebilirlik açısından önemli sınırlamalara sahiptir. Buna karşılık selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler, hızlı nötronların elastik saçılma yoluyla moderasyonu için gerekli olan hidrojen açısından zengin yapıları sayesinde nötron zırhlamada yüksek bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, foton zayıflatma performansını artırmak amacıyla bu matrislerin Bi_2O_3 , PbO_2 , WO_3 , Fe_3O_4 , ZnO veya CdO gibi yüksek atom numaralı dolgu maddeleriyle güçlendirilmesi, hibrit kompozitlerin hem gama hem de nötron radyasyonunu sönümlemesini mümkün kılmaktadır. Son yıllarda Monte Carlo tabanlı simülasyonlar ve deneysel çalışmalar, bu hibrit biyopolimer kompozitlerinin kütle zayıflatma katsayısı (MAC), yarı değer kalınlığı (HVL) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) bakımından ticari kurşunsuz epoksi-bismut kompozitlerine yaklaşılabildiğini, hatta bazı durumlarda üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur. Eklemeli imalat ve nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, biyopolimerlerin çok katmanlı, esnek ve çok işlevli kalkan sistemlerine dönüştürülmesini kolaylaştırmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde biyopolimer tabanlı kompozitler, modern tıp, nükleer enerji, uzay teknolojileri ve kişisel koruyucu ekipmanlar için çevre dostu, hafif ve yüksek performanslı bir radyasyon zırhlama yaklaşımı sunmaktadır.

- 1 Doç.Dr., Polimer ve Biyomalzeme Araştırma Laboratuvarı, Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, epekdemir@firat.edu.tr, 0000-0002-4979-1777
- 2 Doç. Dr., Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, skuzu@firat.edu.tr, 0000-0001-8905-8089
- 3 Dr., Polimer ve Biyomalzeme Araştırma Laboratuvarı, Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, sspekdemir@firat.edu.tr, 0000-0002-8643-7590

1. Giriş

Radyasyon, tıbbi görüntüleme ve tedavi uygulamaları, nükleer enerji üretimi, endüstriyel radyografi ve uzay ortamı gibi çok geniş bir yelpazede insan faaliyetleri ile iç içe olan bir olaydır. İyonlaştırıcı radyasyonun kontrollü biçimde kullanımı önemli teknolojik avantajlar sunarken, yetersiz zırhlama DNA hasarı, mutasyon, kanser oluşumu ve doku bozulması gibi ciddi biyolojik risklere neden olmaktadır. Bu nedenle etkili, güvenilir ve sürdürülebilir radyasyon zırhlama malzemelerinin geliştirilmesi günümüzde hem malzeme bilimi hem de radyasyon güvenliği açısından kritik bir araştırma alanıdır.

Geleneksel olarak kurşun (Pb), tungsten (W) ve baryum (Ba) gibi yüksek atom numarasına (Z) sahip ağır metaller, gama ve X ışınlarının soğurulması açısından yüksek etkinlik göstermiştir. Ancak bu malzemeler toksisite, aşırı ağırlık, işlenebilirlik zorlukları ve bertaraf problemleri gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Özellikle giyilebilir koruyucular, taşınabilir cihazlar ve uzay uygulamaları gibi hafiflik ve ergonomi gerektiren alanlarda bu sınırlamalar daha belirgin hâle gelmektedir (Chang, Guo, & Zhang, 2023; Karatas, Ercan, Altin, Ogul, & Bulut, 2025; More, Alsayed, Badawi, Thabet, & Pawar, 2021a).

Bu bağlamda yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerler, yeni nesil sürdürülebilir zırhlama malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler; biyoyumumluluk, düşük toksisite, yüksek hidrojen içeriği ve film, lif veya kompozit yapılarına kolaylıkla işlenebilme gibi avantajlara sahiptir. Özellikle hidrojen açısından zengin yapıları, nötronların yavaşlatılmasında çok önemli bir avantaj sağlar. Dahası, bu biyopolimerler yüksek Z'li metal oksitler, manyetik nanopartiküller veya iletken fazlar ile birleştirildiğinde, geleneksel polimerlere ve hatta bazı sentetik metal takviyeli sistemlere yaklaşan, bazı durumlarda ise onları aşan radyasyon zayıflatma performansına ulaşabilmektedir (Hashim, Al-Attayah, & Obaid, 2019; More et al., 2021a; Okonkwo, Idumah, Okafor, & Ezeani, 2023).

Bu bölümde biyopolimerlerin radyasyon zırhlamadaki rolü ayrıntılı biçimde incelenecek; foton ve nötron etkileşim mekanizmaları açıklanacak, biyopolimer matrislerin yapısal avantajları ve hibrit kompozit stratejileri tartışılacak ve literatürde bildirilen performans sonuçları değerlendirilecektir.

2. Radyasyonun Temelleri ve Zırhlama İlkeleri

Radyasyon, enerjinin parçacıklar veya elektromanyetik dalgalar hâlinde yayılmasıdır. İyonlaştırıcı radyasyon X ışınları, gama ışınları, alfa ve beta

parçacıkları ve nötronları içermekte olup atomlardan elektron kopararak kimyasal bağları bozabilir ve biyolojik doku üzerinde ciddi hasarlara yol açabilir. Bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyonla çalışan ortamlarda uygun zırhlama stratejilerinin geliştirilmesi zorunludur (Chang et al., 2023; More et al., 2021a).

2.1. Foton Madde Etkileşimi

Bir foton bir malzeme ortamından geçerken, enerjisi ile malzemenin atom numarası, yoğunluğu ve elektron dağılımı gibi atomik özellikleri tarafından belirlenen üç temel etkileşim mekanizmasından biriyle etkileşime girer. Bu mekanizmalar sırasıyla fotoelektrik soğurma, Compton saçılması ve çift oluşumdur. Her bir belirli enerji aralıklarında baskın hâle gelir ve foton zayıflatma davranışının enerjeye bağlı karakterini belirler (Chang et al., 2023; More et al., 2021a). Fotoelektrik soğurma düşük enerjili fotonlarda (≈ 10 – 100 keV) hâkimdir. Bu süreçte foton, iç kabuk elektronlarından birine tüm enerjisini aktararak elektronu atomdan koparır. Fotoelektrik olayın olasılığı atom numarası ve enerjeye (E) bağlı yaklaşık olarak Z^n/E^3 ($n \approx 3$ – 4) şeklinde değişir. Malzemenin atom numarası arttıkça etkileşim kesiti keskin biçimde yükselir. Bu nedenle kurşun ($Z=82$), bizmut ($Z=83$) ve tungsten ($Z=74$) gibi yüksek Z 'li malzemeler özellikle tıbbi görüntülemede kullanılan düşük enerjili X ışınlarının soğurulmasında son derece etkilidir. Ayrıca L ve K kabukları civarında görülen kenar yapıları (absorption edges), yüksek Z 'li dolgu maddelerinin kompozit malzemelerde tercih edilme nedenlerinden biridir (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a).

Compton saçılması orta enerjili fotonlarda (≈ 200 keV– 2 MeV) baskındır. Bu mekanizmada foton, zayıf bağlı bir dış kabuk elektronu ile elastik olmayan bir çarpışma yaparak enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır ve yön değiştirir. Compton saçılma olasılığı atom numarasına güçlü bir şekilde bağlı değildir; bunun yerine malzemenin elektron yoğunluğuna bağlıdır. Bu sebeple polimerler, kompozitler ve düşük Z 'li biyopolimer matrisler Compton bölgesinde benzer zayıflatma davranışı gösterebilir. Bu enerji aralığı birçok endüstriyel radyografi, gama tarama ve radyasyon güvenliği uygulamasında kritik olduğundan, biyopolimer matris ve yüksek Z dolgu kombinasyonları Compton mekanizmasında önemli avantaj sağlar (Chang et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).

Çift oluşumu (pair production) foton enerjisinin 1.022 MeV'in üzerine çıktığı yüksek enerji aralıklarında gerçekleşir. Foton, çekirdeğin güçlü elektrik alanı yakınında bir elektron pozitron çiftine dönüşür. Etkileşimin başlama eşiği elektron kütlesiyle (m_e) orantılı $E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022$ MeV olup, kesit enerjinin

ve atom numarasının artmasıyla belirgin bir şekilde yükselir. Bu nedenle ağır metal oksit dolgular (Bi_2O_3 , WO_3 , PbO_2) yüksek enerjili gama ışınlarına karşı çok etkilidir ve kompozit malzemelerin radyasyon zırhlama etkisini ciddi ölçüde artırır (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). Bu üç mekanizmanın enerjiye bağlı baskınlığı, bir malzemenin foton zayıflatma performansının neden tek bir parametreye değil, foton enerjisi aralığı, Z, yoğunluk ve mikro yapı ilişkisine bağlı olduğunu açıklamaktadır. Bu nedenle biyopolimer matrislerin yüksek Z katkılarıyla güçlendirilmesi, hem fotoelektrik bölgede hem de yüksek enerjili çift oluşumu bölgesinde önemli performans kazançları sağlamaktadır.

Monoenerjik bir foton demetinin, kalınlığı t olan bir malzemeden geçerken gösterdiği zayıflama, Lambert–Beer yasasına göre

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada I_0 giriş yoğunluğu, I çıkış yoğunluğu ve μ ise birim yol boyunca etkileşim olasılığını temsil eden doğrusal zayıflatma katsayısıdır (LAC) (cm^{-1}). Kütle zayıflatma katsayısı (MAC) ise yoğunluk (ρ) esaslı karşılaştırma yapmak için μ/ρ ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) şeklinde tanımlanır. Foton yoğunluğunu %50 azaltmak için gerekli malzeme kalınlığı olan yarı değer kalınlığı (HVL)

$$HVL = \ln(2) / \mu \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Yoğunluğu %10'a indirmek için gereken onda bir değer kalınlığı (TVL) ise

$$TVL = \ln(10) / \mu \quad (3)$$

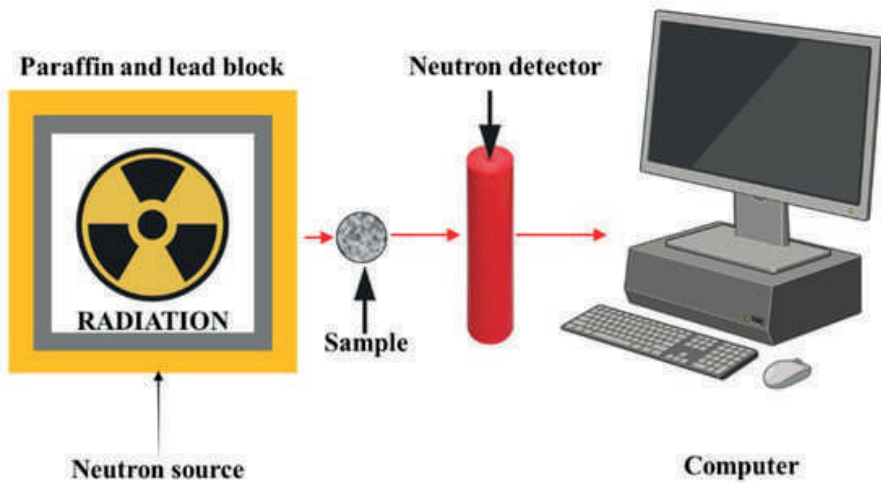
olarak tanımlanır. Yüksek Z veya yoğun malzemeler yüksek μ değerine, dolayısıyla küçük HVL/TVL değerlerine sahiptir. Buna karşılık hafif, hidrojen bakımından zengin biyopolimerlerin μ değeri daha düşüktür; fakat bu malzemeler nötron yavaşlatması açısından önemli bir üstünlük sağlar (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a).

2.2. Nötron Zırhlamasına İlişkin Hususlar

Nötronlar elektriksel olarak yüksüz parçacıklar olduklarından, maddeyle etkileşimlerinde elektrostatik kuvvet rol oynamaz ve bu durum foton etkileşimlerinden tamamen farklı, çekirdek temelli bir zayıflatma

mekanizmasını ortaya çıkarır. Nötronların malzemeden geçişi elastik saçılma, inelastik saçılma ve nötron yakalama ile gerçekleşir. Bu süreçlerin sonucunda oluşan ikincil yüklü parçacık üretimi çekirdek reaksiyonlarına dayanır. Bu çalışmalarda kullanılan nötron doz ölçümü deneysel geometrisi Şekil 1'de sunulmuştur. Özellikle hafif çekirdeklerde gerçekleşen elastik saçılma nötron yavaşlatması (moderasyon) açısından kritik öneme sahiptir. Hidrojen çekirdeğinin nötronla neredeyse eşit kütleye sahip olması tek çarpışmada büyük enerji transferine olanak verir. Bu sebeple selüloz, kitosan, nişasta, poli(vinil alkol) (PVA), poli(vinilpirolidon) (PVP) ve PLA gibi hidrojen açısından zengin biyopolimerler etkili nötron yavaşlatıcılar olarak kullanılır (Hashim et al., 2019; More et al., 2021a).

Daha yüksek enerjili nötronlar hedef çekirdeği uyatarak inelastik saçılma yoluyla enerji kaybederler. Bu sırada ortama gama ışınları olarak da tanımlanan ikincil yüksek enerjili fotonların yayılması nötron zırhlarının aynı anda gama zırhlanmasına da sahip olmasını gerektirir. Nötronların tamamen soğurulduğu nötron yakalama olayında ise çekirdek foton yayarak daha kararlı hâle döner. Bu amaçla en yüksek yakalama kesitine sahip elementlerden bor-10 ve lityum-6 biyopolimer matrislere eklenerek $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ gibi reaksiyonlar sayesinde nötron absorpsiyon kapasitesi önemli ölçüde artırılır. Yakalama reaksiyonları ve inelastik saçılma sonrasında oluşan alfa parçacıkları, protonlar ve gama ışınları gibi ikincil radyasyon ürünleri ise zırh tasarımının çok katmanlı yapılmasını gerektirir (Chang et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).



Şekil 1. Nötron doz ölçümleri için deneysel geometri. (Pekdemir, Pekdemir, Yılmaz, Onay, & Nazem Qader, 2025)

2.3. Radyasyon Zırhlama Parametreleri ve Sınırlamaları

Zırhlama malzemeleri için temel performans göstergeleri arasında LAC, MAC, HVL, ortalama serbest yol ($MFP = 1/\mu$) ve etkin atom numarası (Z_{eff}) bulunur. Nötron zırhlaması için makroskobik saçılma/soğurma değerleri kritik öneme sahiptir. Geleneksel metaller mükemmel foton zayıflaması sağlar, ancak nötronlar için genellikle düşük performans gösterir. Buna karşılık, hidrojen açısından zengin polimerler nötronları yavaşlatır, ancak yüksek Z dolgu maddeleriyle karıştırılmadıkça sınırlı gama zayıflaması sunar (Chang et al., 2023; Karatas et al., 2025; More et al., 2021a; Okonkwo et al., 2023).

Geleneksel olarak, kalkanlama paradigması, ağırlık veya çevresel etkiden bağımsız olarak maksimum zayıflamayı önceliklendirmiştir. Giyilebilir koruyucu cihazlar, havacılık panelleri ve biyomedikal cihazlar gibi modern uygulamalarda talep, hafif, esnek ve sürdürülebilir malzemelere doğru kaymaktadır. Bu değişim, nötronlar için hidrojen açısından zengin matrisleri, gama için gömülü yüksek Z dolgu maddeleriyle birleştirebilen ve kütleyi ve çevresel etkiyi en aza indirirken entegre koruma sağlayan biyopolimerik kompozitlerin araştırılmasını teşvik etmektedir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023).

3. Biyopolimerler ve Radyasyon Zırhlamasında Kullanımı

3.1. Biyopolimerik Malzemelere Genel Bakış

Biyopolimerler; bitkiler, yosunlar ve mikroorganizmalar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, doğal veya doğala yakın makromoleküllerdir. Yapısal olarak selüloz, kitosan, nişasta ve aljinat gibi polisakkaritler, PLA ve poly3-hydroxybutyrate (PHB) gibi alifatik polyesterler ve jelatin ve kolajen gibi protein bazlı polimerler başta olmak üzere çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu malzemeler biyobozunurluk, düşük toksisite, biyouyumluluk ve yüksek hidrojen içeriği özellikleri sayesinde sürdürülebilir malzeme tasarımında giderek daha fazla tercih edilmektedir (Hashim et al., 2019; Karataş, Ercan, Altın, Oğul, & Bulut, 2025). Hidrojen bakımından zengin bileşimleri, özellikle nötron yavaşlatılmasında önemli bir avantaj sağlayarak polietilen gibi geleneksel moderatörlere yakın verimlilik sunar (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

Biyopolimerlerin düşük atom numarası ve yoğunluğa sahip olmaları, fotoelektrik olay veya çift oluşumu mekanizmaları üzerinden yüksek enerjili fotonların zayıflatılmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle modern kalkanlama tasarımları, biyopolimer matrislerin Bi_2O_3 , WO_3 , PbO_2 , Gd_2O_3 ,

ZnO, CdO ve FeS₂ gibi yüksek Z'li inorganik dolgularla güçlendirildiği hibrit kompozit sistemlere yönelmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; Elsafi, El-Nahal, Sayyed, Saleh, & Abbas, 2022; Nuray, 2024; Saied, Ward, & Hamieda, 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025). Bu hibrit yapıdaki polimer matrisleri mekanik dayanım, işlenebilirlik, nötron moderasyonu ve esneklik sağlar. Ayrıca yüksek atom numaralı dolgu maddelerinin kullanımı gama ışınlarının zayıflamasını da sağlar. Böylece aynı malzemede hem gama hem de nötron koruması sağlanabilmektedir.

Literatürde bu tür biyopolimerik hibrit kompozitlere ilişkin çok sayıda örnek bulunmaktadır. Örneğin PbO₂ ile güçlendirilmiş karboksimetil selüloz (CMC)/PVP ve PVA esaslı polimerler, gama ışınları zırlamasında yüksek MAC ve düşük HVL değerleri elde ederek kurşunsuz esnek film tasarımlarına olanak sağlamıştır [8,19]. Zn-borat/parafin dolgulu koyun yünü biyopolimer kompozitleri çalışmada yoğunluk ve dolgu oranına bağlı olarak 20–80 keV aralığında zayıflatma katsayılarının önemli ölçüde arttığı ve hafif kurşunsuz kalkan tasarımlarının mümkün olduğu gösterilmiştir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025). 3D baskı yoluyla Bi veya W içeren polimer matrislerinin üretildiği çalışmalarda ise, karma radyasyon alanlarında daha hafif ve şekillendirilebilir zırhların mümkün olduğunu göstermiştir (Elsafi et al., 2022). Ayrıca kitosan, PLA veya selüloz matrislere eklenen manyetik Fe₃O₄ nanoparçacıkları ve grafen oksit ve karbon nanotüpleri gibi karbon temelli dolgular elektromanyetik girişim (EMI) sönümleme, dielektrik kayıp ve termal kararlılık gibi ek işlevsellikler sunmuştur (El Rahman, Metwally, Sabry, & Mohammed, 2024; Thongpool, Phunpueok, Barnthip, & Jaiyen, 2015).

Biyopolimer tabanlı kompozitlerin bir diğer avantajı geniş işlemeye uygunluklarıdır. Çözelti döküm, elektroegirme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve çok katmanlı 3D baskı gibi yöntemler, bu malzemelerin film, kaplama, lif, köpük veya yapısal panel formunda üretilebilmesine olanak sağlar (Elsafi et al., 2022; Hashim et al., 2019; Niksarlıoğlu et al., 2023). Biyobozunurluk ve düşük çevresel ayak izi, biyopolimerik kompozitleri hem radyasyon koruması hem de sürdürülebilirlik hedefleri açısından geleceğin malzemeleri arasında konumlandırmaktadır (Hashim et al., 2019; Karataş et al., 2025).

3.2. Selüloz Bazlı Kompozitler

Selüloz, β-(1→4) bağlı D-glukopiranoz, birimlerinden oluşan lineer zincir yapısı, kristalin mikrofibril düzeni ve yoğun hidroksil grubu içeriği sayesinde en yaygın doğal biyopolimerlerden biri olarak tanımlanır

(Thongpool et al., 2015). Yüksek kristalinitesi ve güçlü hidrojen bağı ağı nedeniyle, selülozun işlenmemiş hâlde dahi dikkate değer mekanik dayanım ve radyasyon kararlılığı sergilediği çeşitli çalışmalar tarafından bildirilmiştir (Sarkar, Bediako, Choi, & Yun, 2019). Hidrojen yönünden zengin yapısı, hızlı nötron moderasyonuna katkı sağlamakla birlikte yüzeydeki fonksiyonel grupların nanoparçacık bağlanmasına elverişli olduğunu göstermiştir (Hashim et al., 2019; Thongpool et al., 2015).

Selüloz tabanlı malzemelerin foton ve nötron kalkanı olarak daha etkili hâle getirilebilmesi için yüksek Z'li metal oksitlerin veya fonksiyonel nanoparçacıkların matrise dâhil edildiği hibrit kompozit tasarımları yaygın olarak benimsenmiştir. Örneğin, selüloz asetat matrisine ZnO ve CdO nanoparçacıklarının eklendiği sistemlerde üretilen kompozitlerin, tanınal X-ışını enerjilerinde beton ve alçıdan daha yüksek LAC değerine sahip olduğu ve TVL değerlerinin 20–40 keV aralığında 0.14–0.91 cm arasında kalması, ince tabakalarda bile etkili foton zırhlaması sağladıklarını ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan çalışma ZnO ve CdO'nun yüksek yoğunluğu ile K-kenar enerjilerinin tanınal foton enerjilerine yakın olması sayesinde, CA–CdO–ZnO kompozitlerinin hafif, kurşunsuz ve tıbbi görüntüleme uygulamalarında beton ve alçıya alternatif olabilecek verimli zırhlama malzemeleri olduğunu göstermiştir (Nafee, Tijani, Al-Hadeethi, & Hussein, 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025). UV-engelleyici dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş selüloz ve bakteriyel selüloz filmlerinde ultraviyole geçirgenliğinde %90'a varan azalma ve aynı anda iyi mekanik/bariyer performansı elde edildiği rapor edilmiştir (Vázquez, Velazquez, & Cazón, 2021).

Radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma işlemlerinin selüloz lif takviyeli biyokompozitlerde ara yüzey etkileşimini ve yapısal kararlılığı iyileştirdiği çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Lenfeld, Brdlík, Borůvka, Běhálek, & Habr, 2020). Selüloz lif takviyeli polimer kompozitlerin kontrollü gama dozlarına maruz bırakılması sonrasında mekanik dayanımın büyük ölçüde korunduğu, hatta belirli dozlarda iyileştiği; bunun da fiber matris ara yüzey bağlanmasının radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma yoluyla güçlenmesiyle ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Shahriar Kabir et al., 2019).

Ağır metal oksit dolguların selüloz kompozitlerinde foton zayıflatma katsayılarını önemli ölçüde artırabildiği ve yarı değer kalınlığını düşürebildiği çeşitli derlemelerde vurgulanmaktadır (Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). Ayrıca, üç boyutlu baskı ile üretilen Bi içeren polimer kompozitlerinin özellikle düşük enerjili fotonlara karşı yüksek zayıflatma performansı sergilediği gösterilmiştir. Bu yaklaşımın uygun matris seçimiyle selüloz temelli sistemlere de uyarlanabileceği değerlendirilmiştir (Elsafi et al.,

2022; Nuray, 2024). Bu bulgular, selüloz bazlı hibrit kompozitlerin hafiflik, esneklik, nötron moderasyonu ve yüksek Z katkılarıyla güçlendirilmiş foton zayıflatma kabiliyetini bir arada sunarak modern kalkınma uygulamalarında önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

3.3. Kitosan Bazlı Kompozitler

Kitosan, kabuklu deniz canlılarının dış iskeletlerinde bulunan kitinin deasetilasyonu sonucunda elde edilen bir polisakkarittir ve yapısı β -(1 $\rightarrow$ 4) bağlı glukozamin ile N-asetil-glukozamin birimlerinden oluşmaktadır. Yüksek hidrojen ve azot içeriği, film oluşturma kapasitesi, biyolojik bozunabilirlik ve kimyasal fonksiyonelleştirmeye uygunluk gibi özellikler kitosanı hem radyasyon etkileşimleri hem de kompozit üretimi açısından değerli bir biyopolimer hâline getirmektedir (Mallakpour, Tukhani, & Hussain, 2021). Hidrojen bakımından zengin yapısı nedeniyle kitosanın nötron moderasyonu için uygun bir matris olarak değerlendirildiği, ayrıca yüzeydeki fonksiyonel grupları sayesinde nanoparçacıklarla güçlü ara yüzey bağlanmaları oluşturabildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; Mallakpour et al., 2021).

Kitosan filmlerinin gama ışınlarına maruz kaldığında zincir kopması ve radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma gibi yapısal değişiklikler sergilediği; bu süreçlerin uygun dozlarda mekanik esnekliği ve enerji dağılımını iyileştirebildiği çeşitli çalışmalar tarafından gösterilmiştir. Kitosan–gliserol temelli filmlerde 25 kGy'ye kadar uygulanan ışınlamanın kristallliği azalttığı ve esnekliği artırdığı bildirilmiştir (Al-Masry et al., 2021). Nanopartikül takviyeleriyle güçlendirilmiş kitosan kompozitlerinin radyasyon koruma performansının belirgin şekilde iyileştiği de literatürde vurgulanmaktadır. Özellikle Fe₃O₄-kitosan sistemlerinde manyetik kayıp mekanizmalarının dielektrik sönümlleme ile birleşerek hem foton hem de elektromanyetik radyasyonun zayıflatılmasına katkı sağladığı genel kompozit derlemelerinde belirtilmektedir (Bawazeer et al., 2023; Okonkwo et al., 2023).

Kitosan–jelatin–nanodoldurucu esaslı kompozitlerin yüksek dielektrik sabitleri ve EMI koruması sunduğu; ayrıca giyilebilir hafif koruyucular için uygun mekanik esneklik sağladığı çalışmalarla desteklenmiştir (Duan, Chen, Yu, & Xie, 2022; Mallakpour et al., 2021). Ayrıca sterilizasyon gerektiren biyomedikal uygulamalarda kitosan tabanlı filmlerin kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve bitkisel ekstrakt içeren kitosan filmlerinin 20 kGy'ye kadar gama ışını dozlarına maruz bırakıldıktan sonra antimikrobiyal özelliklerini ve optik bütünlüklerini koruduğu rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021).

Bu veriler doğrultusunda, kitosanın hem nötron moderatörü olarak hidrojen zenginliğinden kaynaklanan avantajları hem de foton ve EMI zayıflaması için yüksek Z veya fonksiyonel nanoparçacıklarla uyumlu bir polimer matris oluşturabilmesi, onu çok katmanlı ve çok işlevli radyasyon koruma sistemleri için son derece uygun ve çok yönlü bir bileşen hâline getirmektedir.

3.4. PLA ve Hibrit Kompozit Sistemleri

PLA, mısır ve şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir bir alifatik polyester olup şeffaflığı, işlenebilirliği ve çeşitli dolgu maddeleriyle uyumluluğu sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025). Bununla birlikte, saf PLA'nın nispeten kırılgan bir yapıya sahip olduğu ve foton-radyasyon etkileşimlerinde sınırlı performans gösterdiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Radyasyon altında zincir hareketliliğinin azalması, mekanik dayanım kaybı ve enerji sönümleme kapasitesindeki düşüş gibi etkiler PLA'nın tek başına bir kalkan malzemesi olarak yetersiz kalmasına neden olabilmektedir (Karatas et al., 2025; Thongpool et al., 2015).

Bu sınırlamaların aşılması amacıyla PLA'nın PHB, poli(3-hidroksibütirat-ko-3-hidroksivalerat) (PHBV) gibi biyobozunur poliesterlerle birleştirildiği veya yüksek atom numaralı metal oksitlerle güçlendirildiği hibrit kompozit tasarımlarına yönelik çalışmalar artmıştır. Monte Carlo tabanlı Geant4 simülasyonlarında, Bi_2O_3 veya Gd_2O_3 içeren PLA-PHB kompozitlerinin saf PLA'ya kıyasla gama ve nötron zayıflatma etkinliğinde anlamlı iyileşme sağladığı rapor edilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Bu performans artışı, fotoelektrik olayın Z^3 bağımlılığı ve ağır oksitlerin yüksek yoğunluk değerleri ile ilişkilendirilmektedir.

DeneySEL çalışmalar da PLA'nın yüksek Z oksit katkılarıyla radyasyon bariyer özelliklerinin belirgin şekilde geliştiğini göstermektedir. PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı ve LAC değerinin arttığı, dolgu oranları uygun düzeylerde tutulduğunda mekanik dayanım ve işlenebilirliğinin korunduğu bildirilmiştir (Nuray, 2024). Benzer şekilde, PLA-kitosan-selüloz nanokristali gibi PLA tabanlı çok katmanlı sistemlerde bariyer, mekanik ve fonksiyonel özelliklerin birleşimi sayesinde ambalajlama ve radyasyona maruz yapılar için umut verici sonuçlar elde edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022).

PLA tabanlı kalkanlama uygulamalarında, PLA'nın kitosan, nişasta veya diğer polisakkaritlerle karıştırılmasıyla elde edilen çok katmanlı filmler ve esnek kaplamalar da önem taşımaktadır. Bu hibrit yapılar; radyasyon

zayıflatma, biyobozunurluk, steril tıbbi ambalajlarda kullanılabilirlik, UV engelleme ve antimikrobiyal davranış gibi çok yönlü özellikler sunmaktadır. Kitosan, selüloz nanokristali (CNC) ve çeşitli fonksiyonel katkılarla modifiye edilen PLA filmlerinde UV koruma kapasitesi, mekanik dayanım ve ısıl stabilitede belirgin iyileşmeler elde edildiği rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Bu bulgular, PLA'nın yüksek Z dolgu maddeleri ve biyopolimerlerle birlikte kullanıldığında hem foton hem de nötron zayıflatma sağlayabilen, hafif, işlenebilir ve sürdürülebilir hibrit kalkan sistemleri için dikkate değer bir bileşen olduğunu göstermektedir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024).

3.5. Nişasta ve Diğer Polisakkarit Kompozitleri

Nişasta, film oluşturma kabiliyeti, geniş bulunabilirliği ve hidrojen bakımından zengin kimyasal yapısı nedeniyle sürdürülebilir kompozit tasarımlarında öne çıkan bir biyopolimerdir. Ancak saf hâliyle sınırlı mekanik dayanım ve termal kararlılık sergilemesi sebebiyle genellikle selüloz, kitosan veya çeşitli nanoparçacık katkılarıyla güçlendirildiği literatürde belirtilmektedir (Hashim et al., 2019; Karatas et al., 2025). Bu hibritleştirme stratejileri sayesinde nişastanın hem nötron moderasyonu hem de foton zayıflatma kapasitesinin artırılabilirdiği rapor edilmiştir. Mısır nişastası ve kitosan matrisine entegre edilen selüloz nanokristallerinin (CNC), kompozitin mekanik dayanımı ile bariyer performansını anlamlı şekilde iyileştirdiği; aynı zamanda UV radyasyonu ve kimyasal ajanlara karşı daha yüksek koruma sağladığı bildirilmektedir (Duan et al., 2022). CNC'nin yüksek kristalin yapısı, hidroksil fonksiyonelliği ve polimer matrise güçlü bir ara yüzey bağlanma kapasitesi bu iyileşmenin temel nedenleri arasında gösterilmektedir.

Nişasta temelli nanokompozitlerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarının, biyobozunurluk korunurken EMI sönmleme kapasitesini artırdığı ve özellikle düşük frekanslı EMI kalkanlama uygulamalarında ek işlevsellik sağladığı genel derleme çalışmalarında vurgulanmaktadır (Thongpool et al., 2015). Ayrıca bakteriyel selüloz-kitosan-gliserol kompozitlerinden üretilen şeffaf filmlerde %95'e varan UV engelleme kapasitesine ve 135 °C'ye kadar termal kararlılığa ulaşıldığı; bu özelliklerin söz konusu sistemleri radyasyona maruz kalabilen ambalaj ve koruyucu kaplama uygulamaları açısından uygun hâle getirdiği rapor edilmiştir (Sarkar et al., 2019).

Nişasta esaslı hibrit sistemlerin performansının iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon türleri altında iyileştirilebildiği; özellikle biochar–ZnO katkılı termoplastik nişasta filmlerinde hem antimikrobiyal özelliklerin hem de UV/görünür ışık bariyer kapasitesinin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir (Vázquez et al., 2021). Bu nanopartikül katkılarının, foton soğurma ve saçılma mekanizmalarını güçlendirdiği; ayrıca matrisin gaz bariyeri ve mekanik özelliklerini desteklediği ifade edilmektedir. Bu bulgular doğrultusunda nişasta ve diğer polisakkarit esaslı biyopolimer kompozitlerin; yüksek hidrojen içerikleri, çok yönlü işlenebilirlikleri ve çeşitli nanoparçacık katkılarıyla uyumlu yapıları sayesinde sürdürülebilir, hafif ve çok işlevli radyasyon koruma malzemeleri için önemli bir potansiyel sunduğu anlaşılmaktadır (Duan et al., 2022; Karatas et al., 2025; Sarkar et al., 2019; Thongpool et al., 2015; Vázquez et al., 2021).

3.6. Radyasyon Zırhlama Performans Değerlendirmesi

Biyopolimer esaslı kompozitlerin radyasyon zırhlama performansları; LAC, MAC, HVL, TVL ve Zeff gibi parametreler kullanılarak nicel olarak değerlendirilebilmektedir (Chang et al., 2023; More et al., 2021a). Deneysel çalışmalar ve Monte Carlo tabanlı simülasyon sonuçları, metal oksitler, boratlar, ağır element içeren bileşikler ve manyetik nanoparçacıklarla güçlendirilmiş biyopolimer matrislerin; saf polimerlere, geleneksel sentetik polimerlere ve düşük yoğunluklu metalik kalkanlara yakın hatta bazı durumlarda bu sistemlerin üzerinde zayıflatma performansı gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Karatas et al., 2025; Okonkwo et al., 2023; Saied et al., 2024; Selçuk Pekdemir et al., 2025).

3.6.1. Gama Işını Koruma Performansı

Yüksek atom numaralı dolgu maddeleri içeren biyopolimer kompozitlerinin foton etkileşim mekanizmalarında belirgin iyileşme sağladığı birçok çalışma tarafından rapor edilmiştir. Çinko borat/parafin dolgulu koyun yünü kompozitlerinde, 20–80 keV foton enerjisi aralığında MAC değerinin dolgu oranıyla birlikte anlamlı şekilde arttığı ve hafif, esnek kurşunsuz kalkan tasarımlarının mümkün olduğu bildirilmiştir (Darie-Niță & Frackowiak, 2025). Bu sonuçlar, fotoelektrik soğurmanın dolgu maddesi konsantrasyonuna duyarlılığını doğrulamaktadır. Benzer biçimde, CMC–PVP–PbO₂ nanokompozitlerinde 59.5 keV gama ışınları için yüksek LAC değerlerinin elde edildiği ve polimer matris içinde homojen dağılmış PbO₂ nanoparçacıklarının metalik kurşun–kauçuk sistemlerine alternatif olabilecek hafif ve esnek bir yapı sunduğu belirtilmektedir (Saied et al., 2024). Biyopolimer poliester sistemleri de benzer eğilim göstermektedir. Geant4

tabanlı Monte Carlo simülasyonlarında, Bi_2O_3 ve Gd_2O_3 içeren PLA-PHB kompozitlerinin 662 keV civarında saf PLA'ya göre daha yüksek MAC değerleri verdiği ve bazı ticari kurşunsuz epoksi-bizmut kompozitleriyle rekabet edebilecek seviyelere ulaştığı rapor edilmiştir. Bu bulgular deneysel olarak da desteklenmiş; PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı ve doğrusal zayıflama katsayısının belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Bu bulgular deneysel olarak da desteklenmiş; PLA/ Gd_2O_3 nanokompozitlerinde HVL değerinin saf PLA'ya göre azaldığı, doğrusal zayıflama katsayısının ise belirgin biçimde arttığı gösterilmiştir (Nuray, 2024).

Düşük enerjili X ışını bölgesinde (20–100 keV), selüloz ve kitosan kaynaklı biyopolimer kompozitlerinin ek avantajlar sunduğu da rapor edilmiştir. Bakteriyel selüloz bazlı filmlerde ve nişasta-kitosan-CNC sistemlerinde UV/görünür bölgede ışık geçirgenliğinin güçlü biçimde bastırıldığı ve bu yapılar da mekanik ile bariyer özelliklerinin korunduğu gösterilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Ayrıca kitosan bazlı yüksek Z katkılı filmlerde tanınal enerji seviyelerinde anlamlı gama zayıflatma verimliliğinin şeffaflık ve biyobozunurluk korunarak elde edilebildiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Hashim et al., 2019; Saied et al., 2024).

3.6.2. Nötron Yavaşlatma ve Karma Alan Koruması

Biyopolimer matrislerin %6 ile %8 aralığında olan doğal hidrojen içerikleri, hızlı nötron moderasyonu için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Selüloz, nişasta ve kitosan gibi polisakkarit yapılar da nötron iletiminin kalınlıkla birlikte üssel olarak azaldığı; bu eğilimin özellikle yüksek hidrojen yoğunluğu ve elastik saçılma süreçleriyle ilişkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Bawazeer et al., 2023; S. C. Gupta, Baheti, & Gupta, 2000; Karatas et al., 2025; Selçuk Pekdemir et al., 2025). Bu sonuçlar, biyopolimer matrislerin yüksek hidrojen içeriği sayesinde nötron moderasyonu açısından rekabetçi olabildiğini göstermektedir. Nişasta veya kitosan esaslı hibrit sistemlerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarının, nötron zayıflatma performansına ek katkı sağlayabildiği; elastik saçılmanın yanı sıra manyetik etkileşimlerin de nötron akısı dağılımını etkilediği geniş kapsamlı derleme çalışmaları tarafından vurgulanmaktadır (Bawazeer et al., 2023).

PLA tabanlı kompozitlerde de benzer bir eğilim görülmektedir. PLA- Gd_2O_3 ve PLA- Bi_2O_3 sistemlerinde, nötron moderasyonu ile foton soğurucunun aynı matris içinde birleştirildiği hibrit tasarımların karma radyasyon alanlarında ($\gamma + n$) eşzamanlı koruma sağlayabildiği; böylece

ayrı katmanlara duyulan ihtiyacın azaldığı Monte Carlo tabanlı çalışmalarda rapor edilmiştir (Akhdar & Alshehri, 2023; Niksarlıoğlu et al., 2023). Bu tür hibrit yapıların, hem yüksek Z katkılarının fotoelektrik etkileşimlerdeki etkinliği hem de polimer matrisin hidrojen kaynaklı nötron moderasyonu sayesinde çok işlevli bir koruma mekanizması sunduğu ifade edilmektedir.

3.6.3. Mekanik, Termal ve Çevresel Hususlar

Biyopolimer kompozitlerin radyasyon altında mekanik davranışları, zincir kopması ile radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma süreçlerinin dengesine bağlı olarak şekillenmektedir. Kitosan ve selüloz esaslı biyopolimer filmlerde, uygun ışınlama doz aralıklarında zincir kopması ve radyasyonla indüklenen çapraz bağlanma süreçlerinin dengesiyle yapısal bütünlüğün büyük ölçüde korunabildiği; bazı sistemlerde mekanik dayanım ve esnekliğin iyileşebildiği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Al-Masry et al., 2021; Duan et al., 2022; Vázquez et al., 2021). Örneğin kitosan–gliserol temelli filmlerde endüstriyel sterilizasyonu temsil eden gama dozları sonrasında kristalliğin azaldığı, ancak filmlerin elastikiyet ve optik bütünlüklerini koruduğu gösterilmiştir (Al-Masry et al., 2021). Bakteriyel selüloz esaslı filmlerde ise UV ışınları altında yüksek UV-engelleme kapasitesiyle birlikte mekanik ve bariyer özelliklerinin korunabildiği rapor edilmiştir (Vázquez et al., 2021).

Termal açıdan, yüksek atom numaralı metal oksit dolgularının PLA ve benzeri biyopolimer matrislerde ayrışma başlangıç sıcaklığını yükselttiği ve ısı kararlılığı artırdığı rapor edilmektedir. Özellikle PLA/Gd₂O₃ nanokompozitlerinde dolgu oranındaki artışın ayrışma sıcaklığını anlamlı ölçüde yükselttiği ve termal dayanımı güçlendirdiği deneysel olarak gösterilmiştir (Niksarlıoğlu et al., 2023). Çevresel açıdan bakıldığında biyopolimer tabanlı kalkanların toksik olmamaları, yenilenebilir kaynaklardan üretililebilmeleri ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri sayesinde yaşam döngüsü değerlendirmelerinde polivinil klorür (PVC) veya polietilen (PE) gibi geleneksel polimerlere kıyasla belirgin karbon ayak izi azaltımı sağladığı, ayrıca kurşunsuz polimerik sistemlerin medikal ortamlarda kullanım için güçlü adaylar olduğu literatürde vurgulanmaktadır (Karataş et al., 2025; More, Alsayed, Badawi, Thabet, & Pawar, 2021b; Okonkwo et al., 2023).

3.6.4. Uygulama Alanları

Radyolojik ve nükleer tıp tesislerinde, kurşunsuz alternatifler olarak biyopolimer esaslı çok katmanlı hafif önlükler ve cerrahi örtüler üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Bu sistemlerin tanınal X ışını enerjilerinde klinik gereksinimlere yakın koruma seviyelerine ulaşabildiği, buna karşın kütlelerinin metalik kalkanlara göre önemli ölçüde düşük olduğu rapor edilmektedir

(Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; Okonkwo et al., 2023). ZnO veya diğer fonksiyonel dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş şeffaf biyopolimer filmlerin, ışık bariyeri ve gaz geçirgenliği düşük yapıları sayesinde hassas ürünlerin ve radyofarmasötiklerin ambalajlanması için potansiyel adaylar olduğu belirtilmektedir. UV-engelleyici ve bariyer özellikleri iyileştirilmiş bakteriyel selüloz ve nişasta esaslı filmler, şeffaf koruyucu kaplama ve pencere benzeri uygulamalar için umut verici performans sergilemektedir (Al-Masry et al., 2021; Alves et al., 2024). Hidrojel sistemlerinin, geçici nötron moderasyonu amacıyla sökümler ve atık depolama sahalarında kullanılabilecek potansiyel adaylar olduğu ve bu tür hidrojelde yüksek su içeriği sayesinde nötron yavaşlatma kapasitesinin anlamlı ölçüde artabildiği çalışmalarla gösterilmiştir (S. C. Gupta et al., 2000).

ZnO veya grafen oksit katkılı selüloz/kitosan tabanlı filmlerin UV/gama sönümleme, antimikrobiyal aktivite ve EMI kalkanlama gibi çok işlevli özellikler sunabildiği; ayrıca selüloz ve nişasta içerikli matrislerde Fe_3O_4 gibi manyetik nanoparçacık katkılarıyla EMI ve gama zayıflatma performansının artırılabilirliği geniş kapsamlı derlemelerde ifade edilmektedir (Bawazeer et al., 2023; Díaz-Cruz et al., 2022; Hashim et al., 2019). Ek olarak, 3D baskılı PLA- Fe_3O_4 parçalarının giyilebilir dozimetre kasaları ve hafif EMI kalkanları olarak değerlendirildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022).

Bununla birlikte, yüksek Z dolgularının hidrofilik biyopolimer matrislerde homojen dağıtılması güç olabilmekte; aglomerasyon mekanik zayıflık ve zayıflatma anizotropisine neden olabilmektedir. Bu sorunun yüzey fonksiyonelleştirme stratejileri ve polimer matris içerisinde in-situ nanopartikül sentezi ile azaltılabildiği rapor edilmektedir (Mallakpour et al., 2021; Yue et al., 2023). Uzun süreli ışımda oksidatif bozunma ve renk değişimi görülebildiği; bu etkinin antioksidan katkılar ve uygun çapraz bağlama yöntemleriyle hafifletilebildiği bildirilmektedir (Al-Masry et al., 2021; Bawazeer et al., 2023). Nem emilimine duyarlı polisakkarit filmlerde ise hidrofobik kaplamalar ve plazma işlemlerinin etkili olduğu belirtilmektedir (S. C. Gupta et al., 2000).

Güncel araştırmalar, Monte Carlo ve diğer hesaplamalı yöntemlerin eklemeli imalat teknolojileriyle birleştirilmesinin yüksek performanslı biyopolimer kompozitlerinin tasarımını hızlandırdığını göstermektedir (Elsafi et al., 2022; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024). Sürdürülebilirlik, düşük yoğunluk, işlenebilirlik ve çok işlevlilik avantajları göz önünde bulundurulduğunda, biyopolimer kompozitlerin gelecek nesil çevre dostu radyasyon kalkanı teknolojilerinde önemli bir rol oynayacağı anlaşılmaktadır (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

3.7. Sentetik ve Yarı Sentetik Biyopolimerler: PCL, PVA ve PVP Sistemleri

Polisakkaritler ve alifatik polyesterler radyasyon kalkanlama çalışmalarında öne çıkan yenilenebilir biyopolimer sınıfını oluşturmakla birlikte, yarı sentetik ve sentetik biyoyumlu polimerlerin de özellikle poli(ϵ -kaprolakton) (PCL), PVA ve PVP radyasyon zırhlama uygulamalarında dikkat çektiği çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Bu polimerler petrokimyasal kökenli olmalarına rağmen, biyoyumluluk, kontrollü bozunabilirlik ve çevresel etkililiğe uygunluk gibi özellikleri nedeniyle literatürde çevre dostu ve hibrit kompozit tasarımlarında değerlendirilen polimer sınıfı içerisinde ele alınmaktadır (Bawazeer et al., 2023; Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Okonkwo et al., 2023).

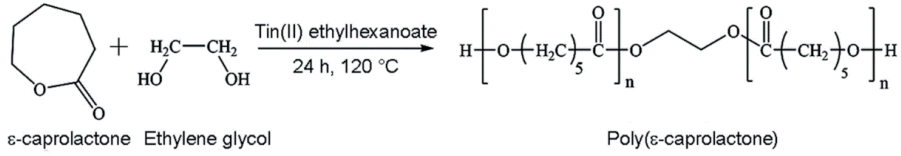
Yapısal ayarlanabilirlikleri, hidrofiliklikleri, geniş işleme pencereleri ve çok çeşitli inorganik nanoparçacıkları stabilize edebilme yetenekleri sayesinde bu polimerlerin, uygun dolgu kombinasyonları ile hem foton hem de nötron zayıflatma için çok yönlü matrisler oluşturabildiği rapor edilmiştir (El Rahman et al., 2024; S. C. Gupta et al., 2000; Thongpool et al., 2015).

3.7.1. Poli(ϵ -kaprolakton) (PCL)

Poli(ϵ -kaprolakton), ϵ -kaprolaktonun halka açılma polimerizasyonu yoluyla elde edilen yarı kristalin ve düşük erime sıcaklıklı ($\approx 60^\circ\text{C}$) bir alifatik poliester olarak Şekil 2'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır (Pekdemir, Öner, Kök, & Qader, 2021). Kolay işlenebilirliği, esnekliği ve hidrojen bakımından zengin kimyasal yapısı, PCL'yi radyasyon zırhlı tasarımında uygun bir aday hâline getirmektedir. PCL'nin FeS_2 , Bi_2O_3 ve ZnO gibi yüksek Z'li veya manyetik dolgu maddelerini başarıyla barındırabildiği ve bu katkıların foton zayıflatma verimliliğini anlamlı şekilde artırdığı çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. PCL/PVC matrisine %20 FeS_2 nanoparçacığı eklendiğinde, 662 keV gama fotonları için doğrusal zayıflama katsayısının belirgin biçimde arttığı ve HVL değerinin azaldığı; böylece kurşun esaslı polimer kauçuk sistemlere yakın bir performans elde edildiği rapor edilmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022). FeS_2 katkısının ayrıca ayrışma başlangıç sıcaklığını yükselterek kompozitin radyasyon altındaki termal dayanımını iyileştirdiği belirtilmektedir.

Yüksek Z oksitlerle güçlendirilmiş polimer matrislerde, tanınal foton enerjilerinde epoksi bismut benzeri ticari kurşunsuz kompozitlerle karşılaştırılabilir kütle zayıflama katsayılarının elde edilebildiği ve bu eğilimin PCL sistemleri için de geçerli olduğu çeşitli derlemelerde bildirilmektedir (Okonkwo et al., 2023). Ayrıca yüksek Z katkılarının düşük enerjili foton

bölgesinde fotoelektrik soğurmayı artırdığı, buna karşın PCL'nin sahip olduğu şeffaflık, esneklik ve işlemeye uygunluk gibi özelliklerin korunduğu vurgulanmaktadır (Karataş et al., 2025). PCL'nin yavaş bozunma kinetiği, mekanik esnekliği, yüksek radyasyon toleransı ve dolgu maddeleriyle uyumlu yapısı nedeniyle nükleer tesislerde, elektronik muhafaza yapılarında ve orta vadeli koruyucu yapı elemanlarında kullanılabilecek sürdürülebilir bir biyopolimer matris olduğu ifade edilmektedir (Díaz-Cruz et al., 2022; Pekdemir et al., 2021).



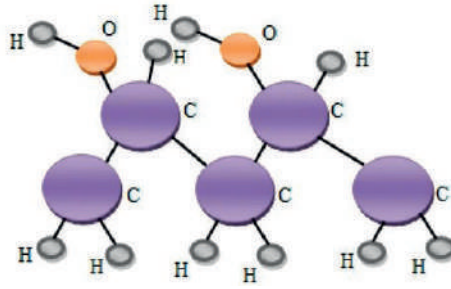
Şekil 2. PCL'nin halka açılma yoluyla polimerizasyonun şematik gösterimi (Pekdemir et al., 2021)

3.7.2. Poli(vinil alkol) (PVA)

Poli(vinil alkol), zincir boyunca hidroksil grupları içeren yarı kristalin ve suda çözünebilen bir polimerdir. PVA'nın tipik üretim süreci, polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenmesi şeklindedir ve bu süreç Şekil 3'te şematik olarak sunulmuştur (Gaaz et al., 2015). Yoğun hidrojen bağı ağı sayesinde yüksek mekanik mukavemet ve iyonlaştırıcı radyasyona karşı belirgin dayanım sergilediği; orta doz aralığında (<50 kGy) baskın olarak çapraz bağlanma mekanizmasının görüldüğü ve bunun boyutsal stabiliteyi artırdığı çeşitli çalışmalarca bildirilmiştir (Coqueret, 2024; Omar & Elnabi, 2011).

PVA bazlı kompozitler, gama ve X-ışını koruması için kapsamlı olarak incelenmiştir. CMC-PVP-PbO₂ benzeri ağır metal oksit katkılı sistemlerde olduğu gibi, PbO₂ ve diğer yüksek Z oksitlerle güçlendirilmiş PVA filmlerinde tanınal foton enerjilerinde yüksek doğrusal zayıflama katsayıları elde edildiği ve dolgu oranının artışıyla koruma performansının düzenli biçimde yükseldiği rapor edilmiştir (Hashim et al., 2019). BaSO₄ katkılı PVA kompozitlerinin ise özellikle 100 keV altındaki foton enerjilerinde yüksek zayıflama verimliliği sunduğu bildirilmiştir (Thongpool et al., 2015). Bu sistemlerde, düşük katkı yüklemelerinde optik şeffaflığın büyük ölçüde korunması, PVA tabanlı kurşunsuz radyasyon koruyucu pencereler için önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Montmorillonit gibi nanokil takviyelerinin PVA matrisinde gaz bariyeri davranışını, mekanik dayanımı ve radyolitik stabiliteyi geliştirdiği ifade edilmektedir (Gaaz et al., 2015; Yue et al., 2023). PVA'nın yüksek hidrofilik yapısı ve su tutma kapasitesi, nötron moderasyonu amacıyla hidrojel formunda kullanılmasına da olanak tanımaktadır. PVA-temelli radyasyonla çapraz bağlanmış hidrojellerin nötron yumuşatıcı ortamlar, geçici koruyucu tabakalar ve dozimetrik fantomlar olarak kullanılabildiği; yapılan deneysel çalışmaların suca zengin PVA hidrojellerinin hızlı nötronlar için etkili bir yavaşlatıcı ortam oluşturduğunu gösterdiği belirtilmiştir (S. C. Gupta et al., 2000).



Şekil 3. Polivinil asetatın hidrolizi ile sentezlenen PVA (Gaaz et al., 2015)

3.7.3. Poli(vinilpirolidon) (PVP)

Poli(vinilpirolidon) (PVP), polar laktam fonksiyonları içeren amfifilik bir polimer olup nanoparçacıkları stabilize etme, metal oksitleri homojen dağıtma ve polimer-inorganik ara yüzey bağlarını güçlendirme özellikleriyle bilinmektedir. PVP'nin orta düzey radyasyon dozlarında kimyasal kararlılığını koruduğu, zincir kopmasının sınırlı düzeyde gerçekleştiği ve radyasyonla indüklenen yapısal bozulmalara karşı belirgin dayanım sergilediği çeşitli çalışmalar tarafından rapor edilmiştir (El Rahman et al., 2024; Hashim et al., 2019; Lenfeld et al., 2020).

PVP'nin nanoparçacık stabilizasyonundaki rolü özellikle kurşunsuz esnek zırh tasarımlarında önem taşımaktadır. CMC-PVP-PbO₂ kompozitlerinde PbO₂ yükleme oranının artırılmasıyla 59.5 keV foton enerjisinde kütle zayıflama katsayısının anlamlı şekilde yükseldiği, HVL değerlerinin azaldığı ve esnekliğin korunduğu gösterilmiştir (Hashim et al., 2019). PVP ayrıca üretim sırasında nanoparçacık agregasyonunu engelleyerek dolgu maddelerinin matris içerisinde daha homojen dağılmasını sağlamakta, bu durum hem foton zayıflatma verimliliğini hem de mekanik kararlılığı

artırmaktadır (El Rahman et al., 2024; Mallakpour et al., 2021). PVA/PVP karışım matrisleri içerisinde yüksek Z nanodoldurucular (Bi_2O_3 , WO_3 vb.) kullanılarak elde edilen kompozitlerde ise 100 kGy'ye kadar kümülatif radyasyon dozları altında yapısal bütünlüğün korunduğu ve gama zayıflatma katsayılarının yüksek kaldığı belirtilmiştir. Bu bulgular, PVP'nin radyokimyasal dayanımının güçlü bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Lenfeld et al., 2020; Nuray, 2024).

PVP'nin polar fonksiyonel gruplara sahip katkı maddelerine yüksek afinitesi, onu PLA ve PCL gibi hidrofobik biyopolimer sistemlerinde uyumlulaştırıcı bir ara faz hâline getirmektedir. Bu etkileşim, hem organik polimer zincirleri hem de inorganik dolgu maddeleri ile güçlü ara yüzey bağlanmalarının oluşmasını sağlayarak kompozitin bütünsel mekanik performansını ve radyasyon altındaki stabilitesini artırmaktadır (El Rahman et al., 2024; Hashim et al., 2019). Bu bulguların tümü birlikte değerlendirildiğinde PCL, PVA ve PVP sistemlerinin yüksek Z nanoparçacıkları ile uyumluluğu; hidrojen içeriği nedeniyle nötron moderasyonuna katkısı; radyasyon altında yapısal stabiliteyi koruma yeteneği; işlenebilirlik, şeffaflık ve çok yönlü kompozit tasarımına uygunlukları sayesinde sürdürülebilir ve hafif radyasyon kalkanlama teknolojilerinde önemli tamamlayıcı bileşenler olduğu anlaşılmaktadır. Bölümde sunulan karşılaştırmalar Tablo 1'de özetlenmiştir (Díaz-Cruz et al., 2022; El Rahman et al., 2024; Gaaz et al., 2015; Hashim et al., 2019; Pekdemir et al., 2021).

4. Sonuç

Biyopolimerler, radyasyon kalkanı alanında giderek artan bir biçimde dönüştürücü bir malzeme sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemlerin sürdürülebilirlik, işlevsellik ve yapısal ayarlanabilirlik açısından sunduğu geniş tasarım alanı, geleneksel metalik ve petrokimyasal bazlı kalkanlama çözümlerinin ötesine geçen yeni bir yaklaşımı temsil etmektedir. Hidrojen bakımından zengin moleküler iskeletleri hızlı nötronların moderasyonu için doğal bir avantaj sağlarken; yüksek atom numaralı oksitler, boratlar, metalik nanopartiküller ve manyetik dolgu maddelerinin entegre edilmesi gama, X ışını ve elektromanyetik radyasyonun etkili bir şekilde zayıflatılmasına olanak tanımaktadır (Chang et al., 2023; Karataş et al., 2025; More et al., 2021a).

Son on yılda nanoteknoloji, hibrit kompozit mühendisliği ve eklemeli üretimde kaydedilen gelişmeler, biyopolimerlerin mekanik dayanımını, radyasyon toleransını, bariyer özelliklerini ve çok işlevliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Selüloz, kitosan, nişasta ve polilaktik asit (PLA) gibi doğal biyopolimerler üzerine yapılan çalışmalar; bu sistemlerin doğrusal zayıflama

katsayısı (LAC), kütle zayıflama katsayısı (MAC) ve yarı değer kalınlığı (HVL) açısından geleneksel polimer matrisleriyle rekabet edebildiğini, hatta belirli koşullarda ağır metal katkılı ticari kompozitlere yaklaşabildiğini göstermektedir (Al-Masry et al., 2021; Darie-Niță & Frackowiak, 2025; Duan et al., 2022; Sarkar et al., 2019). Bu biyopolimerik yapılar; düşük toksisite, biyolojik olarak parçalanabilirlik, düşük yoğunluk ve yüksek esneklik gibi yıllardır hedeflenen çevresel ve ergonomik avantajları sağlar.

Bu doğal matrisleri tamamlayan poli(ϵ -kaprolakton) (PCL), poli(vinil alkol) (PVA) ve poli(vinilpirolidon) (PVP) gibi sentetik ve yarı sentetik biyopolimerler ise radyasyon kalkını tasarımıında ek esneklik sunmaktadır. Kontrollü radyokimyasal kararlılıkları, ışınlama altında çapraz bağlanma davranışları ve nanopartikül stabilize edebilme özellikleri sayesinde; FeS₂, Bi₂O₃, PbO₂ ve ZnO gibi yüksek Z dolgu maddeleriyle birleştirildiklerinde düşük ve orta enerjili fotonlarda yüksek LAC değerleri ve düşük HVL performansları elde edilebilmektedir (Díaz-Cruz et al., 2022; Karataş et al., 2025; Okonkwo et al., 2023; Saied et al., 2024). PCL'nin esnekliği ve yavaş bozunma profili onu hafif ve giyilebilir kalkanlar için uygun bir matris hâline getirirken, PVA'nın hidrofilik yapısı ve ışınlama altında çapraz bağlanma eğilimi nötron yumuşatıcı hidrojel formülasyonlarında avantaj sağlamaktadır (S. C. Gupta et al., 2000). PVP ise yüksek radyokimyasal kararlılığı ve nanoparçacıkların homojen dağılımını iyileştirme kapasitesi sayesinde hibrit biyopolimer sistemlerinde etkili bir uyumlulaştırıcı faz olarak görev yapmaktadır (Hashim et al., 2019; Lenfeld et al., 2020; Saied et al., 2024).

Bütün bu gelişmelere karşın, biyopolimer tabanlı kalkanların geniş ölçekli uygulamalara tam olarak entegre edilebilmesi için bazı teknik sınırlamaların aşılması gerekmektedir. Uzun süreli ışımada oksidatif bozunma, yüksek Z dolgularının hidrofilik matrislerde homojen dağıtılmasındaki zorluklar, ışınlama altında mekanik performansın değişimi, nem emiliminin bariyer özellikleri üzerindeki etkisi ve üretim süreçlerinin ölçeklenebilirliği başlıca kısıtlayıcı faktörlerdir (Al-Masry et al., 2021; Bawazeer et al., 2023; Yue et al., 2023).

Yine de son yıllardaki araştırmalar, çok ölçekli modelleme, moleküler dinamik simülasyonları ve Monte Carlo tabanlı radyasyon-malzeme etkileşim analizlerinin biyopolimer kompozitlerin tasarımını hızlandırdığını ortaya koymaktadır (Elsafi et al., 2022; Niksarlıoğlu et al., 2023; Nuray, 2024; Okonkwo et al., 2023). Bu hesaplamalı yaklaşımların eklemeli üretim teknikleri ve makine öğrenimi yöntemleriyle birleştirilmesi, kompozit bileşiminin hedeflenen foton ve nötron enerjilerine göre optimize edilmesine

olanak tanıyarak kişiselleştirilmiş kalkan mimarilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde hem yenilenebilir doğal biyopolimerler hem de onların sentetik türevleri radyasyon kalkanı teknolojilerinde yalnızca geleneksel malzemelerin çevreci bir alternatifi değil, aynı zamanda çok işlevli, hafif, yüksek performanslı ve sürdürülebilir yeni bir malzeme paradigmasının merkezinde yer almaktadır. Bu sınıfın sunduğu düşük karbon ayak izi, toksik olmayan üretim potansiyeli ve geri dönüştürülebilirlik özellikleri; biyopolimer tabanlı kompozitleri geleceğin dairesel ekonomi odaklı radyasyon koruma stratejilerinde güçlü adaylar hâline getirmektedir (Chang et al., 2023; More et al., 2021b; Vázquez et al., 2021).

Tablo 1. Sentetik polimerlerin karşılaştırmalı tablosu.

Polimer	Temel Nitelikler	Radyasyon Davranışı	Tipik Dolgu Maddeleri	Uygulamalar
PCL	Esnek, yarı kristalin, yavaş bozunan	Düşük-orta γ dozlarında stabil; FeS_2 ve yüksek Z oksit katkılarıyla foton zayıflatma performansı artırılabilir (Selçuk Pekdemir et al., 2025)	FeS_2 , Bi_2O_3 , ZnO	Giyilebilir hafif kalkanlar, kablo kaplamaları, yapısal filmler
PVA	Hidrofilik, çapraz bağlanabilir, güçlü hidrojen bağları	İyonlaştırıcı radyasyon altında çoğunlukla çapraz bağlanır; hidrojel formunda iyi nötron moderasyonu sağlar (Al-Masry et al., 2021 ; Bawazeer et al., 2023 ; Omar & Elnabi, 2011)	PbO_2 , BaSO_4 , montmorillonit	Şeffaf koruyucu camlama filmleri, nötron hidrojenleri, tıbbi koruyucu bariyerler
PVP	Amfifilik, yüksek nanoparçacık stabilizasyon kapasitesi, şeffaf	Yüksek radyokimyasal kararlılık; zincir kırılması minimum düzeydedir, yüksek Z dolgu ile iyi gama zayıflatma sunar (Karataş et al., 2025 ; Yue et al., 2023)	PbO_2 , Bi_2O_3 , WO_3	Esnek kurşunsuz zırh filmleri, nanoparçacık dağıtıcı/stabilizatör, uyumlulaştırıcı kaplamalar

Kaynakça

- Akhdar, H., & Alshehri, M. (2023). Geant4 simulation of photon-and neutron-shielding capabilities of biopolymer blends of poly (lactic acid) and poly (hydroxybutyrate). *Polymers*, 15(21), 4257.
- Al-Masry, W. A., Haider, S., Mahmood, A., Khan, M., Adil, S. F., & Siddiqui, M. R. H. (2021). Evaluation of the thermal and morphological properties of γ -irradiated chitosan-glycerol-based polymeric films. *Processes*, 9(10), 1783.
- Alves, Z., Brites, P., Ferreira, N. M., Figueiredo, G., Otero-Irurueta, G., Gonçalves, I., . . . Nunes, C. (2024). Thermoplastic starch-based films loaded with biochar-ZnO particles for active food packaging. *Journal of Food Engineering*, 361, 111741.
- Bawazeer, O., Makkawi, K., Aga, Z. B., Albakri, H., Assiri, N., Althagafy, K., & Ajlouni, A.-W. (2023). A review on using nanocomposites as shielding materials against ionizing radiation. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 9(3), 325-340
- Chang, Q., Guo, S., & Zhang, X. (2023). Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*, 233, 112253.
- Coqueret, X. (2024). Radiation-induced cross-linking polymerization: Recent developments for coating and composite applications. *Nukleonika*, 69.
- Darie-Niță, R. N., & Frackowiak, S. (2025). An Overview of Potential Applications of Environmentally Friendly Hybrid Polymeric Materials. *Polymers*, 17(2), 252.
- Díaz-Cruz, C. A., Caicedo, C., Jiménez-Regalado, E. J., Díaz de León, R., López-González, R., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Evaluation of the antimicrobial, thermal, mechanical, and barrier properties of corn starch–chitosan biodegradable films reinforced with cellulose nanocrystals. *Polymers*, 14(11), 2166.
- Duan, Q., Chen, Y., Yu, L., & Xie, F. (2022). Chitosan–gelatin films: plasticizers/nanofillers affect chain interactions and material properties in different ways. *Polymers*, 14(18), 3797.
- El Rahman, A., Metwally, H., Sabry, N., & Mohammed, M. (2024). Gamma-ray shielding effectiveness, optical, mechanical, dielectric properties of nanofiller-reinforced PVA/PVP polymeric blend nanocomposites. *Scientific reports*, 14(1), 27466.
- Elsafi, M., El-Nahal, M., Sayyed, M., Saleh, I., & Abbas, M. (2022). Novel 3-D printed radiation shielding materials embedded with bulk and nanoparticles of bismuth. *Scientific Reports*, 12(1), 12467.
- Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., & Al-Amiery, A. A. (2015). Properties and applications of polyvinyl al-

- cohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites. *Molecules*, 20(12), 22833-22847.
- Gupta, S. C., Baheti, G., & Gupta, B. (2000). Application of hydrogel system for neutron attenuation. *Radiation Physics and Chemistry*, 59(1), 103-107.
- Hashim, A., Al-Attiyah, K., & Obaid, S. (2019). Fabrication of novel (biopolymer blend-lead oxide nanoparticles) nanocomposites: structural and optical properties for low-cost nuclear radiation shielding. *Ukrainian journal of physics*(64,№ 2), 157-163.
- Karatas, O., Ercan, H. U., Altin, M., Ogul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227.
- Karataş, Ö., Ercan, H. Ü., Altın, M., Oğul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227, 112396.
- Lenfeld, P., Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., & Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers on properties and characterization of biopolymer composites. *Polymers*, 12(12), 3006.
- Mallakpour, S., Tukhani, M., & Hussain, C. M. (2021). Sustainable plant and microbes-mediated preparation of Fe₃O₄ nanoparticles and industrial application of its chitosan, starch, cellulose, and dextrin-based nanocomposites as catalysts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 179, 429-447.
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021a). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(3), 2057-2090.
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021b). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 2057-2090.
- Nafee, S., Tijani, S., Al-Hadeethi, Y., & Hussein, M. A. (2024). Radiation shielding potential of cellulose acetate-CdO-ZnO polymer composites in comparison with concrete and gypsum. *Radiation Physics and Chemistry*, 225, 112145.
- Niksarlıoğlu, S., Akman, F., Pekdemir, M. E., Kuzu, S. Y., Kaçal, M. R., & Yılmaz, M. (2023). An extensive investigation on gamma shielding properties of PLA/Gd₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110936.
- Nuray, K. (2024). Neutron shielding properties of cellulose acetate CdO-ZnO polymer composites. *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng*, 10.

- Okonkwo, U. C., Idumah, C. I., Okafor, C. E., & Ezeani, E. O. (2023). Construction of radiation attenuating polymeric nanocomposites and multifaceted applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62(12), 1639-1661.
- Omar, M. A. A., & Elnabi, M. E. M. G. (2011). Gamma radiation synthesis and characterization of polyvinyl alcohol/silver nano composites film. *Journal of Science and Technology*, 12(1), 104-110.
- Pekdemir, M. E., Öner, E., Kök, M., & Qader, I. N. (2021). Thermal behavior and shape memory properties of PCL blends film with PVC and PMMA polymers. *Iranian Polymer Journal*, 30(6), 633-641.
- Pekdemir, M. E., Pekdemir, S. S., Yılmaz, D., Onay, H., & Nazem Qader, I. (2025). Snail Shell-Reinforced Waste-Based Polymer Composites for Radiation Shielding and Anti-Reflective Applications. *Polymers*, 17(23), 3115.
- Saied, M., Ward, A., & Hamieda, S. F. (2024). Effect of apricot kernel seed extract on biophysical properties of chitosan film for packaging applications. *Scientific reports*, 14(1), 3430.
- Sarkar, A. K., Bediako, J. K., Choi, J.-W., & Yun, Y.-S. (2019). Functionalized magnetic biopolymeric graphene oxide with outstanding performance in water purification. *NPG Asia Materials*, 11(1), 4.
- Selçuk Pekdemir, S., Yalçın Kuzu, S., Yılmaz, D., Pekdemir, M. E., Taş, R., & Kök, M. (2025). Physicochemical, Radiation Shielding, and Anti-Reflective Properties of PCL/PVC Nanocomposites Reinforced With Microwave-Synthesized FeS₂ Nanospheres. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(45), e57737.
- Shahriar Kabir, M., Hossain, M. S., Mia, M., Islam, M. N., Rahman, M. M., Hoque, M. B., & Chowdhury, A. S. (2019). Mechanical properties of gamma-irradiated natural fiber reinforced composites. *Nano hybrids and composites*, 23, 24-38.
- Thongpool, V., Phunpueok, A., Barnthip, N., & Jaiyen, S. (2015). BaSO₄/polyvinyl alcohol composites for radiation shielding. *Applied Mechanics and Materials*, 804, 3-6.
- Vázquez, M., Velázquez, G., & Cazón, P. (2021). UV-Shielding films of bacterial cellulose with glycerol and chitosan. Part I: equilibrium moisture content and mechanical properties. *CyTA-Journal of Food*, 19(1), 105-114.
- Yue, S., Wang, S., Hana, D., Huang, S., Sun, L., Xiao, M., & Meng, Y. (2023). Polyvinyl alcohol/montmorillonite nanocomposite coated biodegradable films with outstanding barrier properties. *ES Materials & Manufacturing*, 20(2), 834.

Biyopolimer Tabanlı Fonksiyonel Malzemeler: Yapısal Tasarım, Uygulamalar ve Gelecek Perspektifleri

Umut Çelikoğlu¹

Özet

Malzeme biliminin bugünlerde neden bu kadar hareketli olduğunu anlamak isterseniz, biyopolimer tabanlı malzemelere bakmanız yeterli. Sürdürülebilirlik, biyolojik uyum ve çok yönlülükleri sayesinde bu alan hızla büyüyor. Doğal, mikrobiyal ya da modifiye edilmiş seçenekler, sahip oldukları esnek kimyasal yapılarla mühendislik dünyasına geniş kapılar açıyor. Örneğin selüloz, kitosan, aljinat ve hiyalüronik asit gibi doğal kaynaklar hem mekanik güçleri hem de doğada çözünebilmeleriyle dikkat çekerken, mikrobiyal polimerler olan PHB ve PHA türevleri bildiğimiz plastiklere karşı güçlü birer alternatif olarak karşımıza çıkıyor. Benzer şekilde mikrobiyal polisakkaritler ve pigment protein kompleksleri de biyomedikalden çevreye kadar pek çok soruna çözüm üretiyor. Bu ham maddeleri işlevsel bir ürüne dönüştürmek ise sürecin en kritik kısmı. Çapraz bağlama, nanokompozit üretimi, elektro-eğirme, kriyojelasyon veya 3D ve 4D biyobaskı gibi ileri teknikler burada devreye giriyor. Bu yöntemlerle sadece sağlam değil, aynı zamanda çevresine tepki veren, gözenekli ve hatta kendini onarabilen akıllı yapılar tasarlayabiliyoruz. Sonuç olarak doku iskelelerinden akıllı yara örtülerine, ilaç taşıma sistemlerinden biyobozunur ambalajlara, ağır metal gideriminden esnek sensörlere kadar hayatın pek çok noktasında bu teknolojileri başarıyla kullanıyoruz. Bugün araştırmalar daha çok nanokompozit hidrojel ve akıllı sistemler üzerine yoğunlaşsa da ölçeklenebilir üretim, maliyet ve standardizasyon gibi aşılması gereken bazı engeller hala masada duruyor. Yine de biyopolimerler, doğa ile ileri teknolojinin kesiştiği o noktada durarak geleceğin yenilikçi çözümlerini şekillendirmeye en güçlü adaylardan biri olmaya devam ediyor.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü/Merkezi Araştırma Uygulama Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (AUMAULAB), umut.celikoglu@amasya.edu.tr, 0000-0003-0995-8154

1. Giriş

Canlı organizmalardan elde edilen biyopolimerler, doğayla dost yapıları sayesinde petrol kökenli plastiklere karşı en güçlü alternatiflerden biri haline geldi. Hem yenilenebilir olmaları hem de çoğu zaman doğada kendiliğinden çözünebilmeleri, onlara duyulan ilgiyi haklı olarak artırıyor.

Polisakkaritler, proteinler, nükleik asitler ya da mikrobiyal kökenli polimerler... Bu malzemelerin sunduğu yapısal çeşitlilik gerçekten etkileyici. Zengin fonksiyonel özellikleri sayesinde tıbbi implantlardan akıllı ambalajlara, hassas sensörlerden enerji depolama sistemlerine kadar uzanan geniş bir yelpazede karşımıza çıkıyorlar (Mohammed & Mahmood, 2024).

Dünya genelinde artık rüzgârın yönü değişti; yeşil dönüşüm, döngüsel ekonomi ve karbon ayak izini küçültme hedefleri, biyopolimer tabanlı malzemeleri hiç olmadığı kadar kıymetli bir hale getirdi. Özellikle tek kullanımlık plastiklere karşı getirilen yasaklar ve düzenlemeler bu süreci hızlandırıyor. Gıda ambalajından kozmetiğe, hatta medikal ürünlere kadar pek çok alanda artık doğadan gelen ve doğada çözünebilen akıllı sistemlere duyulan ihtiyaç giderek büyüyor (Perera, Jaiswal & Jaiswal, 2023; Venkatesan ve diğ., 2025).

Aynı zamanda kişiselleştirilmiş tıp, hedefe yönelik ilaç taşıma, gelişmiş yara örtüleri ve doku mühendisliği iskeleleri söz konusu olduğunda; uyarılara tepki verebilen o akıllı biyopolimer sistemlerin, araştırmaların en kritik ve hareketli alanlarından biri haline geldiğini görüyoruz (Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024; Baishya ve diğ., 2024).

Bu bölümde biyopolimer tabanlı fonksiyonel malzemeleri adım adım inceliyoruz. Önce temel sınıflandırmalarına ve moleküler özelliklerine bakacak, ardından yapısal tasarım ilkeleriyle işleme tekniklerini konuşacağız. Biyomedikal, kozmetik, çevre ve enerji gibi alanlardaki uygulamaları gördükten sonra ise rotamızı güncel trendlere ve geleceğe dair perspektiflere çevireceğiz.

2. Biyopolimerlerin Moleküler Yapısı ve Sınıflandırılması

2.1. Doğal Biyopolimerler

Biyopolimer tabanlı malzeme tasarımından bahsettiğimizde, aslında sahnedeki başrol oyuncularını bellidir: selüloz, kitosan, aljinat, pektin, hiyalüronik asit ve nişasta türevleri. Önce selüloza bakalım. Yapısındaki o sıkı β -(1→4) bağlarıyla birbirine tutunmuş glukoz birimlerini düşündüğünüzde, neden bu kadar yüksek bir mekanik dayanıma ve kristal yapıya sahip olduğunu

anlamak zor değil. Üstelik sadece sağlam değil, yapısındaki hidroksil grupları sayesinde kimyasal olarak modifiye edilmeye, yani ihtiyacınıza göre şekillendirilmeye oldukça müsait. Bir de kitosan var ki, o biraz daha farklı bir karakter. Kitinden elde edilen bu pozitif yüklü (katyonik) yapı hem mikroplara karşı etkisiyle hem de metal iyonlarını yakalama becerisiyle öne çıkıyor. Bu özellikleri onu tıbbi uygulamalardan çevre projelerine kadar pek çok alanda avantajlı kılıyor. Aljinat tarafında ise işler jelleşme yeteneğiyle ilginçleşiyor. Mannuronik ve guluronik asit bloklarından oluşan bu yapı, kalsiyum gibi iyonlarla karşılaştığında hızla çapraz bağlar kurarak jel haline gelebiliyor (Santhamoorthy & Kim, 2025). Eğer kontrollü salım sistemleri üzerinde çalışıyorsanız, aljinatın bu özelliği onu listenizin en başına taşıyabilir.

Proteinler konusuna değinelim. Kolajen, jelatin, fibroin, elastin ve zein gibi protein bazlı biyopolimerler, doku mühendisliği iskelelerinde oldukça yoğun bir şekilde kullanılıyor (Mohammed & Mahmood, 2024). Neden dersiniz, bu yapılar doğal ekstraselüler matrisi (ECM) başarıyla taklit ediyor. Aynı zamanda RGD motifleri gibi peptit dizileri sayesinde hücrelerin tutunmasını ve çoğalmasını destekliyorlar. Tüm bunlara eklenen biyobozunurluk özellikleri de onları bu alanda vazgeçilmez kılıyor. İpek fibroini, o zengin beta-sheet yapısı sayesinde hem şaşırtıcı bir mekanik dayanım sunuyor hem de işlemesi gayet rahat. İşte bu yüzden elektrospin, film döküm, kriyojelasyon veya 3D baskı gibi farklı yöntemlerde kullanmak için gerçekten ideal bir malzeme.

Nükleik asit temelli yapılara, yani DNA ve RNA'ya baktığımızda artık karşımızda sadece klasik, hacimli polimer malzemeler yok. Bunun yerine, programlanabilir supramoleküler mimariler ve DNA origami gibi nanoyapılar inşa etmek için kullandığımız gelişmiş araçlar var. Bu yapıları biyopolimer matrislerle bir araya getirdiğimizde ise ortaya gerçekten akıllı çözümler çıkıyor. Hedefe yönelik ilaç salımı yapan sistemlerden tutun da çevresel uyarılara tepki veren sensörlere kadar pek çok yenilikçi teknoloji bu sayede hayat buluyor (Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024).

2.2. Mikrobiyal Biyopolimerler

Son yıllarda sürdürülebilir malzeme geliştirme denildiğinde, mikroorganizmaların sentezlediği biyopolimerler işin tam kalbine yerleşmiş durumda. Bakteri, maya, mantar ve siyanobakteriler gibi canlıların ürettiği bu malzemeler; doğada çözünebilmesi, toksik olmaması, çevre dostu üretim süreçleri ve sürdürülebilir kaynak sağlamasıyla öne çıkıyor. Ayrıca işlenebilirlikleri ve ihtiyaca göre ayarlanabilen kimyasal yapıları sayesinde hem akademik dünyada hem de endüstride kritik bir öneme sahipler.

Mikrobiyal biyopolimerler dediğimizde aslında çok geniş bir alandan söz ediyoruz; yapısal polimerlerden tutun da fonksiyonel polisakkaritlere, biyobozunur termoplastiklerden pigment protein komplekslerine kadar uzanan bir çeşitlilik var. Aşağıda bu biyopolimerleri daha net anlamak adına dört temel sınıfa ayırarak detaylıca inceledik: (i) mikrobiyal polyesterler, (ii) mikrobiyal polisakkaritler, (iii) mikrobiyal protein ve pigment kompleksleri ve (iv) hücre dışı matriks, yani ECM kökenli biyopolimerler.

2.2.1. Mikrobiyal Polyesterler: PHA, PHB, PHBV ve Türevleri

Polihidroksialkanoatlar, ya da daha bilinen adıyla PHA'lar, aslında bakterilerin zor zamanlar için ürettiği bir nevi hayatta kalma deposu. Bakteriler bolca karbon bulup azot, fosfor veya oksijen gibi temel besinlere ulaşamadıklarında strese giriyor ve bu biyobozunur termoplastik polimerleri sentezlemeye başlıyorlar. Bu ailenin en sık karşılaştığımız üyeleri arasında PHB, PHBV, PHBH ve PHO yer alıyor. Özellikle PHB ilginç bir malzeme; dayanıklılık açısından bildiğimiz polipropilene çok benziyor ama yapısı doğal haliyle epey kırılgan. Bu yüzden genellikle olduğu gibi kullanmak yerine biraz modifiye edilmesi gerekiyor. İşte bu noktada PHBV gibi kopolimerler devreye giriyor. Bunlar hem daha esnek hem de işlenmesi çok daha kolay. Bu özellikleri sayesinde biyomedikal implantlarda, ameliyat ipliklerinde, ilaç taşıyan mikro kapsüllerde ve doku mühendisliği iskelelerinde şimdiden büyük bir potansiyel göstermeye başladılar (Venkatesan ve diğ., 2025).

2.2.2. Mikrobiyal Polisakkaritler: Pullulan, Xanthan, Gellan, Levan ve Diğerleri

Mikrobiyal polisakkaritler, sahip oldukları yapısal ve işlevsel zenginlik sayesinde artık sadece laboratuvarların konusu değil. Gıdadan kozmetiğe, ambalajdan biyomedikal çözümlere kadar pek çok sektörde büyük bir heyecan yaratıyorlar. İlk olarak Pullulan ile başlayalım. *Aureobasidium pullulans* tarafından üretilen bu lineer yapı, özellikleriyle gerçekten öne çıkıyor. Mükemmel film oluşturabiliyor, oksijene karşı güçlü bir bariyer kuruyor, doğada yok olabiliyor ve toksik değil. İşte bu yüzden yenilebilir ambalajlardan akıllı sensörlere, ilaç kaplamalarından yüz maskelerine kadar her yerde karşımıza çıkıyor (González-López ve diğ., 2023). Sonra gıda endüstrisinden tanıdık gelebilecek Xanthan Gum var. *Xanthomonas campestris* tarafından sentezlenen bu viskoz madde, sadece kıvam artırmakla kalmıyor. Çapraz bağlanmış hidrojelleriyle yara örtülerinde, hücre taşımada veya probiyotiklerin korunmasında kritik roller üstleniyor (Mirmasoudi ve diğ., 2025). Gellan Gum ise *Sphingomonas elodea* kaynaklı anyonik bir polisakkarit olarak listeye giriyor. Onu özel kılan şey, ısıyla geri dönüşebilen jel yapısı.

Bu özellik, onu 3D biyobaskı mürekkepleri, göz damlası jelleri ve doku mühendisliğindeki yumuşak doku çalışmaları için ideal bir aday yapıyor (Sahranavard ve diğ., 2025; Paganini ve diğ., 2025). Tabii liste bunlarla sınırlı değil. Bugün kozmetikte ve tıpta kullandığımız Hyaluronik asidin çoğu artık mikrobiyal yollarla üretiliyor. Deniz bakterilerinden elde edilen agaroz benzeri yapılar veya bakterilerin çevreyle etkileşimini sağlayan, metal tutma kapasitesi yüksek EPS yapıları da bu dünyanın diğer gizli kahramanları arasında yer alıyor (Sheng ve diğ., 2010).

2.2.3. Mikrobiyal Proteinler ve Pigment-Protein Kompozitleri

Bu kategoriye odaklandığımızda, karşımıza doğanın o minik ama hamarat fabrikaları çıkıyor; yani siyanobakteriler ve kırmızı mikro algler. Bunların ürettiği pigment-protein kompleksleri gerçekten üzerinde durmaya değer. Özellikle Fikosiyanin (C-PC) ve Fikoeritrin (C-PE) burada başrolde. Bu proteinler siyanobakterilerin fotosentetik anten komplekslerinde bulunuyor ama yetenekleri sadece fotosentezle sınırlı değil. Suda harika çözünüyorlar, güçlü antioksidan ve antiinflamatuvar etkileri var, üstüne bir de dar bantlı floresans özellikleri sergiliyorlar. Biyoyumlu yapıları da işin içine girince, biyopolimer matrislerde biyofotonik sistemlerden biyosensörlere, fotodinamik terapiden biyomürekkep formülasyonlarına ve akıllı biyomalzemelere kadar geniş bir oyun alanı sunuyorlar (Pagels ve diğ., 2019; Jha ve diğ., 2024; Zhang ve diğ., 2024). C-PC ve C-PE gibi kompleksler, pamuklara sarılarak değil, zorlu koşullarda hayatta kalmayı öğrenmiş mikroorganizmalar tarafından üretiliyor. pH dalgalanmaları, yüksek tuz, ağır metaller ya da oksidatif stres... Bu canlılar hepsine adapte olmuş.

2.2.4. Hücre Dışı Matris (ECM) Benzeri Mikrobiyal Polimerler

Mikroorganizmaların ürettiği ECM benzeri biyopolimerler, aslında biyofilmlerin omurgasını oluşturur. Bu yapılar tek düze değildir; genellikle polisakkarit, protein, DNA ve lipidlerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan karmaşık bir karışımdır. Biyomalzeme uygulamalarında bu polimerlerin elimizi güçlendiren pek çok yanı var. Örneğin, metal iyonlarını bağlama kapasiteleri oldukça yüksektir ve mekanik kararlılıkları gayet iyidir. Biyolojik olarak net bir yüzey kimyasına sahip olmaları, özellikle ağır metal adsorpsiyonunda fark yaratır. Ayrıca kriyojel veya hidrojel matrislerine kolayca uyum sağlayıp entegre olabilirler. Bütün bu nedenlerle mikrobiyal ECM türevleri; atıksu arıtımı, biyosorpsiyon kolonları ve metal iyon şelasyon membranları gibi kritik işlerde değerlendirilir. Hatta antibakteriyel

kaplamalar ve biyosensör platformları için de güçlü birer adaydırlar (Babiak & Krzemińska, 2021).

2.2.5. Mikrobiyal Biyopolimerlerin Endüstriyel Üstünlükleri

Süreklilik ve ölçeklenebilirlik konusuna gelince, işin sırrı fermantasyonla yapılan kontrollü üretimde yatıyor; bu sayede tarımsal hammaddeye olan bağımlılık azalıyor ve süreç daha öngörülebilir hale geliyor. Kimyasal olarak özelleştirme imkânı ise elinizi güçlendiren bir diğer faktör. Metabolik mühendislik kullanarak yapı ve fonksiyon arasındaki o hassas ilişkiyi tam ihtiyacınıza göre ayarlayabiliyorsunuz. Çevre konusunu da es geçmemek lazım, düşük karbon ayak izi sayesinde üretim süreçleri doğaya yük olmuyor. Fonksiyonel açıdan bakıldığında yelpaze oldukça geniş. Yapısal polimerlerden (PHA, PHB) jel (ksantan, gellan) ve film oluşturuculara (pullulan) kadar uzanan bir çeşitlilik var. Hatta optik bileşenler (C-PC, C-PE) ve fonksiyonel şelatör platformları gibi spesifik alanları da kapsıyor. Biyomedikal uygunluk tarafında ise kafanız rahat olsun. Toksik kalıntı bırakmadığı için steril üretim standartlarına gayet uygun.

2.2.6. Mikrobiyal Biyopolimerlerin Geleceğini Şekillendiren Eğilimler

Metabolik mühendislik sayesinde biyopolimerleri artık standart bir kalıba dökmek yerine, tam olarak ihtiyacımız olan özelliklere göre, adeta özel dikim gibi sentezleyebiliyoruz. CRISPR teknolojisi ise bu sürece müthiş bir keskinlik katıyor. Bu sayede bakterilerin polimer blok kompozisyonunu inanılmaz bir hassasiyetle kontrol etmek ve yönetmek mümkün hale geliyor (Lu ve diğ., 2022). Enerji verimliliğine odaklandığımızda fotosentetik üretim devreye giriyor. Burada siyanobakteriler kullanılarak doğrudan karbondioksit üzerinden, enerji dostu bir biyopolimer üretimi gerçekleştirilebilir. Nanokompozit entegrasyonu tarafında ise mikrobiyal polisakkaritleri nanopartiküllerle birleştirip çok daha yetenekli hibrit sistemler ortaya çıkarılabilir.

2.3. Modifiye ve kompozit biyopolimerler

Kimyasal modifikasyon dediğimiz süreç, aslında biyopolimerlerin doğasını biraz kurcalayıp onları ihtiyaçlarımıza göre yeniden şekillendirmek gibidir. Bu zincirlere karboksimetil, sülfat veya fosfat gibi grupları eklediğinizde, malzemenin sadece kimyasal yapısı değil; çözünürlüğü, yük yoğunluğu ve hatta biyolojik davranışları da tamamen değişiyor. Mesela selülozu ele alalım; karboksimetil grubu eklendiğinde artık suda çok daha rahat çözünen, film oluşturabilen ve pH değişimlerine duyarlı akıllı bir malzemeye dönüşüyor.

Aynı durum kitosan için de geçerli. Onu kuarterner amonyum tuzu haline getirdiğinizde, sadece daha geniş bir pH aralığında çalışmakla kalmıyor, aynı zamanda mikroplara karşı çok daha güçlü bir etki gösteriyor (Venkatesan ve diğ., 2025).

Fiziksel modifikasyon ve karışımların dünyasına adım attığınızda işler biraz daha ilginçleşiyor. Selüloz ve nişasta, alginat ile jelatin ya da kitosanla PVA gibi kombinasyonları düşünün; bunlar bir araya geldiğinde mekanik dayanım, bariyer özellikleri ve işlenebilirlik açısından size büyük avantajlar sağlar. Bir de gliserol veya sorbitol gibi plastikleştiricilerle yapılan dokunuşlar var. Bunlar camsı geçiş sıcaklığını düşürerek malzemeye o ihtiyaç duyulan esnekliği kazandırır. Ancak her şey tozpembe değil. Plastikleştiricilerin zamanla göç etmesi ya da su buharı geçirgenliğini etkilemesi gibi durumlar, özellikle gıda ambalajı uygulamalarında dikkatle yönetmeniz gereken risklerdir (Perera, Jaiswal & Jaiswal, 2023; Matar & Andac, 2025).

Nanokompozit biyopolimerler, temel biyopolimer matrislerinin içine kil nanopartikülleri, nano-selüloz, grafen, karbon nanotüpler veya gümüş ve bakır gibi metal nanopartiküller eklendiğinde ortaya çıkıyor. Bu nano doldurucular sadece basit birer katkı maddesi değil; malzemenin mekanik dayanımını, bariyer özelliklerini ve hatta elektriksel iletkenliğini ciddi ölçüde iyileştiriyorlar. Üstelik malzemeye antimikrobiyal bir güç kazandırdıklarını da unutmamak gerek. Bu alanda özellikle nanokompozit hidrojellerin yeri ayrı; doku mühendisliği ve ilaç salımı gibi hassas konularda sundukları çok yönlü imkanlar nedeniyle şu an yoğun bir araştırmanın merkezindeler (Baishya ve diğ., 2024).

3. Yapısal Tasarım İlkeleri

3.1. Bağlanma ve çapraz bağlama stratejileri

Kovalent çapraz bağlamadan söz ettiğimizde karbodiimid (EDC/NHS), glutaraldehit, genipin, foto-aktif akrilat grupları ve transglutaminaz gibi enzim temelli yöntemler öne çıkıyor. Bu teknikler biyopolimer ağların mekanik gücünü ve kararlılığını artırmak için kullanılıyor. Genellikle bu sayede düşük şişme oranına sahip, oldukça sağlam yapılar elde edersiniz. Fakat burada dikkatli olmakta fayda var; aşırı çapraz bağlama yapıldığında malzeme fazlasıyla kırılgan hale gelebilir ve biyobozunurluk özellikleri zayıflayabilir (Santhamoorthy & Kim, 2025).

İyonik ve fiziksel çapraz bağlama konusuna şöyle bir bakalım. Aljinat- Ca^{2+} , kitosan-TPP ya da pektin- Ca^{2+} gibi sistemler, geri dönüşebilen iyonik köprüler sayesinde bir araya gelip jel halini alıyorlar. İşin arka planında

ise sadece iyonlar yok; hidrojen bağları, hidrofobik kuvvetler ve pi-pi etkileşimleri de bu fiziksel ağın örülmesinde büyük rol oynuyor. Bu tür ağlar neden mi önemli? Çünkü çevresel uyarılara tepki veren ve kendi kendini iyileştirme yeteneğine sahip akıllı hidrojeller tasarlamak için harika bir zemin hazırlıyorlar (Wang ve diğ., 2023).

Supramoleküler ve dinamik bağlardan bahsederken Schiff bazı, boronat esterleri ve siklodekstrin ile adamantan örneğindeki gibi host-guest etkileşimlerini göz ardı edemeyiz. Bu tür dinamik kovalent veya supramoleküler yapılar, kendi kendini onarabilen biyopolimer ağların tasarlanmasında gerçekten kritik bir yere sahip. Sistem bir hasar aldığında ya da deforme olduğunda yapıyı kendiliğinden tamir ediyor, bu da doğal olarak malzemenin hizmet ömrünü uzatıyor (Wang ve diğ., 2023; Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024).

3.2. İşleme teknikleri

Çözelti dökümüyle film oluşturma sürecini şöyle düşünebilirsiniz: Hazırladığınız biyopolimer karışımını bir petri kabına ya da yürüten bir banda döküyorsunuz. Asıl olay bundan sonra başlıyor; çözücü madde buharlaşıp gittiğinde geriye incecik bir film tabakası kalıyor. Özellikle gıda ve kozmetik ambalajlarında veya o yenilebilir kaplamalarda gördüğümüz bariyer filmlerin çoğu işte bu yöntemle hayat buluyor (Perera, Jaiswal & Jaiswal, 2023; Sharma ve diğ., 2025).

Elektrospin yöntemine yakından baktığımızda, aslında biyopolimer çözeltilerinin yüksek voltaj kullanılarak incecik nanoliflere dönüştürüldüğü oldukça etkileyici bir süreç görüyoruz. Ortaya çıkan bu yapı hem muazzam bir yüzey alanına sahip hem de vücudun doğal dokusunu (ECM) taklit eden gözenekli bir formda oluyor. İşte tam da bu özellikleri sayesinde, yara örtülerinden doku mühendisliğine ve ilaçların kontrollü salımına kadar pek çok alanda elimizi güçlendiren ideal bir çözüm sunuyor (Ekram, 2025).

Kriyojelasyonu anlamak için işin mutfağına, yani dondurma aşamasına bakmak lazım. Biyopolimer çözeltilisini alıp -5 ila -20 derece gibi dondurucu soğuklarda çapraz bağladığınızda, ortaya süngerimsi ve geniş gözenekli yapılar, yani kriyojeller çıkıyor. Buradaki asıl sihir buz kristallerinde saklı. Bu kristaller geçici birer kalıp gibi davranıyor. Dondurma işlemi bitip buzlar çözüldüğünde, geriye birbiriyle bağlantılı o büyük gözenekler kalıyor. İşte tam da bu yapı sayesinde sıvı akışı kolaylaşıyor ve hücreler içeriye rahatça yerleşebiliyor. Bu özellikler de onları, özellikle doku mühendisliği veya adsorpsiyon gibi hızlı transfer gerektiren işler için ideal hale getiriyor (Bayır, 2023; Omidian ve diğ., 2023; Gürel ve diğ., 2024).

3D ve 4D biyobaskı teknolojilerine baktığımızda, sürecin kalbinde biyomürekkeplerin olduğunu görüyoruz. Aljinat, jelatin, hiyalüronik asit ve bunların GelMA gibi özel türevleri sayesinde, içine hücre yerleştirilmiş 3D iskeleler basmak mümkün hale geliyor. İşin içine 4D girdiğinde ise durum daha da ilginçleşiyor; uyarılara tepki veren bileşenler eklendiğinde, sadece sabit duran değil, zamanla şekil değiştirip dönüşebilen yapılar ortaya çıkıyor (Segneanu, A. E., 2025).

3.3. Fonksiyonel özellik tasarımı

Biyopolimer tabanlı bir malzeme tasarlarken, işin özü aslında dört ana unsurda saklıdır: malzemenin mekanik karakteri, içindeki boşluklu yapı, yüzeyinin kimyası ve çevresine nasıl tepki verdiği. Mekanik özelliklerden bahsederken durum tamamen neyi hedeflediğinize göre değişir. Eğer doku mühendisliğiyle uğraşıyorsanız, malzemenin kemik, kıkırdak veya deri gibi davranmasını, onlarla uyumlu bir sertlikte olmasını beklersiniz. Ancak konu ambalaj ise öncelikler farklılaşır; bu kez malzemenin kopmaya ne kadar dayandığı, esnekliği ve koruyuculuğu ön plana çıkar (Baishya ve diğ., 2024; Matar & Andac, 2025). Gözeneklilik ve gözenek boyutu ise işin lojistik kısmıdır. Hücrelerin rahatça hareket edebilmesi, besinlerin içeri girip atıkların dışarı atılabilmesi veya ilacın kontrollü salınması için bu gözeneklerin boyutu ve dağılımı hayati önem taşır. Kriyojelasyon veya partikül kullanımı gibi yöntemlerle, adeta malzemenin iç mimarisini tasarlayarak bu yapıları oluşturabilirsiniz (Bayır, 2023; Omidian ve diğ., 2023). Yüzey fonksiyonelleştirmeyi, malzemeye yeni yetenekler kazandırmak veya ona bir kimlik vermek gibi düşünebilirsiniz. RGD peptitleri, heparin veya büyüme faktörleri gibi moleküller ekleyerek hücrelerin yüzeye daha iyi tutunmasını sağlayabilir, damar oluşumunu destekleyebilir veya belirli metalleri yakalama kapasitesini artırabilirsiniz. Son olarak uyaran duyarlılığı var ki, bu da malzemeyi akıllı hale getiren kısımdır (Gürel ve diğ., 2024). pH değişimi, sıcaklık farkı, ışık veya biyokimyasal sinyalleri algılayıp buna cevap veren bu sistemler, sanki çevresini dinliyormuş gibi tam zamanında ilaç salımı yapmak veya sensör gibi çalışmak üzere geliştiriliyor (Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024; Fattah-alhosseini ve diğ., 2024).

4. Biyopolimer Tabanlı Fonksiyonel Malzemelerin Uygulamaları

4.1. Biyomedikal uygulamalar

4.1.1. Doku mühendisliği iskeleleri

Alginat, kitosan, jelatin, hiyalüronik asit ve fibroin gibi biyopolimerleri düşünün; bunlar hücrelerin üzerine tutunup çoğalabileceği o iskeleleri kurmak için sıkça başvurduğumuz temel malzemeler. Özellikle hidrojel ve kriyojel formundaki yapılar, içerdikleri yüksek su miktarı ve doğal dokuyu taklit eden yapılarıyla yumuşak doku mühendisliğinde işimizi epey kolaylaştırıyor (Santhamoorthy & Kim, 2025; Bayır, 2023). İş kemik ya da kırıldak gibi daha sert dokulara geldiğindeyse, nanokompozit hidrojelleri biraz güçlendirmemiz gerekiyor. İçlerine hidroksiapatit gibi inorganik parçacıklar veya karbon bazlı yapılar ekleyerek onları mekanik açıdan çok daha dayanıklı ve kullanışlı hale getiriyoruz (Baishya ve diğ., 2024).

4.1.2. İlaç taşıma ve kontrollü salım sistemleri

Biyopolimer esaslı mikroküreler, nano tanecikler, hidrojeller ve filmler, ilacı hedefine kontrollü bir şekilde ulaştırmak için günümüzde sıkça mercek altına alınıyor. Burada özellikle aljinat ve kitosan bazlı polielektrolit komplekslerin rolü büyük. Bu yapılar, ortamın pH seviyesine göre hareket ederek ilacı sindirim sistemi boyunca koruyor ve sadece hedeflenen bölgeye gelindiğinde salınım yapılmasına olanak tanıyor (Santhamoorthy & Kim, 2025).

Nanokompozit hidrojeller, manyetik veya ışığa duyarlı parçacıklarla bir araya geldiğinde uzaktan yönetilebilen akıllı salım sistemlerine dönüşebiliyor. Özellikle kanser tedavisinde bu teknolojiye büyük bir ilgi var. Araştırmacılar, tümörü ısıyla zayıflatırken aynı anda kemoterapi ilaçlarını da hedefe ulaştırabilmek için bu yöntem üzerinde yoğun bir şekilde çalışıyor (Baishya ve diğ., 2024).

4.1.3. Yara örtüleri ve antimikrobiyal sistemler

Elektrospinle üretilen kitosan, PCL/kitosan, jelatin veya fibroin nanoliflerine baktığınızda, yara örtüsü olarak neden bu kadar tercih edildiklerini görmek zor değil. Geniş yüzey alanları, gözenekli yapıları ve nefes alabilme özellikleri onları bu iş için ideal kılıyor. Asıl fark yaratan kısım ise bu liflerin gümüş nanopartikülleri, bitkisel ekstraktlar veya antibiyotiklerle zenginleştirilebilmesi. Böylece malzeme sadece bir koruyucu olmaktan çıkıp, mikrop kıran ve doku onarımını destekleyen çok yönlü bir iyileştiriciye dönüşüyor (Ekram, 2025).

Kriyojel yapısındaki biyopolimer ağlar hem yüksek sıvı emme kapasiteleri hem de bakteriyel biyofilmlere nüfuz edebilmeleri sayesinde büyük bir potansiyele sahip. Biyokaynaklı bu kriyojellerin antibakteriyel ve sürtünme özellikleri üzerindeki araştırmalar, özellikle ortopedik implant kaplamaları ve yeni nesil yara bakım ürünleri konusunda gelecek için umut veriyor (Gürel ve diğ., 2024).

4.1.4. Metal İyon Şelasyonu ve Biyopolimer Tabanlı Detoksifikasyon Sistemleri

Metal iyonlarının vücutta veya biyolojik sistemlerde gereğinden fazla birikmesi, ne yazık ki sessizce ilerleyen ve göz ardı edilmemesi gereken bir tehdit. Bu durum hücre içinde adeta bir kaosa yol açıyor; oksidatif stres artıyor, hayati enzimler çalışamaz hale geliyor ve hatta DNA hasarı gibi geri dönüşü zor süreçler başlıyor. Özellikle demir, alüminyum, bakır, kurşun ve kadmiyum gibi metallerin kontrolsüzce artışı, nörodejeneratif hastalıklardan karaciğer ve böbrek yetmezliğine kadar uzanan ciddi tablolarla ilişkilendiriliyor. İşte tam bu noktada, metalleri seçip yakalayabilme yeteneğine sahip biyopolimer tabanlı malzemeler devreye giriyor. Bu malzemeler, vücudu bu toksik yükten kurtarmak adına hem laboratuvar çalışmalarında hem de gelecekteki tedavi stratejilerinde oldukça güçlü bir potansiyel taşıyor. Biyopolimerlerin neden bu kadar etkili olduğuna bakarsak, cevabı aslında kimyasal yapılarındaki detaylarda buluyoruz. Kitosan, alginat, pektin veya selüloz gibi doğal polimerler; sahip oldukları amino, karboksil veya hidroksil grupları sayesinde metal iyonlarıyla bir nevi el sıkışıyor, onları iyon değişimi veya elektrostatik çekimle kendilerine bağlıyorlar. Bu fonksiyonel gruplar ne kadar yoğunsa veya doğru konumlanmışsa, malzemenin metal tutma kapasitesi o kadar artıyor. Hatta Santhamoorthy ve ekibinin 2025 çalışmasında da vurguladığı gibi, bu yapıları kimyasal olarak modifiye edip şelasyon performanslarını artırmak araştırmacıların sıkça başvurduğu akılcı bir yöntem. Ancak sadece doğru malzemeyi seçmek yetmiyor, o malzemenin hangi formda olduğu da en az kimyası kadar önemli. Biyopolimerleri süngerimsi, gözenekli yapılara yani hidrojel veya kriyojellere dönüştürdüğünüzde verim ciddi oranda artıyor. Bu geniş yüzeyli ve gözenekli yapı, iyonların malzemenin içine çok daha hızlı nüfuz etmesini ve bağlanma sürecinin hızlanmasını sağlıyor. Omidian ve arkadaşlarının 2023 yılında belirttiği üzere, özellikle kriyojeller bu konuda klasik hidrojelere göre bir adım önde. Çünkü kolon veya akış sistemlerinde düşük basınçla çalışabilmeleri ve tıkanma yaratmadan yüksek performans göstermeleri, onları detoksifikasyon uygulamaları için çok daha avantajlı kılıyor.

4.2. Kozmetik ve dermokozmetik uygulamalar

Biyopolimerler, cildin doğal yapısıyla uyumlu olmaları, düşük tahriş riski taşımaları ve doğada çözünebilmeleri sayesinde kozmetik dünyasında gerçekten büyük bir avantaj sağlıyor. Özellikle hiyalüronik asit, jelatin ve kitosan gibi maddeler hem nemi hapsedmek hem de cilt üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturmak için formülasyonların vazgeçilmez haline gelmiş durumda. İşin içine bamyaya tohumu veya üzüm çekirdeği gibi bitkisel yağlar girdiğinde bu yapılar, cildi besleyen ve yatıştırıcı içeriklerin kontrollü bir şekilde salınmasına da olanak tanıyor. Bugün raflarda gördüğümüz o popüler kâğıt maskelerin, göz altı bantlarının veya lokal uygulanan pedlerin arkasında genellikle bu biyopolimer bazlı hidrojel var. Son zamanlarda ise mikro iğne teknolojisinde ciddi bir yükseliş görüyoruz; biyopolimerlerden yapılan ve ciltte eriyebilen bu minik iğneler, aktif maddeleri derinlemesine iletmek için oldukça heyecan verici ve yenilikçi bir yöntem sunuyor (Santhamoorthy & Kim, 2025; Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024).

4.3. Çevresel uygulamalar ve sürdürülebilir ambalaj

4.3.1. Biyobozunur gıda ambalajları

Şu sıralar gözlerni şaştasın, selüloz, kitosan, pullulan ve zein gibi biyopolimerlerin üzerinde. Ayrıca PHA ve PLA gibi biyobozunur polyesterler de bu grubun önemli bir parçası. Araştırmacılar, bu malzemelerin gıda ambalajlarında o alıştığımız petrol kökenli plastiklerin yerini alıp alamayacağını anlamak için yoğun bir çaba harcıyor (Perera, Jaiswal & Jaiswal, 2023; González-López ve diğ., 2023). Bu malzemelere antimikrobiyal ajanlar, antioksidanlar veya pH'ya duyarlı doğal pigmentler gibi akıllı indikatörler eklediğimizde, onları basit birer koruyucu kılıf olmaktan çıkarıyoruz. Artık sadece dış etkilere karşı duran fiziksel bir bariyer değil; gıdanın ne kadar taze olduğunu bize anlatan, aktif ve akıllı birer sisteme dönüşüyorlar (Matar & Andac, 2025; Sistani & Shekarchizadeh, 2025). Biyopolimer bazlı film ve kaplamaların su buharına karşı direnci genelde düşüktür ama bu çözümsüz bir sorun değil. Yapıya kil veya selüloz nano kristalleri gibi nano doldurucular ekleyerek ya da lipidler, mumlar ve esansiyel yağlar gibi hidrofobik bileşenleri entegre ederek bu bariyer özelliklerini çok daha iyi bir hale getirebiliyoruz (Sharma ve diğ., 2025; Venkatesan ve diğ., 2025).

4.3.2. Su arıtımı ve ağır metal giderimi

Kitosan, alginat ve diğer polisakkaritlerin yapısındaki amino ve karboksil gruplarına yakından baktığınızda, bunların metal iyonlarıyla adeta bir mıknatıs gibi güçlü bağlar kurduğunu görürsünüz. Bu doğal kimyasal

yetenek, ağır metallerle kirlenmiş suların temizlenmesinde biyopolimer tabanlı sorbentlerin neden bu kadar sık tercih edildiğinin de anahtarıdır. Özellikle bu yapıları kriyojel formunda kullandığınızda işler daha da verimli hale gelir. Kriyojeller, o geniş gözenekli yapıları sayesinde akışa neredeyse hiç direnç göstermez ve kolon sistemlerinde basınç düşümü yaşamadan çalışmanızı sağlar. Bu rahat akış özelliği de laboratuvar ölçeğinden çıkıp büyük endüstriyel sistemlere geçiş yaparken elinizi inanılmaz derecede güçlendirir (Omidian ve diğ., 2023; Gürel ve diğ., 2024).

4.4. Enerji ve elektronik uygulamalar

Biyopolimerler günümüzde sadece temel malzeme olarak değil, proton iletken membranlar, süperkapasitör elektrolitleri ve esnek elektronik altlıklar gibi ileri teknoloji alanlarında da dikkat çekiyor. Örneğin selüloz ve kitosan türevlerini ele alalım; bu maddeler proton iletkenliği artırılmış kompozit yapılarla birleştğinde, yakıt hücreleri için güçlü birer aday haline geliyor. Üstelik bu malzemeleri grafen, karbon nanotüpler veya iletken polimerlerle harmanladığınızda işler daha da ilginçleşiyor. Bu sayede esnek sensörler, gerinim ölçerler ve biyosensörler için tam da ihtiyaç duyulan o işlevsel yapıyı kurmuş oluyoruz (Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024; Fattah-alhosseini ve diğ., 2024).

5. Güncel Araştırma Trendleri

5.1. Akıllı ve uyarıcı-duyarlı biyopolimer sistemler

Akıllı polimerleri, çevrelerindeki pH, sıcaklık, ışık veya elektrik alanı gibi değişimlere tepki vererek kendi yapılarını buna göre ayarlayabilen malzemeler olarak düşünebilirsiniz. Son yıllarda bu teknolojinin ne kadar hızlı ilerlediğini görmek şaşırtıcı değil. Hem sentetik hem de biyobazlı akıllı polimerler; tıbbi cihazlar, sensörler, kendi kendini onaran kaplamalar ve 4D baskı gibi alanlarda artık çok daha sık tercih ediliyor (Balcerak-Woźniak ve diğ., 2024; Fattah-alhosseini ve diğ., 2024; Imato & Ooyama, 2024).

Biyopolimerler, doğal yapıları sayesinde biyoyoumlu akıllı sistemler için güçlü bir temel oluşturuyor. Fonksiyonel boyalar, redoks aktif gruplar ve nano taneciklerle zenginleştirildiklerinde ise çevreye duyarlı hale geliyorlar. Mesela gıdanın tazeliğine göre renk değiştiren nişasta bazlı kaplamalar, bu teknolojinin ambalaj filmlerinde nasıl hayat bulduğuna dair güzel bir örnek (Azeem, 2025).

5.2. Nanokompozit hidrojel ve kriyojel

Nanokompozit hidrojel ve kriyojel, nano tanecikler ve biyopolimer ağların güçlerini birleştirdiği özel yapılar olarak düşünülebilir. Bu sayede mekanik, elektriksel ve biyolojik işlevleri tek bir çatı altında toplayan çok yönlü sistemler haline geliyorlar. Özellikle kanser tedavisinde hem ısıtma hem de kemoterapiyi aynı anda uygulamak ya da yaraları iyileştirirken antibakteriyel etkiyle büyüme faktörlerini bir arada sunmak gibi kombine stratejiler, tam da bu teknolojinin sunduğu imkanlar sayesinde geliştiriliyor (Baishya ve diğ., 2024).

Kriyojel dünyasında son zamanlarda yapılan araştırmalar, odak noktasını biyoköklenli kompozitlere çevirmiş durumda. Amaç sadece yeni bir malzeme üretmek değil, aynı zamanda hem yüksek dayanım sunan hem bakteri tutmayan hem de tribolojik özellikleri gelişmiş yapılar ortaya koymak. Güncel çalışmalar, işte bu çok yönlü performansı tek bir malzemede birleştirmeye çalışıyor (Gürel ve diğ., 2024).

5.3. Teranostik biyopolimer jeller

Biyopolimer jellerin aynı anda hem teşhis koyup hem de tedavi edici bir rol üstlenmesi, teranostik uygulamaların aslında temelini oluşturuyor. Bu jelleri gadolinyum veya mangan kompleksleriyle, floresan boyalarla ya da fotodinamik terapide işimize yarayan porfirin türevleriyle donattığınızı düşünün. İşte o zaman MR görüntüleme, ışıkla tedavi ve ilaç salımı gibi farklı süreçlerin hepsini tek bir platformda, bir arada yürütmek mümkün hale geliyor (Shergijri ve diğ., 2025).

5.4. Sürdürülebilir yapı malzemeleri ve inşaat sektöründe biyopolimerler

Son dönemde çimento dünyasında biyopolimerlerin katkı malzemesi olarak kullanımı epey ilgi görüyor. Bu maddeler, betonun mekanik gücünü artırmanın ötesinde, çatlak oluşumuna ve zorlu donma çözünme döngülerine karşı betonu koruyan bir kalkan görevi görüyor. Klorür ve sülfat gibi zararlı etkilerin geçişini de zorlaştırarak yapıların çok daha uzun ömürlü olmasını sağlıyorlar (Vignesh ve diğ., 2025). Bu alan, geleneksel “fonksiyonel malzeme” anlayışını inşaat mühendisliğiyle bir araya getiriyor. Böylece disiplinler arasındaki sınırları kaldıran yepyeni bir araştırma yolunun da kapılarını aralıyor.

6. Gelecek Perspektifleri ve Zorluklar

6.1. Ölçeklenebilir üretim ve maliyet

Laboratuvar ortamında tasarlanan biyopolimer tabanlı malzemelerin çoğu, iş endüstriyel ölçeğe taşınmaya geldiğinde ham madde tedarigi, işlem süreleri, enerji maliyetleri ve kalite kontrol gibi zorlu engellere takılabiliyor. Özellikle medikal alanda üretim yapıyorsanız durum daha da hassas; yasal düzenlemelerin gerektirdiği yüksek saflığı sağlamak, maliyetleri ciddi anlamda yukarı çekebiliyor (Venkatesan ve diğ., 2025).

6.2. Standardizasyon, regülasyon ve güvenlik

Biyopolimer tabanlı medikal ürünlerden bahsediyorsak, FDA ve EMA gibi otoritelerin karşısına sağlam bir dosyayla çıkmak şart. Burada sadece standart test protokollerini uygulamak yetmiyor; biyobozunurluk testlerini ve uzun dönem biyoyuymuluk verilerini de eksiksiz sunmanız gerekiyor. Konu kozmetik veya gıda ile temas eden ambalajlar olduğunda ise dikkat etmeniz gereken noktalar biraz farklılaşıyor. Bu alanda migrasyon limitleri, toksikolojik değerlendirmeler ve çevresel etki analizleri sürecin belkemiğini oluşturuyor (Perera, Jaiswal & Jaiswal, 2023)

6.3. Döngüsel ekonomi ve yaşam döngüsü analizleri

Biyobozunur bir malzemenin gerçekten sürdürülebilir sayılması için sadece işin sonuna, yani doğada nasıl çözündüğüne bakmak yetmez. Asıl mesele, ham maddesinden üretimine, dağıtımından kullanımına ve atılmasına kadar geçen tüm yaşam döngüsünü bütünüyle değerlendirebilmektir. İşte bu sebeple, biyopolimer ambalajların klasik plastiklerle kıyaslandığı yaşam döngüsü analizlerine (LCA) artık çok daha sık rastlıyoruz (González-López ve diğ., 2023; Sharma ve diğ., 2025).

6.4. Multidisipliner iş birlikleri ve geleceğin uygulama alanları

Geleceğe şöyle bir baktığımızda, biyopolimer tabanlı fonksiyonel malzemelerin hayatımızın pek çok alanında başrolü oynamaya hazırlandığını görüyoruz. Bu malzemeler, biyoelektronik cihazlardan o karmaşık organ-on-chip sistemlerine kadar teknolojinin en hassas noktalarında giderek daha fazla karşımıza çıkacak. İş sadece ileri teknolojiyle de sınırlı değil. Kişiselleştirilmiş tıp uygulamalarıyla tedavilere yepyeni bir boyut kazandırırken, tarımda akıllı kontrollü salım yapan gübre ve ilaç sistemleriyle toprağı işleme şeklimizi değiştirecekler. Hatta inşaat sektöründe bile biyo-bazlı yapı malzemeleri olarak yerlerini alıp, içinde yaşadığımız binaların doğayla ilişkisini yeniden tanımlayacaklar. Kısacası, bu malzemeler sessiz sedasız dünyamızı

dönüştürmeye hazırlanıyor (Vignesh ve diğ., 2025; Venkatesan ve diğ., 2025).

Bu vizyonu sadece kâğıt üzerinde bırakmayıp hayata geçirmek istiyorsak, disiplinleri birleştirmemiz şart. Malzeme bilimi, kimya, biyoloji, tıp, gıda mühendisliği ve çevre bilimlerinin, aralarındaki sınırları kaldırıp omuz omuza çalıştığı güçlü bir iş birliğine ihtiyacımız var.

7. Sonuç

Biyopolimer tabanlı malzemeler, son yirmi yılda bilim dünyasının en heyecan verici kesişim noktalarından biri haline geldi. Malzeme bilimi, tıp ya da çevre mühendisliği fark etmeksizin, bu malzemeler artık stratejik bir konumda. İşin sırrı sadece doğal kökenli olmalarında değil, kimyasal olarak ne kadar esnek ve uyumlu olduklarında yatıyor. Hidrojel, kriyojel veya 3D baskı gibi modern tekniklerle bu malzemeleri doğanın sunduğu pasif yapı taşlarından çıkarıp, akıllı ve çok yönlü mühendislik harikalarına dönüştürebiliyoruz. Literatüre baktığımızda gördüğümüz şey aslında muazzam bir tasarım özgürlüğü. Doğru modifikasyonlar ve bağlama teknikleriyle, doğal polimerler artık sentetik rakipleriyle yarışıyor, hatta bazen onları geçiyor. Kendi kendini onaran ağlar veya yüksek gözenekli jeller sayesinde, bir malzemenin sadece bir yapı değil, aynı zamanda biyolojik veya elektronik işlevleri olan aktif bir sisteme dönüştüğü bir dönemdeyiz. Tıp alanında işler daha da ilginçleşiyor. Doku mühendisliği veya yara iyileştirme denildiğinde, bu malzemeler geleceğin implant teknolojilerinin temelini atıyor. Hücrelerle bu kadar uyumlu konuşabilen ve ilaçları kontrollü salabilen başka bir yapı bulmak zor. Özellikle metal iyonlarını yakalayan özel jeller gibi yenilikçi yaklaşımlar hem tedaviyi hem de teşhisi aynı platformda buluşturarak klinikte yeni kapılar aralıyor. Kozmetik dünyasında ise aranan o doğal ve temiz içerik ihtiyacına tam karşılık veriyorlar. Cilde dost, hipoalerjenik yapıları sayesinde sürdürülebilir güzellik anlayışını mümkün kılıyorlar. Bitkisel yağlar veya peptitlerle birleştğinde ise kişiye özel, akıllı cilt bakım ürünlerinin yolu açılıyor. Çevresel açıdan bakarsak, biyopolimerler bir tercih değil, neredeyse bir zorunluluk. Tek kullanımlık plastiklerin devrinin kapandığı bu günlerde, yenabilir filmlerden akıllı ambalajlara kadar pek çok çözüm sunuyorlar. Hem doğaya yük olmuyorlar hem de döngüsel ekonominin mantığına tam oturuyorlar. Enerji tarafında yolun henüz başındayız ama potansiyel çok büyük. Esnek sensörler ve doğada çözünebilen elektronik bileşenler, geleceğin sürdürülebilir teknolojilerini şekillendirecek gibi görünüyor. Elbette her şey tozpembe değil. Laboratuvardaki bu başarıları büyük ölçekli üretime taşımak, maliyetleri düşürmek ve standartları oturtmak gibi ciddi sınavlarımız var. Ancak bu zorluklar, alanın potansiyelini gölgelemekten

ziyade, çözülmesi gereken mühendislik problemleri olarak önümüzde duruyor. Bununla birlikte, sürecin sadece zorluklardan ibaret olmadığı ve aynı zamanda güçlü fırsatlar sunduğu da açık. Biyopolimer tabanlı fonksiyonel malzemelerin laboratuvarlardan çıkıp ticarileşmesi, ancak farklı disiplinlerin el ele vererek engelleri aşacak bir altyapı kurmasıyla mümkün olabilir. Kimyacılar, biyologlar, malzeme bilimciler, tıp araştırmacıları ve endüstriyel tasarımcıların ortaya koyacağı ortak akıl; geleceğin biyomalzeme dünyasını şekillendirecek en kritik güçtür. Özetle bu malzemeler, sadece bugünün sürdürülebilirlik ihtiyacını karşılayan birer alternatif olarak görülmemeli. Aksine, geleceğin tıbbından enerji teknolojilerine, çevre politikalarından üretime kadar pek çok alanın temelini oluşturacak güçlü bir “platform teknolojisi” ile karşı karşıyayız. Doğadan ilham alan ama mühendisliğin tüm araçlarıyla geliştirilen bu yapılar, önümüzdeki yıllarda hem bilimsel yeniliklerin hem de yüksek katma değerli ürünlerin tam merkezinde yer alacak. İşte bu yüzden biyopolimerlere yalnızca bir malzeme sınıfı gözüyle bakmak yetersiz kalır. Onları sürdürülebilirlik, sağlık ve ileri teknolojinin kesiştiği noktada yükselen yepyeni bir paradigma olarak değerlendirmek gerekir.

Kaynakça

- Azeem, B. (2025). Stimuli-responsive starch-based biopolymer coatings for smart and sustainable fertilizers. *Gels*, 11(9), 681.
- Babiak, W., & Krzemińska, I. (2021). Extracellular polymeric substances (EPS) as microalgal bioproducts: A review of factors affecting EPS synthesis and application in flocculation processes. *Energies*, 14(13), 4007.
- Baishya, G., Parasar, B., Limboo, M., Kumar, R., Dutta, A., Hussain, A., Phukan, M. M., & Saikia, D. (2024). Advancements in nanocomposite hydrogels: a comprehensive review of biomedical applications. *Discover Materials*.
- Balcerak-Woźniak, A., Dzwonkowska-Zarzycka, M., & Kabatc-Borcz, J. (2024). A comprehensive review of stimuli-responsive smart polymer materials—Recent advances and future perspectives. *Materials (Basel, Switzerland)*, 17(17), 4255.
- Bayır, E. (2023). Comparative evaluation of alginate–gelatin hydrogel, cryogel, and aerogel beads as a tissue scaffold. *Sakarya University Journal of Science*, 27(2), 335–348.
- Ekram, B. (2025). Functionalization of biopolymer-based electrospun nanofibers for wound healing. *Journal of Materials Science*, 60, 8308–8342.
- Fattah-alhosseini, A., Chaharmahali, R., Alizad, S., Kaseem, M., & Dikici, B. (2024). A review of smart polymeric materials: Recent developments and prospects for medicine applications. *Hybrid Advances*, 5, 100178.
- González-López, M. E., Calva-Estrada, S. d. J., Gradilla-Hernández, M. S., & Barajas-Álvarez, P. (2023). Current trends in biopolymers for food packaging: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.
- Gürel, C. M., Bozbeyoğlu, N. N., Kavakçıoğlu Yardımcı, B., Şarkaya, K., Mutlu, D., Akıncioğlu, S., Arslan, N. Ş., & Allı, A. (2024). Biosourced polymeric cryogels for future biomedical applications with remarkable antimicrobial activities and tribological properties. *Materials Today Communications*, 38, 108387.
- Imato, K., & Ooyama, Y. (2024). Stimuli-responsive smart polymers based on functional dyes. *Polymer Journal*, 56, 1093–1109.
- Jha, S., Singh, V. K., Singh, A. P., Gupta, A., Rana, P., & Sinha, R. P. (2024). The radiant world of cyanobacterial phycobiliproteins: Examining their structure, functions, and biomedical potentials. *Targets*, 2(1), 32–51.
- Lu, L., Shen, X., Sun, X., Yan, Y., Wang, J., & Yuan, Q. (2022). CRISPR-based metabolic engineering in non-model microorganisms. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102698.

- Matar, G. H., & Andac, M. (2025). Recent advances in sustainable biopolymer films incorporating vanillin for enhanced food preservation and packaging. *Polymer Bulletin*, 82, 2751–2777.
- Mirmasoudi, S. S., Pourmohammadi-Bejarpasi, Z., Shahrousvand, M., & Habibi Roudkenar, M. (2025). Xanthan gum hydrogel wound dressing enhances wound healing in a rat excisional injury model. *Heliyon*, 8(5), e43538.
- Mohammed, S. S., & Mahmood, A. (2024). Biopolymers: An introduction and biomedical applications. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, 7(2), 35–49.
- Omidian, H., Dey Chowdhury, S., & Babanejad, N. (2023). Cryogels: Advancing biomaterials for transformative biomedical applications. *Pharmaceutics*, 15(7), 1836.
- Paganini, V., Tampucci, S., Brignone, S. G., Di Gangi, M., Monti, D., Burgalassi, S., & Chetoni, P. (2025). Optimized ion-sensitive hydrogels based on gellan gum and arabinogalactan for the treatment of dry eye disease. *Gels*, 11(10), 787.
- Pagels, F., Guedes, A. C., Amaro, H. M., Kijjjoa, A., & Vasconcelos, V. (2019). Phycobiliproteins from cyanobacteria: Chemistry and biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 37(3), 422–443.
- Perera, K. Y., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2023). Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods*, 12(12), 2422.
- Sahranavard, M., Zamanian, A., Behnam Ghader, A., & Shahrezaee, M. (2025). Optimization of gellan gum-based bioink printability for precision 3D bioprinting in tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 320, 145800.
- Santhamoorthy, M., & Kim, S.-C. (2025). A review of the development of biopolymer hydrogel-based scaffold materials for drug delivery and tissue engineering applications. *Gels*, 11(3), 178.
- Segneanu, A.-E., Bejenaru, L. E., Bejenaru, C., Blendea, A., Mogoşanu, G. D., Biţă, A., & Boia, E. R. (2025). Advancements in hydrogels: A comprehensive review of natural and synthetic innovations for biomedical applications. *Polymers*, 17(15), 2026.
- Shergujri, D. A., Khanday, M. A., Noor, A., Adnan, M., Arif, I., Raza, S. N., Mir, R. H., & Khan, N. A. (2025). Next-generation biopolymer gels: innovations in drug delivery and theranostics. *J. Mater. Chem. B*, 13, 3222–3244.
- Sharma, C., Kundu, S., Singh, S., Saxena, J., Gautam, S., Kumar, A., & Pathak, P. (2025). From concept to shelf: engineering biopolymer-based food packaging for sustainability. *RSC Sustainability*, 3, 4992–5026.

- Sheng, G.-P., Yu, H.-Q., & Li, X.-Y. (2010). Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review. *Biotechnology Advances*, 28(6), 882–894.
- Sistani, S., & Shekarchizadeh, H. (2025). Recent trends and advances in biopolymer-based self-healing materials for smart food packaging: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 312, 144130.
- Venkatesan, R., Alrashed, M. M., Vetcher, A. A., & Kim, S.-C. (2025). Next-generation food packaging: Progress and challenges of biopolymer-based materials. *Polymers*, 17(17), 2299.
- Vignesh, J., Ramesh, B., & Raj Xavier, J. (2025). A review of recent trends in sustainable biopolymer-integrated concrete and its impact on mechanical performance and structural reliability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 321, 146408.
- Wang, X., Zhang, H. J., Yang, Y., Chen, Y., Zhu, X., & You, X. (2023). Biopolymer-based self-healing hydrogels: A short review. *Giant*, 16, 100188.
- Zhang, T., Liu, D., Zhang, Y., Chen, L., Zhang, W., & Sun, T. (2024). Biomedical engineering utilizing living photosynthetic cyanobacteria and microalgae: Current status and future prospects. *Materials Today Bio*, 27, 101154.

Yeni Nesil Sensörler için İletken Polimerler

Recep Taş¹

Özet

İletken polimerler (CP'ler), elektriksel iletkenlik, yapısal esneklik ve yüzey değiştirilebilirliğinin benzersiz birleşimi sayesinde yeni nesil elektrokimyasal sensörlerin geliştirilmesinde temel fonksiyonel malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. Bu inceleme, özellikle duyarlılık, seçicilik ve tespit sınırı (LOD) gibi analitik performans parametrelerini geliştirmedeki rollerine odaklanarak, iletken polimerlerin türleri, yapısal özellikleri ve sensör entegrasyon stratejileri hakkında kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. Polianilin (PANI), polipirrol (PPy) ve poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) gibi temel polimerler, elektrokimyasal özellikleri, katkı maddesine bağlı davranışları ve fonksiyonelleştirme potansiyelleri açısından ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Ayrıca, CP'lerin karbon bazlı nanomalzemeler, metal nanopartiküller ve biyolojik elementler içeren hibrit sistemlere entegrasyonunun, çevresel izleme, biyosensör, gıda güvenliği ve tıbbi teşhis alanlarındaki uygulama kapsamını önemli ölçüde genişlettiği gösterilmiştir. Elektropolimerizasyon, nanokompozit formülasyonu ve yüzey modifikasyonu gibi stratejiler, sensör performansını iyileştirmede temel yaklaşımlar olarak vurgulanmaktadır. Avantajlarına rağmen, uzun vadeli kararlılık, tekrarlanabilirlik ve biyouyumluluk gibi zorluklar kritik engeller olmaya devam ediyor. İnceleme ayrıca akıllı çoklu analit sensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT) entegrasyonu, yeşil sentez yaklaşımları ve klinik/endüstriyel ölçeklendirme gibi gelecekteki yönleri de özetliyor. Genel olarak, bu çalışma iletken polimerlerin sürdürülebilir, yüksek performanslı ve çok yönlü elektrokimyasal sensör teknolojilerinin ilerlemesindeki dönüştürücü rolünü vurgulamaktadır.

1. Giriş

Günümüzde çevresel kirleticilerin, biyolojik belirteçlerin ve gıda güvenliği ile ilgili parametrelerin hassas ve özgül şekilde tespiti, toplum sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda

1 Doç.Dr., Bartın Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü, rtas@bartin.edu.tr,
ORCID ID: 0000-0002-3743-7770

geliştirilen elektrokimyasal sensörler, düşük maliyet, taşınabilirlik, hızlı yanıt süresi ve yüksek seçicilik gibi avantajları nedeniyle geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Gibi, Liu, Barton, Anandan, & Wu, 2024; Hassan, Khan, & Andreescu, 2022). Elektrokimyasal sensörlerin performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri, çalışma elektrodunda kullanılan aktif malzeme türüdür. Son yıllarda, iletken polimerler bu tür sensörlerde dikkat çeken alternatifler arasında öne çıkmaktadır. İletken polimerler, organik yapılar olmalarına rağmen metal benzeri elektriksel iletkenlik gösterebilen, yarı iletken davranışı sergileyen ve çeşitli fonksiyonel gruplarla modifiye edilebilen malzemelerdir. Polianilin (PANI), polipirol (PPy) ve politiyofen türevleri gibi yapılar, elektrokimyasal sensörlerde hem elektrot materyali olarak hem de sensör yüzeylerinin işlevselleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hanif et al., 2019; Wang, Liu, Han, & Li, 2020). Bu malzemeler, yüksek yüzey alanı, kimyasal kararlılık, kolay işlenebilirlik ve çeşitli dopantlarla yapılandırılabilirlik gibi özellikleri sayesinde, sensörün hem hassasiyetini hem de seçiciliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca iletken polimerlerin metal nanoparçacıklar, karbon nanotüpler, grafen türevleri ve metal oksitlerle oluşturduğu hibrit yapılar, elektrokatalitik aktiviteyi artırmakta ve sensör performansında belirgin iyileşmeler sağlamaktadır (Seenivasan, Chang, & Gunasekaran, 2015; Wassel, El-Naggar, & Shouei, 2020). Bu sayede analitlere karşı daha düşük tespit limitleri (LOD) ve daha geniş lineer yanıt aralıkları elde edilebilmektedir. Örneğin, PPy/rGO nanokompozitleri kullanılarak kurşun (Pb^{2+}) iyonlarının $0.01 \mu M$ gibi düşük seviyelerde tespiti mümkün hale gelmiştir (Hanif et al., 2019). Bu derleme çalışması, iletken polimerlerin sensör teknolojisindeki rolünü detaylı şekilde incelemeyi amaçlamakta; başlıca malzeme türleri, yapılandırma stratejileri, uygulama alanları ve karşılaşılan zorluklar gibi konulara odaklanmaktadır. Ayrıca, gelecek çalışmalarda odaklanılması gereken yenilikçi tasarım yaklaşımlarına ve sürdürülebilir sentez yöntemlerine de ışık tutulacaktır.

2. İletken Polimer Türleri ve Yapısal Özellikleri

İletken polimerler (intrinsically conducting polymers – ICPs), konjuge π -bağlı yapıları sayesinde yarı iletkenlik veya metal benzeri elektriksel iletkenlik sergileyebilen organik malzemelerdir. Bu polimerler, yüksek yüzey alanı, çevresel stabilite ve fonksiyonelleştirilebilirlik gibi avantajlarıyla elektrokimyasal sensörlerde çok çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır. Yapısal çeşitlilikleri ve sentez yöntemleri, hedef analitlere özgü yüksek seçicilik ve duyarlılıkla algılama yapılmasını mümkün kılar. Aşağıda en çok kullanılan iletken polimer türleri detaylı olarak ele alınmıştır. PANI, PPy, PEDOT ve poliasetilen gibi yaygın iletken polimerlerin elektriksel iletkenlik aralıkları,

çevresel stabiliteleri, çözünürlük profilleri ve tipik uygulama örneklerini içeren bilgiler Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Sensörlerde yaygın olarak kullanılan iletken polimerlerin özellikleri

	Polimer	İletkenlik (S/cm)	Stabilite	Çözünürlük	Uygulama Örnekleri
1	PANI	10-200	Orta	Zayıf	Ağır metal tespiti, glukoz sensörü
2	PPy	1-100	İyi	Zayıf	Dopamin, fenol, kurşun sensörleri
3	PEDOT	10-500	Çok İyi	İyi	Biyosensörler, giyilebilir cihazlar
4	Poliasetilen	100-1000	Zayıf	Çözünmez	Araştırma düzeyinde; sınırlı uygulama

2.1. Polianilin (PANI)

Polianilin, düşük maliyetli üretimi, geniş pH aralığında kararlılığı ve redoks özelliği ile öne çıkan bir iletken polimerdir. PANI, özellikle doplanabilir yapısı sayesinde farklı iletkenlik seviyelerine sahip olabilir (örneğin: leukoemeraldin, emeraldin, pernigranilin formları). Elektrokimyasal sensörlerde genellikle metal iyonlarının, glukozun, hidrojen peroksidin ve pestisitlerin tespiti için kullanılmaktadır. PANI’nin iletkenliği, protonlanma düzeyine ve asidik ortamın varlığına bağlı olarak ayarlanabilmektedir (Wang et al., 2020).

2.2. Polipirrol (PPy)

Polipirrol, biyoyumlu yapısı ve düşük oksidasyon potansiyeli ile sensörlerde yaygın olarak kullanılan bir diğer iletken polimerdir. Elektropolimerizasyon yöntemi ile kolayca yüzeylere kaplanabilir ve modifikasyona uygundur. Karbon nanotüpler veya grafen ile oluşturulan PPy kompozitleri, elektrot yüzey alanını artırarak sinyal iletimini ve hedef analitlere karşı seçiciliği artırmaktadır. PPy, ağır metal iyonları (Cd^{2+} , Pb^{2+}), dopamin ve fenol türevlerinin tespiti için etkili bir sensör malzemesidir (Hanif et al., 2019; Seenivasan et al., 2015).

2.3. Polietilen Dioksitiyofen (PEDOT)

PEDOT, yüksek iletkenlik, şeffaflık ve çevresel kararlılık özellikleriyle dikkat çeker. En yaygın türevi PEDOT:PSS (polistiren sülfone ile karışımı) olup hem çözünürlük hem de işlenebilirlik açısından avantaj sağlar. PEDOT, biyosensörlerde, özellikle glukoz, DNA ve protein bazlı analizlerde yaygın

olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda düşük tespit limitleri ve geniş lineer aralık sunması açısından avantajlıdır (Wang et al., 2020).

2.4. Poliasetilen ve Diğer Polimerler

Poliasetilen, konjuge çift bağlar içeren en basit iletken polimerlerden biridir, ancak çevresel kararlılığı düşüktür. Bu nedenle, sensör uygulamalarında yerini daha kararlı polimerlere bırakmıştır. Son yıllarda geliştirilmiş olan politiyofen türevleri (ör. poly(3-hexylthiophene)) ve polikarbazol gibi polimerler, elektronik yapıları sayesinde sensörlerde yeni nesil fonksiyonel katmanlar olarak değerlendirilmektedir (Xu, Wang, & Hu, 2017).

2.5. Dopant Etkileri ve Elektronik Yapı

İletken polimerlerin elektronik özellikleri, yapıya entegre edilen dopant iyonlar ile büyük ölçüde değiştirilebilir. Bu dopantlar, polimer zincirleri boyunca delik (p-tipi) veya elektron (n-tipi) taşıyıcılarının mobilitelerini artırarak elektriksel iletkenliği birkaç mertebe yükseltebilir. Aynı zamanda dopantların doğası, polimerin seçiciliğini ve analit ile etkileşim modunu da belirler. Örneğin, anorganik dopantlar ile metal iyonlarına karşı daha güçlü bağlanma sağlanırken, organik dopantlar biyomoleküllerle seçici etkileşimler kurabilir (Hatchett & Josowicz, 2008).

3. İletken Polimerlerin Elektrokimyasal Sensörlerde Kullanımı

İletken polimerlerin elektrokimyasal sensörlerde kullanımı hem elektrot yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi hem de hedef analitlere özgü tanıma elemanlarının etkin şekilde sunulması açısından büyük avantaj sağlar. Bu polimerler, elektrot ile çözelti arasındaki arayüzeyde elektronik transferi kolaylaştırarak sinyal yanıtlarını güçlendirir. Aynı zamanda kimyasal fonksiyonellikleri sayesinde seçici algılama mekanizmaları kurulabilir. Bu bölümde iletken polimerlerin sensör sistemlerindeki temel kullanım yolları ele alınmaktadır.

3.1. Elektrot Malzemesi Olarak Doğrudan Kullanım

İletken polimerler, modifiye edilmiş elektrotlar üzerinde doğrudan kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Elektropolimerizasyon yöntemiyle cam karbon, altın veya platinyum elektrot yüzeyine in-situ olarak bir PANI, PPy ya da PEDOT filmi kaplanabilir. Bu filmler, hedef analitlerin (ör. H_2O_2 , glukoz, askorbik asit) oksidasyon veya indirgenme tepkimelerini katalizleyerek daha yüksek akım yanıtları elde edilmesini sağlar (Lakard, 2020). Özellikle redoks-aktif analitlerin tespitinde, bu polimer filmler sinyal amplifikasyonu sağlar.

3.2. Hibrit Kompozitlerde Matris Malzeme Olarak Kullanım

İletken polimerler, grafen, karbon nanotüp (CNT), metal nanoparçacıklar (AuNP, AgNP), metal oksitler (ZnO, Fe₃O₄) veya biyoaktif ajanlarla birlikte kompozit yapılar oluşturmak üzere matris görevi görebilir. Bu kompozitler hem elektriksel iletkenliği hem de yüzey alanını artırarak hedef moleküllerin daha etkin algılanmasını sağlar. Örneğin, PPy/CNT kompozitleri kullanılarak nitrit iyonlarının tespitinde hem geniş lineer yanıt aralığı hem de düşük tespit limiti elde edilmiştir (Hamouma, Kaur, Oukil, Mahajan, & Chehimi, 2019). Ayrıca, bu tür kompozitler biyosensör tasarımında enzimlerin veya antikorların immobilizasyonuna uygun bir mikroçevre sunar.

3.3. Nanoyapılarla Fonksiyonelleştirme

İletken polimerlerin nanoyapılarla (ör. çekirdek-kabuk yapılar, nanoteller, nanopartiküller) fonksiyonelleştirilmesi, sensör performansını daha da artırabilir. Bu tür yapılandırmalarda polimer, genellikle hedef analitin bağlanmasını kolaylaştıracak şekilde fonksiyonel gruplarla modifiye edilir (ör. amin, karboksil, sülfat). Nanoyapıların eklenmesi, hem elektrot yüzey alanını artırarak elektron transferini kolaylaştırır hem de analitlerin yüzeye adsorpsiyonunu güçlendirir. Örneğin, polimer kompozitleri ile glukoz biyosensörlerinde 0.1 μ M seviyesinde tespit limitlerine ulaşılabilmiştir (John, 2020).

Bu kullanım yaklaşımları, iletken polimerleri geleneksel elektrot malzemelerine göre daha üstün kılmaktadır. Bu yapıların optimize edilmesiyle, sensörlerde seçicilik, duyarlılık ve tekrar kullanılabilirlik gibi performans parametreleri daha etkin kontrol edilebilmektedir.

4. Performans Artırıcı Stratejiler

İletken polimer tabanlı elektrokimyasal sensörlerde yüksek performans elde etmek; elektrot yüzey tasarımı, malzeme modifikasyonu ve ölçüm koşullarının optimize edilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu tür sensörlerde temel hedef, düşük tespit limitine (LOD), geniş lineer yanıt aralığına, yüksek tekrarlanabilirliğe ve seçiciliğe ulaşmaktır. Aşağıda bu hedeflere ulaşmak amacıyla kullanılan başlıca stratejiler ele alınmıştır.

4.1. Yüzey Modifikasyon Teknikleri

Yüzey morfolojisi ve fonksiyonelliği, elektrot-elektrolit arayüzündeki analit etkileşimlerini doğrudan etkiler. İletken polimer yüzeyleri, kimyasal buhar fazı polimerizasyonu, damla kaplama veya spin coating gibi yöntemlerle fonksiyonelleştirilebilir. Ayrıca, amino, karboksil veya

tiyol grupları gibi fonksiyonel gruplarla modifikasyon, seçici tanıma mekanizmalarının güçlendirilmesini sağlar. Bu teknikler aynı zamanda biyoaktif ajanların (enzim, antikor vb.) immobilizasyonunu kolaylaştırarak biyosensör performansını artırır (Sandhyarani, 2019).

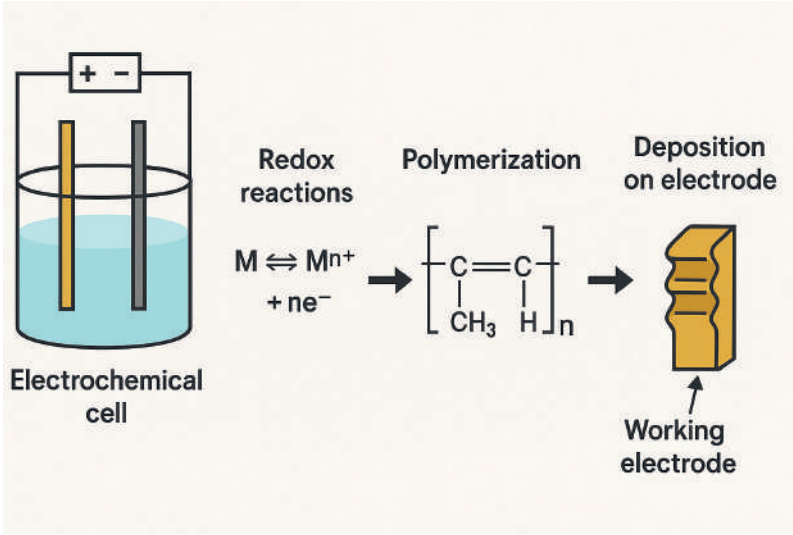
4.2. Nanokompozit ve Fonksiyonel Katkılar

İletken polimerlerin karbon nanotüp (CNT), grafen, metal nanoparçacıklar (Au, Ag, Pt) ve metal oksitlerle (ZnO , TiO_2) oluşturduğu hibrit yapılar, elektriksel iletkenliği artırarak daha hızlı ve güçlü elektrokimyasal yanıtlar elde edilmesini sağlar. Bu katkılar aynı zamanda elektrot yüzey alanını büyütürken hedef analit ile temas olasılığını artırır. PPy/grafen kompozitleri ile ağır metallerin tespiti sırasında elektrot tepkimesinin iyileştiği bildirilmiştir (Hao & Yu, 2022).

4.3. Elektropolimerizasyon Yöntemleri

İletken polimerlerin elektrot yüzeyine homojen ve kontrollü bir şekilde kaplanmasını sağlayan elektropolimerizasyon hem film kalınlığı hem de iletkenlik üzerinde doğrudan kontrol imkânı sağlar. Bu yöntem sayesinde polimer zincir uzunluğu, dopant tipi ve yoğunluğu gibi parametreler ayarlanarak istenen özellikte sensör yüzeyleri elde edilebilir. Ayrıca, elektropolimerizasyonla yapılan filmler çoğunlukla gözenekli yapıdadır ve bu durum hedef moleküllerin hızlı difüzyonuna olanak tanır (Cosnier, 2005).

Şekil 1’deki diyagram, elektropolimerizasyon yöntemini temel adımlarıyla özetlemektedir. Süreç, bir elektrokimyasal hücre içerisinde, genellikle üç elektrotlu sistem (çalışma elektrodu, karşı elektrot ve referans elektrot) kullanılarak gerçekleştirilir. Çözelti içerisinde, polimerleşmeye uygun monomerler (örneğin anilin, pirrol, EDOT) ve uygun bir elektrolit bulunur. Uygulanan potansiyel ile monomerler, elektrot yüzeyinde oksitlenerek reaktif radikal katyonlara dönüşür. Bu türler, ortamda bulunan diğer monomerlerle etkileşime girerek polimer zincirlerini başlatır. Oluşan reaktif ara türler, konjuge yapıdaki π -bağlı sistemler oluşturarak büyür. Bu zincir büyümesi sırasında dopant iyonları (örneğin Cl^- , SO_4^{2-}) polimer içine entegre olarak iletkenliği stabilize eder. Polimer zincirleri, çalışma elektrodu yüzeyinde kontrollü şekilde birikir. Elde edilen iletken polimer film, sensör yüzeyinin aktif bölgesini oluşturur. Film kalınlığı ve morfolojisi, uygulanan potansiyel, süre ve monomer konsantrasyonu gibi parametrelerle ayarlanabilir.



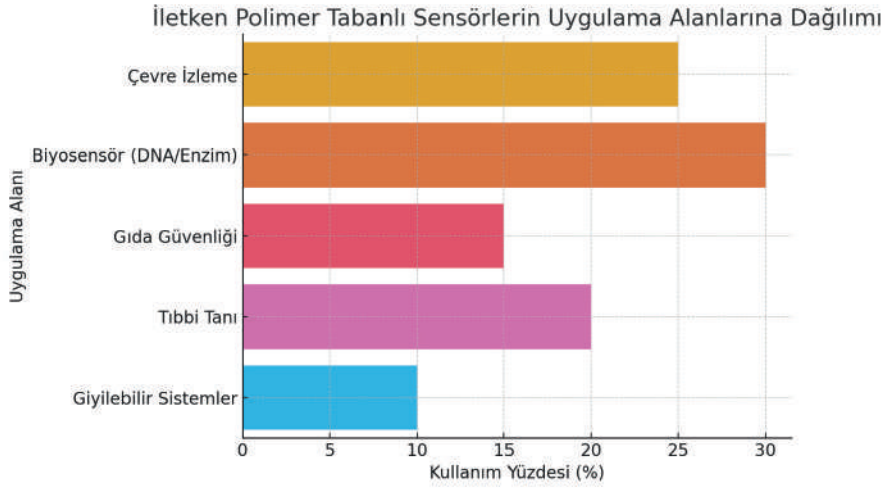
Şekil 1. Elektropolimerizasyon Sürecinin Temsili Diyagramı

4.4. Sensör Parametrelerinin Optimizasyonu

Elektrokimyasal sensör performansını etkileyen parametreler arasında pH, sıcaklık, iletkenlik, tarama hızı ve uygulanan potansiyel yer alır. Bu parametrelerin optimizasyonu, özellikle biyoanalitlere karşı ölçüm doğruluğunu ve tekrarlanabilirliği önemli ölçüde artırır. Ayrıca, kalibrasyon eğrilerinin dikkatli şekilde oluşturulması, doğru lineer aralık ve tespit limiti değerlerinin hesaplanmasını sağlar. PEDOT:PSS bazlı sensörlerde optimum çalışma pH'nın 7.0 civarında olduğu, bunun dışına çıktığında iletkenliğin azaldığı bildirilmiştir (Ko, Kim, & Lee, 2021).

5. Uygulama Alanları

İletken polimer tabanlı elektrokimyasal sensörler, sahip oldukları yüksek yüzey alanı, elektrokatalitik özellikler ve modifiye edilebilir yapıları sayesinde çok sayıda uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu uygulamalar; çevresel izleme, biyolojik tanılama, gıda güvenliği ve tıbbi teşhis gibi alanlarda kritik öneme sahiptir. Aşağıda bu alanlar detaylı olarak ele alınmıştır. Şekil 2' de iletkenpolimer tabanlı sensörlerin uygulama alanlarına dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılım, çevre izleme (%25), biyosensör sistemleri (%30), gıda güvenliği (%15), tıbbi tanı (%20) ve giyilebilir sistemler (%10) şeklindedir. Bu sayede polimer temelli sensörlerin çok disiplinli kullanım alanları net bir şekilde görselleştirilmiştir (Cichosz, Masek, & Zaborski, 2018).



Şekil 2. İletken polimer tabanlı sensörlerin uygulama alanlarına dağılımı

Tablo 2, farklı iletken polimer türlerinin çeşitli hedef analitlere yönelik geliştirilmiş elektrokimyasal sensörlerdeki uygulamalarını ve algılama limitlerini (LOD) karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Literatürde en çok karşılaşılan polimerlerden biri olan polianilin (PANI), özellikle Pb^{2+} ve Cd^{2+} gibi ağır metal iyonlarının tespiti için modifiye elektrotlarda etkin şekilde kullanılmıştır. PANI/rGO kompoziti ile Cd^{2+} için elde edilen $0.01 \mu M$ algılama limiti, bu tür yapıların yüksek elektrokatalitik aktivite ve yüzey alanı sunduğunu göstermektedir (Hanif et al., 2019).

Benzer şekilde polipirrol (PPy), dopamin gibi nörotransmitterlerin seçici ve hızlı algılanmasında öne çıkmıştır. Seenivasan ve arkadaşlarının çalışmasında geliştirilen PPy tabanlı sensör, dopamin tespiti için $0.1 \mu M$ gibi düşük bir algılama limiti sunmuştur. Bu, PPy'nin biyolojik ortamlarla uyumluluğunu ve redoks özelliklerini destekleyen önemli bir göstergedir (Seenivasan et al., 2015).

PEDOT, biyosensör tasarımlarında özellikle glukoz gibi biyomoleküllerin tanısal analizinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak PEDOT temelli glukoz sensörlerinde bildirilen LOD değeri $5 \mu M$ olup, bu değer diğer iletken polimer kompozitlerine kıyasla daha yüksektir. Bu durum, PEDOT'un seçiciliğini artırmak amacıyla ileri düzey dopant ve nano yapı katkılarıyla fonksiyonelleştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Wang et al., 2020).

Altın nanoparçacıklarla desteklenmiş PPy/AuNPs kompozitleri, özellikle H_2O_2 gibi reaktif oksijen türlerinin tespiti için gıda kalite kontrol sistemlerinde

etkili bir platform sunmuştur. Bu sistemde elde edilen $1.2 \mu\text{M}$ algılama limiti, PPy'nin metal nanoparçacıklarla sinerjik etkileşimler sergileyebileceğini ve elektrokimyasal sinyal yanıtını artırabileceğini ortaya koymaktadır (Wassel et al., 2020).

Tablo 2. Farklı iletken polimer tabanlı elektrokimyasal sensörlerin hedef analitleri, uygulama alanları ve algılama limitlerinin (LOD) literatürdeki karşılaştırması.

İletken Polimer	Hedef Analit	Uygulama Alanı	Algılama Limiti (LOD)	Ref
PANI	Pb^{2+}	Çevresel Ağır Metal Tespiti	$0.02 \mu\text{M}$	Hanif et al., 2019
PPy	Dopamin	Nörotransmitter Algılama	$0.1 \mu\text{M}$	Seenivasan et al., 2015
PEDOT	Glukoz	Tıbbi Tanı (Biyosensör)	$5 \mu\text{M}$	Wang et al., 2020
PANI/rGO	Cd^{2+}	Çevresel Kirleticisi	$0.01 \mu\text{M}$	Hanif et al., 2019
PPy(AuNPs)	H_2O_2	Gıda Kalite Kontrolü	$1.2 \mu\text{M}$	El-Naggar & Shoueir, 2020

5.1. Çevresel Kirleticilerin Tespiti

Ağır metal iyonları, pestisitler, nitrit ve fenolik bileşikler gibi çevresel kirleticilerin düşük düzeylerde tespiti, çevre sağlığının korunması açısından önemlidir. İletken polimer temelli sensörler, özellikle Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} gibi iyonların tespitinde başarılı sonuçlar vermektedir. PPy/grafen oksit nanokompozitleri ile $0.01 \mu\text{M}$ seviyesinde Pb^{2+} tespiti gerçekleştirilmiştir (Hanif et al., 2019). Ayrıca, polianilin-metal oksit hibritleri ile pestisitlerin seçici algılanması sağlanabilmektedir (Seenivasan et al., 2015).

5.2. Biyosensör Uygulamaları (DNA, Protein, Enzim Tabanlı)

İletken polimerler, enzim, antikor ve DNA gibi biyomoleküllerin immobilizasyonuna uygun yüzeyler oluşturdıklarından biyosensörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, glukoz oksidaz enzimiyle modifiye edilmiş PEDOT elektrotlar, glukozun yüksek duyarlılıkla tespitinde kullanılmaktadır. Benzer şekilde, DNA sensörlerinde PANI'nin pozitif yüklü yüzeyi, negatif yüklü DNA dizileriyle elektrostatik etkileşime girerek hibritizasyon olaylarını izlemeye olanak sağlar (Wang et al., 2020).

5.3. Gıda Güvenliği ve Kalite Kontrol

Gıda ürünlerindeki katkı maddeleri, bozulma ürünleri ve toksik bileşenlerin izlenmesi amacıyla geliştirilen sensörlerde iletken polimerler etkili platformlar sunmaktadır. Örneğin, polipirol bazlı sensörler ile histamin, formaldehit ve nitrat gibi gıda kaynaklı riskli bileşiklerin tespiti mümkündür. Ayrıca bu sensörler, süt ve meyve suyu gibi matrislerde bozulma ürünlerinin takibi için de uygundur (Xu et al., 2017).

5.4. Tıbbi Teşhis ve Sağlık Takibi

Biyobelirteçlerin (örneğin dopamin, serotonin, üre, kreatinin) hızlı ve doğru tespiti için geliştirilen iletken polimer bazlı sensörler, kişisel sağlık takibi sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler düşük hacimli örneklerde çalışabilir, böylece minimal invaziv tanı yöntemlerine olanak tanır. PEDOT:GOx sensör sistemleri, diyabet hastalarında glukoz seviyelerinin anlık takibini mümkün kılmaktadır (Wassel et al., 2020).

5.5. Akıllı Sistemler ve Giyilebilir Teknolojilerle Entegrasyon

İletken polimerlerin esnek ve hafif yapısı, onları giyilebilir elektronik sensörler için uygun kılar. Esnek PEDOT:PSS bazlı elektrotlar, ter, tükürük gibi biyolojik sıvılarda elektrolit ve glukoz takibinde kullanılmaktadır. Ayrıca bu tür sensörler, IoT (Nesnelerin İnterneti) platformlarıyla entegre edilerek uzaktan sağlık izleme sistemlerine dahil edilebilmektedir (Wang et al., 2020).

6. Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Önerileri

Her ne kadar iletken polimerler, elektrokimyasal sensörlerde üstün performans gösteren yenilikçi malzemeler olsa da, bu sistemlerin yaygınlaşması önünde hâlâ çözülmesi gereken çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar hem malzeme düzeyinde hem de uygulama düzeyinde ele alınmalı, sürdürülebilir ve uygulanabilir çözümler geliştirilmelidir.

6.1. Stabilite ve Uzun Ömür Problemleri

İletken polimerlerin bazı türleri (örneğin, poliasetilen ve bazı PPy formları), çevresel koşullara (nem, sıcaklık, ışık) karşı duyarlı olup zamanla fiziksel bozulma veya kimyasal degradasyona uğrayabilmektedir. Bu durum, sensörlerin uzun vadeli güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini olumsuz etkiler. Bunun üstesinden gelebilmek için, polimer yapılarının çapraz bağlama ile stabilize edilmesi, antioksidan ajanlar ve UV-stabilizatör katkılarıyla dış etkenlere karşı dayanıklılığın artırılması ve nanokompozit formülasyonlar ile fiziksel stabilitenin iyileştirilmesi gerekmektedir (Chen & Zhang, 2021).

6.2. Seçicilik ve Matris Etkileri

Gerçek numune ortamları (kan, idrar, atık su vb.), çok sayıda etkileşimli bileşik içerdiğinden, sensörlerin seçiciliği düşebilir. İletken polimerler, bazı interferans maddeleriyle de etkileşime girebilir ve yanlış pozitif/negatif sonuçlara neden olabilir. Bu yüzden yüzey modifikasyonlarında biyotanıma elemanları (enzim, aptamer, antikor) kullanımı, MIP (Moleküler Baskılanmış Polimer) teknolojisinin iletken polimerlerle entegre edilmesi ve ikili tanıma sistemleriyle (ör. enzim + redoks marker) seçiciliğin artırılması bu sorunların ortadan kalkmasına yardımcı olacaktır (Alam et al., 2022).

6.3. Reprodüksiyon ve Sensör Standardizasyonu

Laboratuvar koşullarında elde edilen yüksek performans, sensörlerin farklı laboratuvarlarda ya da endüstriyel üretimde aynı kalitede üretilebileceği anlamına gelmemektedir. Elektropolimerizasyon gibi süreçlerin hassaslığı nedeniyle reprodüksiyon güçlüğü yaşanabilmektedir. Sentez ve kaplama protokollerinin standardize edilmesi, otomatik üretim sistemleri ile yüzey kaplamalarının homojenleştirilmesi ve kalibrasyon protokollerinin oluşturulması ve validasyon çalışmaları yapılması problemlerin ortadan kalkmasına yardımcı olacaktır (Lakard, 2020).

6.4. Sürdürülebilirlik ve Yeşil Kimya Yaklaşımları

Birçok iletken polimer sentezinde toksik monomerler, çözücüler ve dopantlar kullanılmaktadır. Bu durum, hem çevresel hem de biyouyumluluk açısından sorun yaratabilir. Su bazlı elektropolimerizasyon süreçlerinin geliştirilmesi, doğal kaynaklı monomerler ve biyobozunur katkıların kullanılması ve atık geri kazanımı ve enerji verimliliği odaklı üretim tekniklerinin benimsenmesi sürdürülebilirlik açısından sensörlerin gelişimine katkı sağlayacaktır (Min et al., 2023). Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, iletken polimer tabanlı sensörlerin daha yaygın ve güvenilir bir şekilde klinik tanı, çevresel analiz ve gıda izleme gibi alanlarda kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

7. Gelecek Perspektifleri

İletken polimer tabanlı elektrokimyasal sensörler, sundukları düşük maliyet, yüksek duyarlılık ve yapısal esneklik gibi avantajlarla sensör teknolojisinde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Ancak teknolojik gelişmeler ve artan uygulama talepleri doğrultusunda bu sistemlerin, daha sofistike ve çok yönlü çözümler sunabilecek şekilde yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Bu bağlamda önümüzdeki dönemde aşağıda belirtilen yenilikçi yaklaşımlar ve odak alanları öne çıkmaktadır.

7.1. Çok Fonksiyonlu Akıllı Sensörler

Gelecekteki sensör sistemlerinin yalnızca tek bir analiti değil, birden fazla parametreyi aynı anda izleyebilecek çoklu algılama kapasitesine sahip olması beklenmektedir. Bu bağlamda iletken polimerler, farklı biyomoleküllerle işlevselleştirilerek aynı yüzeyde çoklu algılama bölgeleri oluşturulmasına olanak tanır. Polimer tabanlı multi-analyte sensör platformları, özellikle kan, ter veya tükürük gibi kompleks biyolojik örneklerde sağlık durumunun kapsamlı değerlendirilmesi için büyük önem taşır (Virumbrales, Hernández-Ruiz, Trigo-López, Vallejos, & García, 2024).

7.2. IoT ve Yapay Zeka ile Entegre Sistemler

İletken polimerlerin giyilebilir elektroniklerle ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı platformlarla entegre edilmesi, gerçek zamanlı izleme ve uzaktan sağlık takibi uygulamalarını mümkün kılmaktadır. Ayrıca sensörlerden gelen büyük verilerin işlenmesinde yapay zeka (AI) algoritmalarının kullanılması, ölçüm doğruluğunu artıracak ve bireyselleştirilmiş sağlık çözümlerine olanak tanıyacaktır. Gelecekte bu sistemlerin bulut tabanlı veri analiz sistemleriyle entegre çalışması hedeflenmektedir (N. S. Gupta & Kumar, 2023).

7.3. Yeni Nesil Elektropolimerler ve Sentez Yaklaşımları

Klasik iletken polimerlerin yanı sıra, son dönemde geliştirilen fonksiyonel monomerler, biyobozunur yapılar ve su bazlı polimerizasyon teknikleri, çevre dostu üretim süreçlerinin önünü açmaktadır. Ayrıca elektrokimyasal kaplama tekniklerinde 3D yazıcı destekli mikro-elektrotlar ve yönlendirilmiş büyüme stratejileri ile daha hassas yüzey tasarımları geliştirilmektedir. Bu gelişmeler, sensör yüzeylerinin hem analit tanıma kabiliyetini hem de sinyal tepkisini iyileştirecektir (Li, Zhu, Hai, Bi, & Zhang, 2023).

7.4. Klinik ve Endüstriyel Ticarileşme Potansiyeli

Araştırma düzeyindeki başarıların klinik ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir hale gelmesi, bu teknolojilerin geleceği açısından kritiktir. Özellikle CE ve FDA onaylı biyoanalitik sensörlerde, iletken polimer bazlı yapılar daha fazla yer bulmaya başlamıştır. Gıda endüstrisinde raf ömrü izleme, tıbbi tanıda hızlı tarama kitleri ve çevre sektöründe taşınabilir analiz cihazları gibi birçok alanda ticarileşmeye yönelik prototipler geliştirilmektedir. Bu eğilim, gelecekte sensör teknolojilerinin günlük yaşamda daha görünür hale geleceğini göstermektedir (Harito et al., 2020).

Gelecek perspektifleri, sadece teknolojik yenilikleri değil, aynı zamanda disiplinler arası iş birlikleri, sürdürülebilirlik ilkeleri ve kullanıcı dostu sistemlerin geliştirilmesini de içermelidir. Bu çerçevede iletken polimer tabanlı

sensörler, hem akademik araştırmalarda hem de toplumsal uygulamalarda kilit rol oynamaya devam edecektir.

8. Sonuçlar

İletken polimerler, elektrokimyasal sensör teknolojilerinin gelişiminde kritik bir dönüm noktası teşkil eden malzeme grupları arasında yer almaktadır. Bu polimerler, elektriksel iletkenlik ile birlikte mekanik esneklik, yüzey modifiye edilebilirlik ve fonksiyonel grup taşıma gibi özellikleri aynı yapıda bir araya getirerek, hem geleneksel hem de yeni nesil sensör sistemleri için ideal platformlar sunmaktadır. Gerek tek başına gerekse karbon bazlı nanomalzemeler, metal oksitler veya biyomoleküllerle birlikte oluşturdukları hibrit sistemlerde, analitik performans (duyarlılık, seçicilik, LOD, dinamik aralık) açısından ciddi iyileşmeler sağlamışlardır.

Bu derleme çalışmasında, iletken polimerlerin türleri, yapısal ve elektronik özellikleri, sensör tasarımındaki rolleri, performans artırıcı stratejileri ve uygulama alanları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle PANI, PPy ve PEDOT gibi polimerlerin, elektropolimerizasyon gibi kontrollü sentez teknikleri ile fonksiyonelleştirilerek glukozdan ağır metallere, DNA'dan pestisitlere kadar geniş bir analit yelpazesinde etkin sensör platformlarına dönüştürüldüğü ortaya konmuştur. Nanokompozit üretimi, yüzey modifikasyon teknikleri ve dopant seçimi gibi parametrelerin sensör performansı üzerinde belirleyici etkileri olduğu açıkça görülmüştür.

Uygulama perspektifinde ise iletken polimer tabanlı sensörlerin çevresel izleme, gıda güvenliği, biyotıp, klinik tanı ve kişisel sağlık takibi gibi çok geniş bir yelpazede kullanıma uygun olduğu anlaşılmıştır. Özellikle giyilebilir elektronikler ve IoT tabanlı sağlık sistemlerine entegre edilebilen bu sensörler, gerçek zamanlı izleme sistemlerinin temel yapı taşlarını oluşturma potansiyeline sahiptir. Ancak bu teknolojilerin laboratuvar ortamından ticari pazara aktarılabilmesi için bazı sınırlamaların aşılması gerekmektedir. Stabilitate, üretim tekrarlanabilirliği, standardizasyon eksiklikleri ve biyoyoumluluk gibi zorluklar, bu sensörlerin yaygınlaşmasının önündeki başlıca engeller olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, iletken polimer tabanlı elektrokimyasal sensörler, günümüz teknolojik gereksinimlerine cevap veren, sürdürülebilir, ekonomik ve yüksek performanslı tanı sistemlerinin geliştirilmesinde öncü bir rol üstlenmektedir. Disiplinler arası iş birlikleri, bu alanda yenilikçi ve entegre çözümler geliştirilmesinde kilit öneme sahiptir. Akademi, sanayi ve klinik alanlar arasında kurulan köprüler sayesinde bu sistemlerin günlük yaşamda yaygınlaşması hız kazanacak, bireylerin yaşam kalitesini artıracak akıllı izleme sistemlerine dönüşecektir.

Kaynakça

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615-628.
- Akhdar, H., & Alshehri, M. (2023). Geant4 simulation of photon-and neutron-shielding capabilities of biopolymer blends of poly (lactic acid) and poly (hydroxybutyrate). *Polymers*, 15(21), 4257.
- Al-Faillkawi, F., & Abdulrahman, B. (2025). Evaluating the Role of Thermal Energy Storage in the Performance of Concentrated Solar Power Plants. *Proceedings of 15th International Conference on Renewable and Clean Energy, Icrce 2025*, 1434, 47-54.
- Al-Masry, W. A., Haider, S., Mahmood, A., Khan, M., Adil, S. F., & Siddiqui, M. R. H. (2021). Evaluation of the thermal and morphological properties of γ -irradiated chitosan-glycerol-based polymeric films. *Processes*, 9(10), 1783.
- Alam, M. W., Bhat, S. I., Al Qahtani, H. S., Aamir, M., Amin, M. N., Farhan, M., . . . Souayeh, B. (2022). Recent Progress, Challenges, and Trends in Polymer-Based Sensors: A Review. *Polymers*, 14(11).
- Alkan, C., Sari, A., Karaipekli, A., & Uzun, O. (2009). Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 143-147.
- Alva, G., Liu, L. K., Huang, X., & Fang, G. Y. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
- Alves, Z., Brites, P., Ferreira, N. M., Figueiredo, G., Otero-Irurueta, G., Gonçalves, I., . . . Nunes, C. (2024). Thermoplastic starch-based films loaded with biochar-ZnO particles for active food packaging. *Journal of Food Engineering*, 361, 111741.
- Babapoor, A., Karimi, G., & Khorram, M. (2016). Fabrication and characterization of nanofiber-nanoparticle-composites with phase change materials by electrospinning. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1225-1235.
- Bawazeer, O., Makkawi, K., Aga, Z. B., Albakri, H., Assiri, N., Althagafy, K., & Ajlouni, A.-W. (2023). A review on using nanocomposites as shielding materials against ionizing radiation. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 9(3), 325-340.
- Bayram, S., Mert, H. H., & Mert, M. S. (2023). Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli (stiren-ko-divinil benzen) matrisine sahip n-nonadekan içeren şekilce kararlı kompozit faz değıştiren maddelerin hazırlanması ve özel-

- liklerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 435-450.
- Brechtel, J., Ullman, A. M., Li, K., Yang, G., Nanda, J., Nawaz, K., & Sacci, R. L. (2024). Phase change electrolytes for combined electrochemical and thermal energy storage. *Energy Reports*, 11, 3931-3940.
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737.
- Chang, Q., Guo, S., & Zhang, X. (2023). Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications. *Materials & Design*, 233, 112253.
- Chen, L., & Zhang, J. M. (2021). Designs of conductive polymer composites with exceptional reproducibility of positive temperature coefficient effect: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(3).
- Cichosz, S., Masek, A., & Zaborski, M. (2018). Polymer-based sensors: A review. *Polymer Testing*, 67, 342-348. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.03.024
- Coqueret, X. (2024). Radiation-induced cross-linking polymerization: Recent developments for coating and composite applications. *Nukleonika*, 69.
- Cosnier, S. (2005). Affinity biosensors based on electropolymerized films. *Electroanalysis*, 17(19), 1701-1715.
- Darie-Niță, R. N., & Frăcowskiak, S. (2025). An Overview of Potential Applications of Environmentally Friendly Hybrid Polymeric Materials. *Polymers*, 17(2), 252.
- Díaz-Cruz, C. A., Caicedo, C., Jiménez-Regalado, E. J., Díaz de León, R., López-González, R., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Evaluation of the antimicrobial, thermal, mechanical, and barrier properties of corn starch-chitosan biodegradable films reinforced with cellulose nanocrystals. *Polymers*, 14(11), 2166.
- Duan, Q., Chen, Y., Yu, L., & Xie, F. (2022). Chitosan-gelatin films: plasticizers/nanofillers affect chain interactions and material properties in different ways. *Polymers*, 14(18), 3797.
- El Rahman, A., Metwally, H., Sabry, N., & Mohammed, M. (2024). Gamma-ray shielding effectiveness, optical, mechanical, dielectric properties of nanofiller-reinforced PVA/PVP polymeric blend nanocomposites. *Scientific reports*, 14(1), 27466.
- Elsafi, M., El-Nahal, M., Sayyed, M., Saleh, I., & Abbas, M. (2022). Novel 3-D printed radiation shielding materials embedded with bulk and nanoparticles of bismuth. *Scientific Reports*, 12(1), 12467.

- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 33.
- Feldman, D., Shapiro, M., & Banu, D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar energy materials*, 13(1), 1-10.
- Frenot, A., & Chronakis, I. S. (2003). Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(1), 64-75.
- Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Akhtar, M. N., Kadhum, A. A. H., Mohamad, A. B., & Al-Amiery, A. A. (2015). Properties and applications of polyvinyl alcohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites. *Molecules*, 20(12), 22833-22847.
- Gadhawe, P., Pathan, F., Kore, S., & Prabhune, C. (2021). Comprehensive review of phase change material based latent heat thermal energy storage system. *International Journal of Ambient Energy*.
- Gibi, C., Liu, C. H., Barton, S. C., Anandan, S., & Wu, J. J. (2024). Carbon Materials for Electrochemical Sensing Application - A Mini Review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 154.
- Gupta, N. S., & Kumar, P. (2023). Perspective of artificial intelligence in healthcare data management: A journey towards precision medicine. *Computers in Biology and Medicine*, 162.
- Gupta, S. C., Baheti, G., & Gupta, B. (2000). Application of hydrogel system for neutron attenuation. *Radiation Physics and Chemistry*, 59(1), 103-107.
- Hamouma, O., Kaur, N., Oukil, D., Mahajan, A., & Chehimi, M. M. (2019). Paper strips coated with polypyrrole-wrapped carbon nanotube composites for chemi-resistive gas sensing. *Synthetic Metals*, 258.
- Hanif, F., Tahir, A., Akhtar, M., Waseem, M., Haider, S., Aboud, M. F. A., . . . Warsi, M. F. (2019). Ultra-selective detection of Cd²⁺ and Pb²⁺ using glycine functionalized reduced graphene oxide/polyaniline nanocomposite electrode. *Synthetic Metals*, 257.
- Hao, L., & Yu, D. M. (2022). Progress of conductive polypyrrole nanocomposites. *Synthetic Metals*, 290.
- Harito, C., Utari, L., Putra, B. R., Yulianto, B., Purwanto, S., Zaidi, S. Z. J., . . . Walsh, F. C. (2020). Review-The Development of Wearable Polymer-Based Sensors: Perspectives. *Journal of the Electrochemical Society*, 167(3).
- Hashim, A., Al-Attiyah, K., & Obaid, S. (2019). Fabrication of novel (biopolymer blend-lead oxide nanoparticles) nanocomposites: structural and optical properties for low-cost nuclear radiation shielding. *Ukrainian journal of physics*(64,№ 2), 157-163.
- Hassan, M. H., Khan, R., & Andreescu, S. (2022). Advances in electrochemical detection methods for measuring contaminants of emerging concerns. *Electrochemical Science Advances*, 2(6).

- Hatchett, D. W., & Josowicz, M. (2008). Composites of intrinsically conducting polymers as sensing nanomaterials. *Chemical Reviews*, 108(2), 746-769.
- John, B. (2020). Polymer nanocomposite-based electrochemical sensors and biosensors. In *Nanorods and nanocomposites*: IntechOpen.
- Kale, P., Gondane, P., Bhutada, P., Patil, A., Patil, Y., & Yadav, R. (2025). *Phase Change Materials in Thermal Energy Storage: A Comprehensive Review of Properties, Advances, and Challenges*. Paper presented at the 2025 International Conference on Sustainable Energy Technologies and Computational Intelligence (SETCOM).
- Kanlı, Z., Mert, M. S., & Mert, H. H. (2021). Isıl Enerji Depolama Uygulamaları İçin Selüloz Nanofibril Temelli Parafin İçeren Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(22), 273-281.
- Karadağ, M., Akçay, İ. T., & Karakurt, A. S. (2024). Trends and Emerging Themes in Thermal Energy Storage: A Bibliometric Study. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 44-53.
- Karatas, O., Ercan, H. U., Altin, M., Ogul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227.
- Karataş, Ö., Ercan, H. Ü., Altın, M., Oğul, H., & Bulut, F. (2025). Investigation of gamma-ray radiation shielding properties of zinc borate and paraffin filled sheep wool biopolymer composites: Experimental and theoretical analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 227, 112396.
- Kerroumi, N. (2017). Solar thermal energy storage using latent heat: discharging energy from phase change material. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 4(3), 37-45.
- Ko, S. H., Kim, S. W., & Lee, Y. J. (2021). Flexible sensor with electrophoretic polymerized graphene oxide/PEDOT:PSS composite for voltammetric determination of dopamine concentration. *Scientific Reports*, 11(1).
- Kumar, S., Sarkar, C., & Saha, S. (2024). Renewable thermal energy storage in polymer encapsulated phase-change materials: a comprehensive overview. *Challenges and Opportunities of Distributed Renewable Power*, 181-214.
- Lakard, B. (2020). Electrochemical Biosensors Based on Conducting Polymers: A Review. *Applied Sciences-Basel*, 10(18).
- Lenfeld, P., Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., & Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers on properties and characterization of biopolymer composites. *Polymers*, 12(12), 3006.

- Li, T., Zhu, X. Y., Hai, X., Bi, S., & Zhang, X. J. (2023). Recent Progress in Sensor Arrays: From Construction Principles of Sensing Elements to Applications. *Acs Sensors*, 8(3), 994-1016.
- Lin, Y. X., Jia, Y. T., Alva, G., & Fang, G. Y. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742.
- Liu, A. B., Xie, H. Q., Wu, Z. H., & Wang, Y. Y. (2022). Advances and outlook of TE-PCM system: a review. *Carbon Neutrality*, 1(1).
- Liu, S. Q., White, K. L., & Reneker, D. H. (2019). Electrospinning Polymer Nanofibers With Controlled Diameters. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 55(5), 5239-5243.
- Mallakpour, S., Tukhani, M., & Hussain, C. M. (2021). Sustainable plant and microbes-mediated preparation of Fe₃O₄ nanoparticles and industrial application of its chitosan, starch, cellulose, and dextrin-based nanocomposites as catalysts. *International Journal of Biological Macromolecules*, 179, 429-447.
- Mert, H. H., & Bayram, S. (2020). Isıl Enerji Depolama Uygulamalarına Yönelik Mikrokapsüllenmiş N-Oktadekan/Nanokil Kompozit Faz Değiştiren Malzemelerin Geliştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 675-687.
- Mert, H. H., & Mert, M. S. (2020). Faz Değiştiren Madde Olarak n-Hekzadekan Esaslı Mikrokapsüllerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Performansının T-Kayıt Yöntemiyle Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(18), 148-161.
- Mert, H. H., Mert, M. S., & Mert, E. H. (2020). N-Hekzadekan/Montmorillonit Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Hazırlanması Ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 229-239.
- Mert, M. S., Sert, M., & Mert, H. H. (2018). Isıl Enerji Depolama Sistemleri İçin Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161-174.
- Min, J. K., Jung, Y., Ahn, J., Lee, J. G., Lee, J., & Ko, S. H. (2023). Recent Advances in Biodegradable Green Electronic Materials and Sensor Applications. *Advanced Materials*, 35(52).
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021a). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19(3), 2057-2090.
- More, C. V., Alsayed, Z., Badawi, M. S., Thabet, A. A., & Pawar, P. P. (2021b). Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 2057-2090.

- Nafee, S., Tijani, S., Al-Hadeethi, Y., & Hussein, M. A. (2024). Radiation shielding potential of cellulose acetate-CdO-ZnO polymer composites in comparison with concrete and gypsum. *Radiation Physics and Chemistry*, 225, 112145.
- Nagar, S., & Sreenivasa, S. (2024). Polymer-based supporting materials and polymer-encapsulated phase change materials for thermal energy storage: A review on the recent advances of materials, synthesis, and characterization techniques. *Polymer Engineering and Science*, 64(9), 4341-4370.
- Niksarloğlu, S., Akman, F., Pekdemir, M. E., Kuzu, S. Y., Kaçal, M. R., & Yılmaz, M. (2023). An extensive investigation on gamma shielding properties of PLA/Gd₂O₃ nanocomposites. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110936.
- Noyan, E. C. B., Onder, E., Sarier, N., & Arat, R. (2018). Development of heat storing poly(acrylonitrile) nanofibers by coaxial electrospinning. *Thermo-chimica Acta*, 662, 135-148.
- Nuray, K. (2024). Neutron shielding properties of cellulose acetate CdO-ZnO polymer composites. *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng*, 10.
- Okonkwo, U. C., Idumah, C. I., Okafor, C. E., & Ezeani, E. O. (2023). Construction of radiation attenuating polymeric nanocomposites and multifaceted applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 62(12), 1639-1661.
- Omar, M. A. A., & Elnabi, M. E. M. G. (2011). Gamma radiation synthesis and characterization of polyvinyl alcohol/silver nano composites film. *Journal of Science and Technology*, 12(1), 104-110.
- Oudaoui, K., & Faraji, M. (2022). *Numerical Study of Latent Heat Discharge of a Phase Change Material Shell-and-Tube Thermal Energy Storage System*. Paper presented at the International Moroccan Congress of Mechanics.
- Ouikhalfan, M., Hekimoglu, G., Sari, A., Gencel, O., & Tyagi, V. V. (2022). Metal Oxide Nanoparticle Dispersed-Polyethylene Glycol: Thermal Conductivity and Thermal Energy Storage Properties. *Energy & Fuels*, 36(5), 2821-2832.
- Park, S., & Fu, K. (2021). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 213.
- Pekdemir, M. E., Öner, E., Kök, M., & Qader, I. N. (2021). Thermal behavior and shape memory properties of PCL blends film with PVC and PMMA polymers. *Iranian Polymer Journal*, 30(6), 633-641.
- Pekdemir, M. E., Pekdemir, S. S., Yılmaz, D., Onay, H., & Nazem Qader, I. (2025). Snail Shell-Reinforced Waste-Based Polymer Composites for Radiation Shielding and Anti-Reflective Applications. *Polymers*, 17(23), 3115.

- Ramesh, M., Niranjana, K., Bhoopathi, R., & Rajeshkumar, L. (2024). Additive manufacturing (3D printing) technologies for fiber-reinforced polymer composite materials: A review on fabrication methods and process parameters. *E-Polymers*, 24(1).
- Saha, S. K., & Dutta, P. (2012). Thermal Management of Electronics Using PCM-Based Heat Sink Subjected to Cyclic Heat Load. *Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2(3), 464-473.
- Sahan, N., & Paksoy, H. (2018). Novel shapeable phase change material (PCM) composites for thermal energy storage (TES) applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 380-387.
- Saied, M., Ward, A., & Hamieda, S. F. (2024). Effect of apricot kernel seed extract on biophysical properties of chitosan film for packaging applications. *Scientific reports*, 14(1), 3430.
- Sandhyarani, N. (2019). Surface modification methods for electrochemical biosensors. *Electrochemical Biosensors*, 45-75.
- Sarkar, A. K., Bediako, J. K., Choi, J.-W., & Yun, Y.-S. (2019). Functionalized magnetic biopolymeric graphene oxide with outstanding performance in water purification. *NPG Asia Materials*, 11(1), 4.
- Seenivasan, R., Chang, W. J., & Gunasekaran, S. (2015). Highly Sensitive Detection and Removal of Lead Ions in Water Using Cysteine-Functionalized Graphene Oxide/Polypyrrole Nanocomposite Film Electrode. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 7(29), 15935-15943.
- Selçuk Pekdemir, S., Yalçın Kuzu, S., Yılmaz, D., Pekdemir, M. E., Taş, R., & Kök, M. (2025). Physicochemical, Radiation Shielding, and Anti-Reflective Properties of PCL/PVC Nanocomposites Reinforced With Microwave-Synthesized FeS₂ Nanospheres. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(45), e57737.
- Shahriar Kabir, M., Hossain, M. S., Mia, M., Islam, M. N., Rahman, M. M., Hoque, M. B., & Chowdhury, A. S. (2019). Mechanical properties of gamma-irradiated natural fiber reinforced composites. *Nano hybrids and composites*, 23, 24-38.
- Singh, B., Kumar, R., & Chohan, J. S. (2020). Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Materials Today-Proceedings*, 33, 1562-1567.
- Temel, Ü. N., & Çiftçi, B. Y. (2018). Determination of Thermal Properties of A82 Organic Phase Change Material Embedded with Different Type Nanoparticles. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*, 38(2), 75-85.
- Thongpool, V., Phunpueok, A., Barnthip, N., & Jaiyen, S. (2015). BaSO₄/polyvinyl alcohol composites for radiation shielding. *Applied Mechanics and Materials*, 804, 3-6.

- Ulutaş, E., & Taşdemir, M. (2024). Polipropilen (Pp)/Kalsiyum Borat [Ca3 (Bo3) 2]/Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen (Ma-G-Pp) Polimer Kompozitinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 1421-1431.
- Ulutaş, E., Taşdemir, M., Korkmaz, Ö. F., Kuvvet, N., & Duran, M. C. (2024). Polipropilen/montmorillonit kompozit köpüğünün fiziksel, termal ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1207-1218.
- Vázquez, M., Velazquez, G., & Cazón, P. (2021). UV-Shielding films of bacterial cellulose with glycerol and chitosan. Part 1: equilibrium moisture content and mechanical properties. *CyTA-Journal of Food*, 19(1), 105-114.
- Virumbrales, C., Hernández-Ruiz, R., Trigo-López, M., Vallejos, S., & García, J. M. (2024). Sensory Polymers: Trends, Challenges, and Prospects Ahead. *Sensors*, 24(12).
- Wang, Y. M., Liu, A. P., Han, Y. Q., & Li, T. X. (2020). Sensors based on conductive polymers and their composites: a review. *Polymer International*, 69(1), 7-17.
- Wassel, A. R., El-Naggar, M. E., & Shoueir, K. (2020). Recent advances in polymer/metal/metal oxide hybrid nanostructures for catalytic applications: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5).
- Xu, J. H., Wang, Y. Z., & Hu, S. S. (2017). Nanocomposites of graphene and graphene oxides: Synthesis, molecular functionalization and application in electrochemical sensors and biosensors. A review. *Microchimica Acta*, 184(1), 1-44.
- Yetgin, S. H., Karadeniz, B., & Guleşen, M. (2017). Grafen Oksit Katkılı Polipropilen Polimer Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 34-40.
- Yue, S., Wang, S., Hana, D., Huang, S., Sun, L., Xiao, M., & Meng, Y. (2023). Polyvinyl alcohol/montmorillonite nanocomposite coated biodegradable films with outstanding barrier properties. *ES Materials & Manufacturing*, 20(2), 834.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- Zhang, H., Shi, T., & Ma, A. (2021). Recent advances in design and preparation of polymer-based thermal management material. *Polymers*, 13(16), 2797.
- Zhang, N., Yuan, Y. P., Cao, X. L., Du, Y. X., Zhang, Z. L., & Gui, Y. W. (2018). Latent Heat Thermal Energy Storage Systems with Solid-Liquid Phase Change Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(6).

Zohra, M. B., Amine, R., & Alhamany, A. (2019). *Development of thermal energy storage system based on phase change materials*. Paper presented at the 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE).

İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Gelişimi ve Fonksiyonel Kullanım Alanları

Hüseyin Akbaş¹

Özet

Günümüzde iyonik sıvılar, çok yönlü ve yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesine olanak tanıyan yeni bir kimyasal bileşik sınıfı olarak dikkat çekmektedir. Düşük buhar basıncı, yüksek termal kararlılık, yanmazlık, güçlü iyonik iletkenlik ve geniş elektrokimyasal pencere gibi ayırt edici özellikleri nedeniyle iyonik sıvılara yönelik ilgi giderek artmaktadır. İyonik sıvıların özellikleri; katyon, anyon veya her ikisine birden belirli işlevsel grupların entegre edilmesiyle geniş bir yelpazede ayarlanabilir niteliktedir. İyonik sıvıların polimerlerle birleştirilmesi, iki bileşenin özgün özelliklerinin sinerjik şekilde birleşmesini sağlayarak akıllı ve fonksiyonel kompozit malzemelerin tasarımına olanak sunmaktadır. Hem iyonik sıvının hem de polimer matrisinin yapısal veya kimyasal olarak modifiye edilebilmesi, çok çeşitli fonksiyonel kompozitlerin elde edilmesine ve farklı uygulamaların özgül gereksinimlerine uygun malzemelerin geliştirilmesine imkân tanır. Bu doğrultuda, duyarlı ve hassas sensörler, aktüatörler, çevresel izleme sistemleri, piller, yakıt hücreleri ve biyomedikal teknolojiler başta olmak üzere çok geniş bir uygulama alanı için akıllı iyonik sıvı/polimer bazlı malzemeler tasarlanmakta ve geliştirilmektedir.

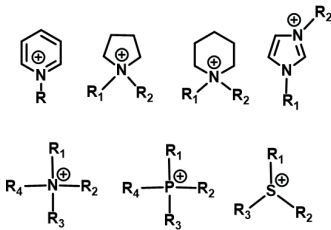
1. İyonik Sıvılar

İyonik sıvılar, anyon ve katyonlardan oluşan ve çoğunlukla 100 °C'nin altında erime sıcaklığına sahip iyonik bileşikler olarak tanımlanmaktadır (Coimbra vd. 2025). Erimiş sıvılar, 100 °C'nin üzerinde sıvı halde bulunanlar olarak tanımlanırken, iyonik sıvılar bu sıcaklığın altında sıvı halde bulunanlardır (Kianfar ve Mafi 2020). Bu sistemler, geniş bir çeşitlilikte organik katyonlar ile organik veya inorganik anyonları içerebilir. Şekil 1.1'de iyonik sıvıların sentezinde yaygın olarak kullanılan tipik katyon ve anyon türleri sunulmuştur. İyonik sıvılarda bulunan iyon çiftleri; hidrojen

1 Doç. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, huseyin.akbas@gop.edu.tr, ORSID ID: 0000-0002-3013-9033

bağları, Coulomb çekim kuvvetleri ve van der Waals etkileşimleri gibi çeşitli fiziksel etkileşimler aracılığıyla bir arada tutulmaktadır (Wei vd. 2023). İlk iyonik sıvı örneği olan etilamonyum nitrat (EAN), 1914 yılında Walden tarafından rapor edilmiştir (Welton 2018). Bunu takiben, 1970-1980 yılları arasında alüminyum halojenürlerin imidazolyum halojenürlerle reaksiyonu sonucu elde edilen alkilimidazolyum halojenoalüminat türleri, literatürde ‘birinci nesil’ iyonik sıvılar olarak tanımlanmıştır. **İyonik sıvıların gelişimi literatürde genel olarak dört nesil altında sınıflandırılmaktadır.** Birinci nesil iyonik sıvılar, temel olarak çevre dostu çözücüler olarak tasarlanmış ve düşük uçuculukları nedeniyle “yeşil çözücü” yaklaşımının öncülerini oluşturmuştur. **İkinci nesil** iyonik sıvılar, belirli katalitik süreçlerde ve elektrokimyasal sistemlerde kullanılmak üzere fonksiyonelleştirilmiş, uygulamaya özel özelliklerle geliştirilmiştir. **Üçüncü nesil** iyonik sıvılar ise biyolojik kaynaklı bileşenlerin dahil edilmesi ve görev-spesifik fonksiyonların kazandırılmasıyla biyomedikal, farmasötik ve çevresel uygulamalara yönelik olarak tasarlanmıştır. Son olarak, **dördüncü nesil** iyonik sıvılar, sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda biyolojik olarak parçalanabilirlik, çevresel uyumluluk ve çok işlevlilik gibi niteliklere odaklanarak geliştirilen yeni nesil iyonik sıvı sınıfını temsil etmektedir (Alreshidi vd. 2025).

KATYONLAR

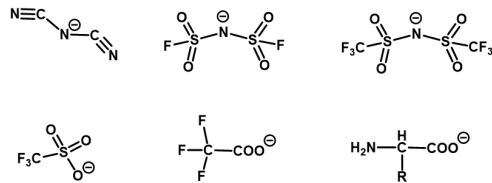


ANYONLAR

F^- , Cl^- , Br^- ,

BF_4^- , PF_6^- , NO_3^- ,

RSO_3^- , $RCOO^-$, $R_2PO_4^-$



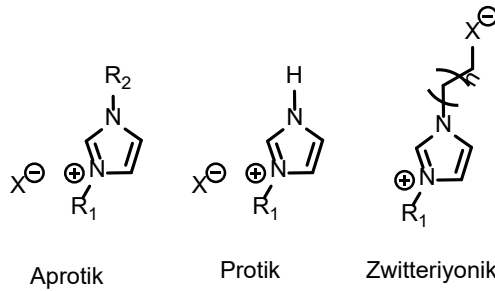
Şekil 1.1. İyonik sıvılarda bazı yaygın katyon ve anyonların yapıları

Genel olarak iyonik sıvılar, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından konvansiyonel çözücülerden belirgin biçimde ayrılan bir dizi üstün nitelik sergiler (Mahmood vd. 2017; Usman vd. 2025). Bu özgün özellikler aşağıda özetlenmiştir:

- İhmal edilebilir düzeyde buhar basıncı, bu da uçuculuklarının son derece düşük olması nedeniyle güvenli kullanım ve çevresel açıdan avantaj sağlar.
- Yüksek iyonik iletkenlik ($\sim 10^{-3}$ - 10^{-2} S/cm aralığında), elektroaktif uygulamalarda etkin performans sunar.
- Görece yüksek viskozite ve yoğunluk, yapıdaki güçlü iyon-iyon etkileşimlerinin bir sonucudur.
- Organik, inorganik ve polimerik sistemlerle geniş çözünürlük ve karışılabilirlik, iyonik sıvıları çok yönlü çözücüler ve ortamlar hâline getirir.
- Yüksek termal kararlılık, çoğu iyonik sıvının 350 °C'nin üzerinde bozunmasıyla kendini gösterir.
- Geniş elektrokimyasal pencere (genellikle 4-6 V veya daha üzeri), elektrokimyasal cihazlarda kullanım alanını genişletir.
- Yanmazlık özellikleri, güvenlik açısından organik çözücülere kıyasla önemli bir avantaj sağlar.

Ayrıca, iyonik sıvılar organik reaksiyonlar, kataliz, ekstraksiyon ve ayırma gibi çeşitli süreçlerde geleneksel uçucu organik çözücülerin yerini alabilmekte ve böylece yeşil kimya ile temiz teknolojilerin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu özellikleri, iyonik sıvıları hem güvenli işlem ortamları oluşturmak hem de sürdürülebilir kimyasal süreçleri desteklemek amacıyla tercih edilen malzemeler hâline getirmektedir.

İyonik sıvılar genellikle üç alt sınıfa ayrılmaktadır: aprotik, protik ve zwitteriyonik (Şekil 1.2) (Fernandes vd. 2025). Her alt sınıf, genellikle belirli uygulama gereksinimlerine göre tasarlanmakta ve sentezlenmektedir. Bu sınıflar, örneğin lityum-iyon bataryaları, süper kapasitörler, yakıt hücreleri ve iyonik sıvı esaslı membranlar gibi ileri teknoloji uygulamalarında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1.2. İyonik sıvıların genel sınıflandırması

Aprotik iyonik sıvılar, genellikle piridinyum, imidazolyum ve fosfonyum gibi büyük katyonlar ile daha küçük anyonları içerir ve en yaygın kullanılan iyonik sıvı türüdür (Koutsoukos vd. 2024). Protik iyonik sıvılar ise Brönsted asidi ve Brönsted bazının kombinasyonu yoluyla proton transferi ile hazırlanır; bu durum, hidrojen bağlı bir ağ oluşturmak için kullanılabilen proton verici ve alıcı bölgelerin varlığını sağlar (Greaves ve Drummond 2015). Bu özellikleri nedeniyle protik iyonik sıvılar, yakıt hücresi uygulamalarında yeni proton iletkenleri ve N-katkılı karbon malzemeler olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Geleneksel polimer öncülleri yerine, doğrudan karbonizasyon işlemleri yoluyla yeni küçük molekül öncülleri olarak protik iyonik sıvılar da kullanılmaktadır. Zwitteriyonik iyonik sıvılar ise, yüzey aktif madde sistemlerine iyonik sıvıların eklenmesiyle elde edilir ve iyonik sıvıları katkı maddesi olarak etkinleştirerek, sulu zwitteriyonik yüzey aktif madde sistemlerinin özelliklerini modifiye etmeyi amaçlar (Huang vd. 2023). Sistemin ortaya çıkan özellikleri, iyonik sıvının katyon ve anyonu ile yüzey aktif madde baş grubu arasındaki etkileşimin türüne ve kapsamına bağlı olarak değişir.

Polimerlerle birlikte kullanılan iyonik sıvılar incelendiğinde, özellikle imidazolyum, fosfonyum, piridinyum ve amonyum bazlı türlerin öne çıktığı görülmektedir. Bu gruplar arasında imidazolyum türevleri, geniş kimyasal çeşitlilik sunmaları, kapsamlı biçimde araştırılmış olmaları ve ticari olarak yaygın bulunabilirlikleri nedeniyle polimer sistemleriyle kombinasyonda en çok tercih edilen iyonik sıvılardır. Bu özellikler, onları farklı uygulama alanlarında erişilebilir ve işlevsel katkı maddeleri hâline getirmektedir. Buna karşın, fosfonyum ve piridinyum bazlı iyonik sıvıların polimerlerle kullanımı daha sınırlıdır. Özellikle yanıcılık özelliklerine yönelik çalışmalarda belirli avantajlar sunsalar da, ticari erişilebilirliklerinin görece düşük olması bu türlerin araştırma ve uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Benzer şekilde, amonyum bazlı iyonik sıvılar da polimerlerle düşük uyumluluk göstermeleri nedeniyle polimer harmanlama ve kompozit hazırlama çalışmalarında nadiren tercih edilmektedir. Uyumluluktaki bu sınırlılık, hedeflenen malzeme özelliklerinin elde edilmesini güçleştirebilmektedir (Shamsuri vd. 2023a,b).

2. İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri

İyonik sıvıların işlevsellikleri; katyon, anyon veya her ikisine birden kovalent olarak bağlanan fonksiyonel gruplar aracılığıyla özelleştirilebilir ve bu sayede kataliz, tıp, CO₂ yakalama, enerji depolama, triboloji ve yakıt teknolojileri gibi çeşitli uygulamalardaki performansları artırılabilir (Zhou vd. 2023). İyonik sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri; alkil

zincir uzunluğu, fonksiyonel grupların türü, manyetik ve lüminesan özellikler ya da katalitik davranış gibi yapısal parametrelere bağlı olarak değiştirilebildiği gibi, polimerler gibi başka bileşenlerle birleştirilerek de geniş bir aralıkta ayarlanabilir. İyonik sıvılar, polimer kompozitlere çeşitli işlevsel özellikler kazandırarak bu malzemelerin performansını önemli ölçüde artırır. Öncelikle, iyonik sıvıların çözünme ve etkileşim özellikleri, polimer zincirlerinin hareketliliğini artırarak kompozitlere etkili plastikleştirici nitelik kazandırır; bu durum hem esnekliği hem de işlenebilirliği geliştirir. Ayrıca, güçlü dağıtıcı özellikleri sayesinde dolgu maddelerinin polimer matris içinde aglomerasyonunu engeller ve homojen bir dağılım sağlar. Bu kontrol edilmiş dispersiyon, takviye fazının etkinliğini artırarak çekme dayanımı ve elastik modül gibi mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sunar. İyonik sıvıların yapısal olarak ayarlanabilir olmaları, kompozitlerin hedeflenen elektriksel iletkenlik düzeylerine göre tasarlanabilmesine imkân tanır; bu da iletken polimerler, sensörler ve elektroaktif cihazlar gibi ileri teknolojik uygulamalar için önemli avantajlar sağlar. Son olarak, uçucu olmamaları ve düşük toksisiteleri, onları çevre açısından güvenli ve sürdürülebilir katkı maddeleri hâline getirerek biyobozunur lifler ve çevre dostu kompozitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamalarını mümkün kılar (Shamsuri vd. 2024).

Ekonomik ve hafif malzemelere duyulan ihtiyaç, polimer bazlı kompozitlere olan ilgiyi artırmıştır (Platnieks vd. 2021; Uppal vd. 2022). Polimer kompozitler; matris polimer içinde farklı tipte dolgu maddelerinin dağıtılmasıyla elde edilen ve tek başına polimerin sağlayamayacağı mekanik ve fonksiyonel performans sunan çok fazlı malzemelerdir (Hsissou vd. 2021). Genel olarak polimer kompozitler iki ana bileşenden oluşur: matris ve takviye fazı (lif, partikül veya tabaka). Kompozitler, kaynaklarına, matris türüne ve takviye tipine göre sınıflandırılabilir. İyonik sıvı esaslı polimer kompozitlerin genel sınıflandırılması:

- *Kaynaklara göre:* Lif kompozitleri (Agarwal vd. 2017), doğal lif kompozitleri (Vigneshwaran vd. 2020) ve biyokompozitler (Manu vd. 2022).
- *Matris tipine göre:* Lif takviyeli kompozitler (Prashanth vd. 2017), tabakalı (laminar) kompozitler (Zhao vd. 2023) ve parçacıklı kompozitler (German 2016).
- *Takviyeye göre:* Organik veya metal matrisli kompozitler (Mussatto vd. 2021) ve seramik matrisli kompozitler (Sun vd. 2023).

İyonik sıvıların işlevselliğinin polimer sistemleriyle bütünleştirilmesi, geleneksel nanokompozitlere kıyasla üstün özelliklere sahip akıllı malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu tür kompozitler; film, membran ve lif gibi çeşitli morfolojilerde üretilebilmekte olup, farklı uyaranlara (sıcaklık, ışık, elektriksel alan vb.) duyarlı çok işlevli sistemlerin tasarlanmasına uygun bir platform sunar. Malzemenin nihai performansı; kullanılan iyonik sıvının yapısal özellikleri (katyon/anyon boyutu, viskozite, iletkenlik, yoğunluk, moleküler ağırlık), polimer türü ve iyonik sıvı-polimer etkileşimlerinin doğası tarafından belirlenir. Örneğin, farklı anyon ve katyonlara sahip iyonik sıvıların poli(viniliden florür) (PVDF) matrisine dahil edilmesi, kompozitin elektroaktif β -faz oranını ve mekanik davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Bu durum, PVDF zincirindeki pozitif CH_2 gruplarının iyonik sıvı anyonları ile, negatif CF_2 gruplarının ise iyonik sıvı katyonları ile etkileşime girmesinden kaynaklanmaktadır. PVDF ve kopolimerlerinin morfolojisi üzerine yapılan çalışmalar, iyonik sıvı ilavesinin polimer matrisinde gözenekli yapılar oluşturabildiğini de göstermektedir (Correia vd. 2019). İyonik sıvılar geniş fonksiyonellik sunma kapasiteleri sayesinde, bir nanokompozite çoklu özellik kazandırmak için genellikle birden fazla dolgu maddesi kullanımını gereksiz kılabilir. Böylece malzemenin özgün özelliklerinin bozulmadan korunması ve hedef uygulamaya yönelik daha kontrollü bir fonksiyonelleştirme sağlanır.

İyonik sıvılarla birleştirilmiş polimerlerin hazırlanmasında çözelti karıştırma yöntemi, iyonik sıvıların hem termoplastik hem de termoset polimerlerle birleştirilebilmesini sağladığı için oldukça çok yönlüdür. Bu yöntemde, polimer ve iyonik sıvı uygun bir çözücüde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Termoplastik polimerlerde ise öğütme ve eriyik karıştırma yöntemleri yaygın şekilde uygulanır. Öğütme tekniği, polimerin mekanik olarak küçültülmesini ve ardından iyonik sıvının eklenmesini içerir; bu yaklaşım, iyonik sıvının polimer yapısı boyunca etkili bir şekilde dağılmasına olanak tanır. Eriyik karıştırma ise polimerin eritilmesi ve eriyik fazdaki polimere iyonik sıvının eklenmesi prensibine dayanır; böylece homojen bir dağılım elde edilir. Hazırlama koşulları açısından, çözelti karıştırma ve öğütme yöntemlerinin genellikle oda sıcaklığında yapılabilmesi işlem kolaylığı sağlar. Buna karşın eriyik karıştırma, polimerin eriyik hale geçebilmesi için belirli sıcaklıkların uygulanmasını gerektirir. Ayrıca, birleştirme süresi de önemlidir: Çözelti karıştırma yöntemi, polimer ve iyonik sıvının tamamen çözünüp homojen dağılması için genellikle daha uzun işlem süresi gerektirirken, öğütme ve eriyik karıştırma daha kısa sürede tamamlanabilir. Kısacası, sentetik polimerler iyonik sıvılarla çözelti karıştırma, öğütme ve eriyik karıştırma gibi çeşitli yöntemlerle birleştirilebilir.

Çözelti karıştırma yöntemi her iki polimer türü için uygunken, öğütme ve eriyik karıştırma özellikle termoplastik polimerler için tercih edilmektedir. Hazırlama sıcaklığı ve işlem süresi yönetime göre değişmekte olup, her bir yaklaşımın seçiminde polimerin türü ve hedeflenen kompozit özellikleri belirleyici olmaktadır (Shamsuri vd. 2023).

İyonik sıvı esaslı polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan güncel yöntemler; yerinde polimerizasyon, eriyik karıştırma, çözelti harmanlama ve polimer matrisine dolgu maddesi olarak iyonik sıvı eklenmesi gibi çeşitli stratejileri içermektedir (Mishra vd. 2022). Bu yöntemler, iyonik sıvı/polimer kompozitlerinin fonksiyonel özelliklerini geliştirmede önemli yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Termoplastik, termoset ve elastomer kompozitlerin iyonik sıvılarla birleştirilmesinde kullanılan yöntemler, her bir polimer türünün işlenme özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Termoplastik kompozitlerde en yaygın yaklaşım, eriyik karıştırma yöntemidir. Bu yöntemde termoplastik polimer önce eritilmekte, ardından dolgu maddesi ile iyonik sıvı (veya iyonik sıvı ile işlem görmüş dolgu maddesi) eriyik faza eklenmektedir. Ekstrüzyonla sağlanan homojenleştirme, dolgu ve iyonik sıvının polimer matrisi boyunca eşit dağılımını mümkün kılmakta ve elde edilen kompozit daha sonra enjeksiyon veya sıkıştırma kalıplama gibi tekniklerle şekillendirilmektedir. Termoset kompozitlerde ise karıştırma yöntemi tercih edilir. Termoset reçine, dolgu maddesi ve iyonik sıvı kontrollü bir şekilde karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanır; daha sonra karışım kalıba dökülerek kütleme işlemine tabi tutulur. Bu süreç, reçinenin çapraz bağlanmasını ve kompozit malzemenin mekanik olarak güçlenmesini sağlar. Elastomer kompozitlerde uygulanan birleştirme yöntemi, elastomerin karıştırma değeriminde mekanik olarak işlenmesiyle başlar. Ardından dolgu maddesi ve iyonik sıvı, hafifçe ısıtılmış elastomer matrise eklenir ve homojen dağılım sağlanıncaya kadar harmanlanır. Son aşamada yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilen kütleme işlemi, elastomerin elastik özelliklerini geri kazandırırken kompozit yapının kararlılığını artırır. Özetle, polimer türüne bağlı olarak seçilen bu yöntemler, iyonik sıvı ve dolgu maddesinin ilgili polimer matrisinde etkin dağılımını sağlayarak farklı uygulamalara uygun, geliştirilmiş özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimine olanak tanımaktadır.

İyonik sıvı esaslı nanokompozitlerin çevre dostu ve uygulanabilir bir üretim yöntemi, 1-bütill-3-metilimidazolyum bromür (BMIM-Br) iyonik sıvısının polianilin (PANI) matrisine dahil edildiği yerinde polimerizasyon tekniğidir. Bu yöntemde katyonik yüzey aktif madde kullanılarak sentezlenen nanokompozit, 3 MHz frekansta ve 120 °C sıcaklıkta yüksek iletkenliğini koruyabilmektedir (Shaviu vd. 2013). Yerinde polimerizasyonun bir diğer

örneği, indirgenmiş grafen oksit (RGO) esaslı poli iyonik sıvı/poli(p-fenilen benzoisoksazol) (RGO@PIL/POB) hibrit nanokompozittir. Bu çalışmada 1-vinil-3-aminopropilimidazol tetrafloroborat iyonik sıvısı, serbest radikal mekanizmasıyla amin grubu ile fonksiyonelleştirilmiş poli(1-vinil-3-aminopropilimidazolyum) (PIL-NH₂)'ye dönüştürülmüş ve oluşan PIL, RGO yüzeyine π - π konjugasyonu yoluyla bağlanmıştır. Daha sonra bu hibrit, fonksiyonel dolgu ile polimer matrisi arasında oluşan **amid bağları** sayesinde **yerinde polimerizasyon** yöntemiyle RGO@PIL/PBO nanokompozitlerine dönüştürülmüş ve termoformlama işlemiyle filmler hazırlanmıştır. Elde edilen kompozit, geliştirilmiş dielektrik özellikler (35.51 dielektrik sabitine, **0.09 dielektrik kaybına**), yüksek termal kararlılık (500 °C altına kadar) ve artırılmış enerji yoğunluğu gibi üstün nitelikler sergilemektedir (Yuan vd. 2022).

İyonik sıvılar farklı katyon ve anyon bileşimlerinden oluştuğundan, uygun iyon çiftinin seçimi kompozitin nihai performansı üzerinde kritik bir rol oynar. Polimer türünün yanı sıra:

- Katyon ve anyon boyutu,
- Alkil zincir uzunluğu,
- Anyonun yapısal kararlılığı,
- İyonlar arası etkileşim tipi,

gibi parametreler iyonik sıvı/polimer kompozitinin termal, mekanik ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin amonyum, imidazolyum ve fosfonyum katyonları içeren iyonik sıvılar, yüksek difüzyon hızları sayesinde geleneksel polivinil klorür (PVC) plastikleştiricilerine etkili bir alternatif oluşturabilmektedir. Ayrıca, anyon seçiminde termal kararlılık, önemli bir belirleyici olup bilinen kararlılık sırası şu şekildedir:



Bu sıralama, yüksek sıcaklıklı uygulamalarda uygun anyonun belirlenmesine yol gösterir. Alkil zincir uzunluğu da iyonik sıvının viskozite, polarite ve polimerle etkileşim kapasitesini belirleyen önemli bir faktördür. Poli(metilmetakrilat), PMMA, matrisi içinde BMIM⁺, N-trimetil-N-bütill amonyum, N-trimetil-N-heksil amonyum katyonlarını ve karşı anyon olarak Br⁻, PF₆⁻ ve TFSI⁻ içeren iyonik sıvı yapısal etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir (Fedosse Zornio vd. 2019).

İyonik sıvı tabanlı polimerlerin temel sınırlamalarından biri, ortam sıcaklıklarında iyonik iletkenliğin düşmesidir. Literatürde bu soruna yönelik geliştirilen yaklaşımlardan biri, iyon hareketliliğini koruyabilen düşük cam

geçiş sıcaklığına (T_g) sahip poliiyonik sıvıların tasarlanmasıdır. Poliiyonik sıvı sistemlerinde **Coulomb** ve elastik kuvvetlerin iyon taşınımına katkısını ortaya koymuş ve iyon boyutunun difüzyon mekanizmasını nasıl etkilediğini ayrıntılı biçimde incelemiştir (Stacy vd. 2018).

3. İyonik Sıvı Esaslı Polimer Kompozitlerin Uygulamaları

İyonik sıvılar, sahip oldukları özgün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde gelişmiş, akıllı ve çok işlevli malzemelerin tasarımında dikkat çekici bir alternatif haline gelmiştir. Uygun katyon-anyon çiftinin ve uygun polimer matrisinin seçimi, belirli uygulama gereksinimlerine yönelik üstün niteliklerde yeni iyonik malzemelerin geliştirilmesini olanaklı kılmaktadır. İyonik sıvı/polimer kompozitleri; jel, film, membran ve lif gibi çeşitli morfolojilerde üretilmekte olup sensör teknolojileri, aktüatörler, piller, yakıt hücreleri, çevresel izleme ve biyomedikal uygulamalar dahil geniş bir kullanım alanına sahiptir. Farklı iyonik sıvı türlerinin polimerlerle birleştirilmesi, bu alanlarda hedeflenen fonksiyonların optimize edilmesine yönelik önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Correia vd. 2020).

Akıllı ve çok işlevli malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayan başlıca iyonik sıvı işlevsellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- *Duyarlı ve hassas malzemeler:* Işığa duyarlı (Foto-duyarlı), pH'a duyarlı, sıcaklığa duyarlı, gaz algılayan, iyonlara duyarlı, neme duyarlı, manyetik olarak duyarlı, elektrokromik ve kutuplanabilirliği değiştirilebilen iyonik sıvılar.
- *Optik malzemeler:* Lüminesan, doğrusal olmayan optik özellikte, fotonıge dayalı iyonik sıvılar ve iyonik sıvı esaslı yapısal renk.
- *Enerjik malzemeler:* Enerjik iyonik sıvılar ve hidrojen depolama.

İyonik sıvıların işlevsellikleri, gelecek nesil kompozit yapısal pillerin performansını artırmada önemli bir potansiyel sunmaktadır. İyonik sıvı esaslı kompozitler veya nanokompozitler, enerji yoğunluğunu geliştirmek, dielektrik özellikleri ayarlamak ve sistemin termal kararlılık profilini optimize etmek amacıyla pil mimarisine entegre edilebilmektedir. Bu bağlamda, iyonik sıvıların hem elektrolit bileşeni hem de polimer matrise gömülü fonksiyonel katkı maddesi olarak kullanımı, enerji depolama sistemlerinin güvenliğini, dayanıklılığını ve verimliliğini geliştiren yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

İyonik sıvıların polimer elektrolit sistemlerine entegrasyonuna yönelik önemli bir örnek, dietil metilamonyum triflorometansülfonat, [dema][TfO], iyonik sıvısının polibenzimidazol (PBI) ile birleştirilmesidir. İyonik sıvı/PBI

tabanlı bu kompozit membran, 100 °C'nin üzerinde çalışma sıcaklıklarına sahip yakıt hücreleri için geliştirilmiştir. Üretilen membran:

- Yüksek termal kararlılık,
- 250 °C'de 108.9 mS/cm seviyesinde olağanüstü proton iletkenliği,
- Geniş sıcaklık aralığında (100-250 °C) iletkenlik kararlılığı

gibi üstün özellikler göstermektedir. Bu bulgular, iyonik sıvı katkısının yüksek sıcaklıkta çalışan elektrokimyasal cihazlar için kritik performans artışları sağladığını ortaya koymaktadır (Niu vd. 2021).

Enerji depolama alanındaki bir diğer önemli çalışma iyonik sıvı, [EMIm] [NTf₂], fonksiyonelleştirilmiş MXene tabanlı kompozit sistemdir. Polipirol (PPy) ve iyonik sıvı esaslı mikroemülsiyon parçacıklarıyla fonksiyonelleştirilen Ti₃C₂-MXene tabanlı katmanlı yapı, süperkapasitör elektrotu olarak yüksek performans göstermektedir. Elde edilen filmin özellikleri şu şekildedir:

- 4-50 °C çalışma aralığında yüksek özgül kapasitans,
- Hızlı yükleme/boşaltma kapasitesi,
- Üstün döngü kararlılığı,

Ayrıca bu malzemeye dayalı simetrik süperkapasitör cihazı, oda sıcaklığında 31.2 Wh/kg enerji yoğunluğu ve 1030.4 W/kg güç yoğunluğu değerlerine ulaşarak literatürdeki birçok MXene tabanlı sistemden daha üstün bir performans sergilemiştir (Fan vd. 2022).

İyonik sıvı esaslı iyonik elektroaktif polimerlerin (iyonik sıvı-iEAP) geliştirilmesi, biyolojik ve elektronik sistemlerde ileri düzey fonksiyonellik gerektiren uygulamalara yönelik dikkate değer bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmaktadır. iEAP malzemeleri, aktif katman içerisinde bulunan katyon ve anyonların kontrollü hareketi aracılığıyla hem algılama hem de aktüatör işlevlerini yerine getirebilen akıllı malzeme sınıfını temsil etmektedir. Bu malzemeler, düşük voltajlı uyarımlar altında şekil değiştirebilmekte; ayrıca iyonların yeniden dağılımı sonucu mekanik deformasyona maruz kaldıklarında elektriksel sinyaller üretebilmektedir. Literatürdeki çok sayıda çalışma, bu malzemelerin deformasyon mekanizmalarının aydınlatılmasına ve aktüasyon, algılama ile enerji hasadı gibi işlevsel uygulamalardaki potansiyellerinin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Geleneksel su bazlı iEAP sistemleriyle karşılaştırıldığında, uçucu olmayan iyonik sıvı-iEAP'ler daha geniş bir elektrokimyasal pencereye ve daha kararlı bir aktüasyon performansına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde iyonik sıvı-iEAP'ler, özellikle kendini algılama (self-sensing) yeteneğinin geliştirilmesi bağlamında,

biyolojik aktüatörler ve sensör teknolojileri için önemli bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Çeşitli elektriksel uyarım koşulları altında iyonik sıvı-iEAP'lerin tepki hızının ve bükülme geriniminin analiz edilmesi, yüksek iyonik iletkenliğe sahip elektrolitlerin ve yüksek elektronik iletkenliğe sahip elektrotların hızlı ve yüksek genlikli deformasyon elde edilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, 3D baskı gibi ileri üretim teknolojilerinin kullanılmaya başlanması, iyonik sıvı-iEAP sistemlerinin işlevselliğini artırmaya yönelik yeni ve umut vadeden bir araştırma eğilimi olarak dikkat çekmektedir (Dong vd. 2021; Ma vd. 2024).

Son yıllarda, biyolojik olarak parçalanabilir polimer kompozitlerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini geliştirmek amacıyla çok çeşitli malzemelerin kullanımına yönelik ilgi artmıştır (Delamarche vd. 2022; Zhao vd. 2024). Bu doğrultuda, iyonik sıvıların dönüştürücü ajan olarak değerlendirilmesi; geniş hacimli katyonlar ve zayıf koordinasyon yeteneğine sahip anyonlardan oluşan özgün kimyasal yapıları nedeniyle önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu tip iyonik bileşenler, organik ve inorganik dolgu maddeleri ile biyobozunur polimer zincirleri arasında çeşitli etkileşim mekanizmaları oluşturabilmektedir. Ortaya çıkan moleküller arası etkileşimler, kompozit sistemlerin yapısal özelliklerini değiştirebilmekte ve özellikle dolgu maddesi ile polimer matrisi arasındaki arayüz bağlanmasını belirgin biçimde güçlendirebilmektedir (Shamsuri vd. 2021). Biyobozunur polimer kompozitlerin üretiminde yararlanılan iyonik sıvılar genellikle imidazolyum ve fosfonyum türevi katyonların çeşitli karşı anyonlarla kombinasyonundan oluşmaktadır. Alkilimidazolyum esaslı iyonik sıvılar, organik dolgu maddeleri ile sentetik biyobozunur polimerlerin {polilaktik asit (PLA), polibütilen süksinat (PBS) ve polikaprolakton (PCL)} birlikte işlendiği kompozitlerde çözücü, plastikleştirici, düzenleyici ve uyumlulaştırıcı olarak geniş biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık, alkilfosfonyum temelli iyonik sıvılar özellikle inorganik dolgu maddeleri içeren sentetik biyobozunur kompozitlerde düzenleyici ve sinerjist ajan olarak tercih edilmektedir. Hem alkilimidazolyum hem de alkilfosfonyum yapısındaki iyonik sıvıların kullanımı, biyobozunur polimer kompozitlerin mekanik, termal ve kimyasal performansının kayda değer ölçüde geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu iyonik sıvılar, dolgu maddeleri ile biyobozunur polimer matrisi arasında çeşitli moleküller arası etkileşimler oluşturarak kompozit yapının bütünlüğünü ve uyumunu artırabilmektedir. Alkilimidazolyum içeren iyonik sıvılar, yüksek uzama kabiliyeti, iyi termal kararlılık ve yüksek uyum sergileyen kompozitlerin elde edilmesine katkıda bulunurken; alkilfosfonyum türleri, yüksek çekme dayanımı, güçlü termal stabilite ve geliştirilmiş etkileşim özellikleri sağlayan biyobozunur kompozitlerin üretilmesine imkân tanımaktadır.

Sonuç olarak, iyonik sıvıların polimerler ve polimer kompozitlerle bir arada kullanımı, gelişmiş ve çok işlevli malzemelerin tasarımında önemli bir fırsat sunmaktadır. Geniş polimer uyumluluğu, moleküler düzeyde etkileşim yeteneği ve yapısal olarak özelleştirilebilir olmaları, iyonik sıvıları bu alanda etkili katkı maddeleri hâline getirmektedir. Bununla birlikte, performansın en iyi düzeye çıkarılabilmesi; uygun katyon-anyon kombinasyonlarının seçilmesi, polimer yapısının doğru belirlenmesi ve hazırlama yöntemlerinin optimize edilmesine bağlıdır. Artan araştırmalar, iyi tasarlanmış iyonik sıvı/polimer sistemlerinin yüksek performanslı, uyarlanabilir ve akıllı malzeme teknolojilerinde geleceğin yenilikçi çözümlerine yön vereceğini açıkça göstermektedir.

Kaynakça

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons.
- Alreshidi, M. A., Yadav, K. K., Gunasekaran, S., Gacem, A., Sambandam, P., Subbiah, G., ... & Annadurai, S. (2025). A review on the evolution of ionic liquids: Sustainable synthesis, applications, and future prospects. *Materials Today Sustainability*, 31, 101160.
- Coimbra, P., Dias, A. M., & de Sousa, H. C. (2025). Encapsulated ionic liquids: A comprehensive review of production methods and potential applications. *Chemical Engineering Journal*, 504, 159039.
- Correia, D. M., Costa, C. M., Lizundia, E., Sabater i Serra, R., Gomez-Tejedor, J. A., Biosca, L. T., ... & Lanceros-Mendez, S. (2019). Influence of cation and anion type on the formation of the electroactive β -phase and thermal and dynamic mechanical properties of poly (vinylidene fluoride)/ionic liquids blends. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(45), 27917-27926.
- Correia, D. M., Fernandes, L. C., Martins, P. M., García-Astrain, C., Costa, C. M., Reguera, J., & Lanceros-Méndez, S. (2020). Ionic liquid–polymer composites: A new platform for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*, 30(24), 1909736.
- Delamarche, E., Mattlet, A., Livi, S., Gérard, J. F., Bayard, R., & Massardier, V. (2022). Impact of Ionic Liquids on the (bio) degradability of Poly (butylene succinate)/Poly (lactic acid) blends. *Frontiers in Materials*, 9, 975438.
- Dong, Y., Yeung, K. W., Tang, C. Y., Law, W. C., Tsui, G. C. P., & Xie, X. (2021). Development of ionic liquid-based electroactive polymer composites using nanotechnology. *Nanotechnology Reviews*, 10(1), 99-116.
- Fan, Q., Zhao, R., Yi, M., Qi, P., Chai, C., Ying, H., & Hao, J. (2022). Ti-3C2-MXene composite films functionalized with polypyrrole and ionic liquid-based microemulsion particles for supercapacitor applications. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131107.
- Fedosze Zornio, C., Livi, S., Duchet-Rumeau, J., & Gerard, J. F. (2019). Ionic liquid-nanostructured poly (methyl methacrylate). *Nanomaterials*, 9(10), 1376.
- Fernandes, L. C., Correia, D. M., Costa, C. M., & Lanceros-Mendez, S. (2025). Recent Advances in Ionic Liquid-Based Hybrid Materials for Electroactive Soft Actuator Applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 310(2), 2400279.
- German, R. M. (2016). *Particulate composites* (pp. 198-200). New York: Springer.

- Greaves, T. L., & Drummond, C. J. (2015). Protic ionic liquids: evolving structure–property relationships and expanding applications. *Chemical reviews*, 115(20), 11379-11448.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262, 113640.
- Huang, H. H., Jia, J., Ren, L., Wang, S., Yue, T., Yan, B., & Chu, Y. H. (2023). A zwitterionic solution for smart ionic liquids to evade cytotoxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 131430.
- Kianfar, E., & Mafi, S. (2020). Ionic liquids: properties, application, and synthesis. *Fine Chem Eng*, 2, 22-31.
- Koutsoukos, S., Becker, J., Dobre, A., Fan, Z., Othman, F., Philippi, F., ... & Welton, T. (2022). Synthesis of aprotic ionic liquids. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1), 49.
- Ma, T., Zhang, Y., Ruan, K., Guo, H., He, M., Shi, X., ... & Gu, J. (2024). Advances in 3D printing for polymer composites: a review. *InfoMat*, 6(6), e12568.
- Mahmood, H., Moniruzzaman, M., Yusup, S., & Welton, T. (2017). Ionic liquids assisted processing of renewable resources for the fabrication of biodegradable composite materials. *Green Chemistry*, 19(9), 2051-2075.
- Manu, T., Nazmi, A. R., Shahri, B., Emerson, N., & Huber, T. (2022). Biocomposites: A review of materials and perception. *Materials Today Communications*, 31, 103308.
- Mishra, K., Devi, N., Siwal, S. S., Zhang, Q., Alsanie, W. F., Scarpa, F., & Thakur, V. K. (2022). Ionic liquid-based polymer nanocomposites for sensors, energy, biomedicine, and environmental applications: roadmap to the future. *Advanced Science*, 9(26), 2202187.
- Mussatto, A., Ahad, I. U., Mousavian, R. T., Delaure, Y., & Brabazon, D. (2021). Advanced production routes for metal matrix composites. *Engineering reports*, 3(5), e12330.
- Niu, B., Luo, S., Lu, C., Yi, W., Liang, J., Guo, S., ... & Xu, B. (2021). Polybenzimidazole and ionic liquid composite membranes for high temperature polymer electrolyte fuel cells. *Solid State Ionics*, 361, 115569.
- Platnieks, O., Sereda, A., Gaidukovs, S., Thakur, V. K., Barkane, A., Gaidukova, G., ... & Fridrihsone, V. (2021). Adding value to poly (butylene succinate) and nanofibrillated cellulose-based sustainable nanocomposites by applying masterbatch process. *Industrial Crops and Products*, 169, 113669.
- Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03), 2-6.

- Shafiu, S., Ünal, B., & Baykal, A. (2013). The ionic liquid based synthesis of polyaniline–MnFe₂O₄–CTAB nanocomposite: electrical properties. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 23(6), 1335-1340.
- Shamsuri, A. A., Abdan, K., Yusoff, M. Z. M., & Jamil, S. N. A. M. (2024). Impact of ionic liquids on the thermal properties of polymer composites. *e-Polymers*, 24(1), 20240020.
- Shamsuri, A. A., Md. Jamil, S. N. A., & Abdan, K. (2021). A brief review on the influence of ionic liquids on the mechanical, thermal, and chemical properties of biodegradable polymer composites. *Polymers*, 13(16), 2597.
- Shamsuri, A. A., Md. Jamil, S. N. A., Yusoff, M. Z. M., & Abdan, K. (2023a). Methods and mechanical properties of polymer hybrid composites and hybrid polymer composites: Influence of ionic liquid addition. *Applied Mechanics*, 5(1), 1-19.
- Shamsuri, A. A., Yusoff, M. Z. M., Abdan, K., & Jamil, S. N. A. M. (2023b). Flammability properties of polymers and polymer composites combined with ionic liquids. *e-Polymers*, 23(1), 20230060.
- Stacy, E. W., Gainaru, C. P., Gobet, M., Wojnarowska, Z., Bocharova, V., Greenbaum, S. G., & Sokolov, A. P. (2018). Fundamental limitations of ionic conductivity in polymerized ionic liquids. *Macromolecules*, 51(21), 8637-8645.
- Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., ... & Bai, J. (2023). A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 138, 1-16.
- Uppal, N., Pappu, A., Gowri, V. K. S., & Thakur, V. K. (2022). Cellulosic fibres-based epoxy composites: From bioresources to a circular economy. *Industrial Crops and Products*, 182, 114895.
- Usman, M., Wirzal, M. D. H., Hizam, S. M., Afridi, J., Zaidi, S. T. H., & Marriam, F. (2025). A comprehensive review of ionic liquids based electrolytes for efficient hydrogen production. *Journal of Molecular Liquids*, 417, 126537.
- Vigneshwaran, S., Sundarakannan, R., John, K. M., Johnson, R. D. J., Prasath, K. A., Ajith, S., ... & Uthayakumar, M. (2020). Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124109.
- Wei, L., Wang, L., Cui, Z., Liu, Y., & Du, A. (2023). Multifunctional applications of ionic liquids in polymer materials: a brief review. *Molecules*, 28(9), 3836.
- Welton, T. (2018). Ionic liquids: a brief history. *Biophysical reviews*, 10(3), 691-706.
- Yuan, Y., Wang, X., Liu, X., Qian, J., Zuo, P., & Zhuang, Q. (2022). Non-covalently modified graphene@ poly (ionic liquid) nanocomposite with hi-

gh-temperature resistance and enhanced dielectric properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 154, 106800.

- Zhao, T., Kou, W., Zhang, Y., Wu, W., Li, W., & Wang, J. (2023). Laminar composite solid electrolyte with succinonitrile-penetrating metal-organic framework (MOF) for stable anode interface in solid-state lithium metal battery. *Journal of Power Sources*, 554, 232349.
- Zhao, Y., Guo, L., Fang, B., & Liu, B. (2024). Recent Advances in the Research of Biobased Polymers and the Catalytic Application of Ionic Liquids in Their Synthesis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(46), 19955-19971.
- Zhou, T., Gui, C., Sun, L., Hu, Y., Lyu, H., Wang, Z., ... & Yu, G. (2023). Energy applications of ionic liquids: recent developments and future prospects. *Chemical Reviews*, 123(21), 12170-12253.

Polimer/Faz Değişim Malzemesi (FDM) Hibrit Sistemleri: Termal Enerji Depolamada Yenilikçi Yaklaşımlar

Recep Taş¹

Derya Kahraman Doğuşcu²

Nilay Akkuş Taş³

Özet

Polimer/faz değişim malzemesi (FDM) hibrit sistemleri, termal enerji depolama teknolojilerinin performansını artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi kompozit yapılardır. FDM'ler yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde düşük sıcaklık farklarında büyük miktarda enerji depolayabilse de, düşük ısıl iletkenlik, faz sızıntısı, döngüsel kararsızlık ve hacim değişimi gibi sınırlamalar barındırmaktadır. Polimer matrisler, FDM'in yapısal bütünlüğünü koruyarak erime sırasında ortaya çıkan sızıntı sorununu ortadan kaldırmakta ve hibrit sistemin mekanik dayanımını artırmaktadır. Ayrıca nanodoldurucuların entegrasyonu, ısıl iletkenliği artırarak ısı transfer verimini iyileştirmekte ve hibrit malzemelerin uygulama potansiyelini genişletmektedir.

Bu çalışmada polimer/FDM hibrit sistemlerinin temel tasarım stratejileri; mikrokapsülleme, kompozit üretim teknikleri, gözenekli matris impregnasyonu ve şekil stabil FDM oluşum mekanizmaları bağlamında ele alınmıştır. Hibrit sistemlerin termal performansı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), termal iletkenlik ölçümleri, ısıl döngü testleri ve termal görüntüleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uygun polimer seçimi ve nanoadditif optimizasyonu ile yüksek enerji

- 1 Doç.Dr., Bartın Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoteknoloji Bölümü, rtas@bartin.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3743-7770
- 2 Doç.Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, derya.kahraman@gop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6181-5778
- 3 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü/Merkezi Araştırma Uygulama Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (AUMAULAB), nilayakkustas@amasya.edu.tr, 0009-0004-8644-6659

depolama kapasitesi, iyi ısı kararlılık ve uzun dönem döngüsel dayanım elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Polimer/FDM hibritleri; binalarda pasif ısı yönetim, elektronik soğutma, lityum-iyon batarya termal kontrolü, güneş enerjisi sistemleri, akıllı tekstiller ve soğuk zincir taşımacılığı gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu bağlamda hibrit sistemler, enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır.

1. Giriş

Termal enerji depolama (TED) teknolojileri, sürdürülebilir enerji sistemlerinin verimliliğinin artırılmasında ve enerji arz-talep dengesizliğinin giderilmesinde temel bir rol oynamaktadır. Güneş, jeotermal veya atık ısı gibi kesintili enerji kaynaklarının verimli şekilde kullanılmasını sağlayan TED sistemleri arasında, faz değişim malzemeleri (FDM) son yıllarda dikkat çekici şekilde öne çıkmıştır. FDM'ler, erime–donma süreçlerinde yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle, birim hacim veya kütle başına yüksek miktarda enerjiyi depolayabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde bina yalıtımı, elektronik soğutma, batarya termal yönetimi, akıllı tekstiller ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi geniş bir uygulama alanı bulmaktadır (Brechtel et al., 2024; Zalba, Marín, Cabeza, & Mehling, 2003).

Bununla birlikte geleneksel FDM'lerin kullanımı çeşitli sınırlayıcı faktörlerle karşı karşıyadır. Özellikle parafin temelli organik FDM'lerde görülen düşük ısı iletkenlik, faz sızıntısı, hacim değişimi, ısıtma-soğutma döngülerinde kararlılık kaybı ve yanıcılık gibi problemler teknolojik ölçeklendirmeyi zorlaştırmaktadır. İnorganik FDM'ler (tuz hidratlar vb.) yüksek ısı iletkenliğe sahip olsa da aşırı soğuma, faz ayrışması ve korozyon gibi ciddi sorunlar gözlenmektedir. Bu teknik engellerin giderilmesi için araştırmalar polimer/FDM hibrit sistemlerine yönelmiştir (A. B. Liu, Xie, Wu, & Wang, 2022).

Polimer matrisler, FDM'leri fiziksel veya kimyasal olarak bünyelerinde tutarak sızıntı problemini engeller, şekil stabilitesi sağlar, döngüsel dayanımı artırır ve yapıların mekanik dayanımını iyileştirir. Ayrıca nano doldurucularla modifiye edilmiş polimer matrisler, FDM sistemlerinin ısı iletkenliğini anlamlı düzeyde artırabilmektedir (Nagar & Sreenivasa, 2024). Bu nedenle polimer/FDM hibritleri, ısı depolamada yeni nesil fonksiyonel kompozit malzemelerin geliştirilmesinde oldukça kritik bir konuma sahiptir. Literatürde özellikle grafen, karbon nanotüp (CNT), metal oksit nanoparçacıklar ve biyopolimer sistemler ile desteklenen FDM kompozitlerinin enerji depolama performansında kayda değer iyileşmeler rapor edilmektedir.

Ayrıca güncel çalışmalar, hibrit sistemlerin sadece termal depolama kapasitesini artırmakla kalmayıp akıllı davranışlar (ör. kendini iyileştirme, sıcaklık duyarlı renk değişimi, ısı akışı kontrolü) gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yenilikçi yaklaşımlar, polimer/FDM hibritlerini geleceğin binalarında pasif soğutma, elektroniklerde hızlı termal yönetim, batarya güvenliği ve akıllı ambalajlama gibi stratejik uygulamalarda kullanılabilir hâle getirmektedir.

Sonuç olarak, polimer/FDM hibrit sistemleri geleneksel FDM'lerin teknik sınırlamalarına çok yönlü çözümler sunmakta ve enerji depolama alanında yüksek performanslı, güvenilir ve sürdürülebilir malzeme tasarımlarının geliştirilmesi için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu bölümde, polimer matrisli FDM hibritlerinin temel kavramları, üretim yöntemleri, termal performansları ve geleceğe yönelik yenilikçi yaklaşımları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

2. Faz Değişim Malzemeleri (FDM): Temel Kavramlar

FDM, son yıllarda enerji verimliliği ve sürdürülebilir enerji yönetimi alanlarında giderek artan bir ilgiyle karşılanmaktadır. FDM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değişimi gerçekleştirerek, ısı enerjisiyi gizli ısı olarak depolayabilen ve gerektiğinde serbest bırakabilen fonksiyonel malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde, enerji depolama sistemlerinde, binalarda, elektronik cihazlarda, tekstil ürünlerinde ve daha birçok alanda yenilikçi uygulamalara olanak sağlamaktadırlar (Kale et al., 2025). FDM'lerin temel kavramlarının anlaşılması, bu malzemelerin potansiyelinin ortaya konulması ve uygulama alanlarının genişletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

FDM'leri, kimyasal bileşimlerine göre üç ana grupta incelenmektedir: organik, inorganik ve ötektik FDM'ler. Organik FDM'ler, özellikle parafinler ve yağ asitleri gibi maddeleri içerirken, inorganik FDM'ler ise genellikle tuz hidratları ve metal alaşımlarını kapsamaktadır. Ötektik FDM'ler ise iki veya daha fazla bileşenin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen ve tek bir sıcaklıkta faz değişimi gösteren malzemelerdir (M. S. Mert, Sert, & Mert, 2018). Organik FDM'ler, katı-sıvı faz değişimi sırasında küçük hacim değişimi göstermeleri ve yüksek gizli ısı depolama kapasitelerine sahip olmaları nedeniyle diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir (Feldman, Shapiro, & Banu, 1986). Bununla birlikte, inorganik FDM'ler genellikle daha yüksek ısıl iletkenlik ve daha geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilme avantajına sahiptir (Cárdenas & León, 2013).

FDM'lerin enerji depolama sistemlerindeki temel işlevi, faz değişimi sırasında ısıyı sabit sıcaklıkta depolayabilmeleridir. Bu süreçte, malzeme

erirken çevresinden ısı alır ve bu ısıyı gizli ısı olarak bünyesinde tutar. Katılma sırasında ise bu ısıyı tekrar ortama bırakır. Bu özellik, özellikle güneş enerjisi sistemleri, ısıtma-soğutma uygulamaları ve elektronik cihazların termal yönetimi gibi alanlarda enerji talebinin ve arzının zamansal olarak dengelenmesini sağlar (Kerroumi, 2017). Örneğin, güneş enerjisiyle çalışan bir su ısıtıcısında, gündüz depolanan ısı gece kullanıma sunulabilir (Oudaoui & Faraji, 2022). Bu sayede, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki zaman farkı minimize edilir ve sistem verimliliği artırılır (Zohra, Amine, & Alhamany, 2019).

FDM'lerin temel termal özellikleri arasında gizli ısı kapasitesi, özgül ısı, erime ve donma sıcaklıkları ile ısı iletkenlik yer almaktadır. Gizli ısı kapasitesi, malzemenin faz değişimi sırasında depolayabileceği enerji miktarını belirlerken, ısı iletkenlik ise bu enerjinin ne kadar hızlı transfer edilebileceğini gösterir (Kale et al., 2025). Ancak, FDM'lerin pratik uygulamadaki en büyük kısıtlarından biri düşük ısı iletkenlikleridir. Bu durum, enerji depolama ve boşaltma süreçlerinde ısı transferinin yavaşlamasına neden olur (N. Zhang et al., 2018). Bu sorunun üstesinden gelmek için, FDM'lere yüksek ısı iletkenliğe sahip katkı maddeleri eklenmekte veya kapsülleme teknikleri kullanılmaktadır (Lin, Jia, Alva, & Fang, 2018). Örneğin, karbon bazlı nanoparçacıklar veya metal oksit nanoparçacıklar eklenerek ısı iletkenlikte önemli artışlar sağlanabilmektedir (Temel & Çiftçi, 2018). Temel ve arkadaşlarının çalışmasında, %5 oranında grafen nanoparçacık (GNP) katılan bir organik FDM kompozitinin ısı iletkenliğinde %154,9 oranında iyileşme elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, ZnO nanoparçacıklarının gizli ısı kapasitesini artırıcı etkisi olduğu da gözlemlenmiştir (Temel & Çiftçi, 2018).

FDM'lerin bir diğer önemli özelliği ise uzun dönemli termal ve kimyasal kararlılıklarıdır. Özellikle enerji depolama uygulamalarında, malzemenin tekrar tekrar faz değişimi yaparken özelliklerini kaybetmemesi gerekmektedir. Bu amaçla, mikro veya makro kapsülleme yöntemleriyle FDM'lerin yapısal bütünlükleri korunmakta ve sızdırma problemleri önlenmektedir (H. H. Mert, Mert, & Mert, 2020). Mert ve arkadaşlarının çalışmasında, n-hekzadekan/modifiye montmorillonit kompozit FDM'lerin faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle hazırlanarak, düşük sıcaklıktaki ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılabilecek yüksek termal kararlılığa sahip mikro kapsüller elde edildiği belirtilmiştir (H. H. Mert et al., 2020). Benzer şekilde, n-oktadekan bazlı FDM'lerin modifiye montmorillonit kil ile mikro kapsüllemesiyle, düşük sıcaklık aralığında (20-35°C) kullanılabilecek, yüksek termal enerji depolama kapasitesine ve kararlılığa sahip malzemeler geliştirilmiştir (H. H. Mert & Bayram, 2020).

FDM'lerin temel kavramlarının anlaşılması, bu malzemelerin enerji depolama ve termal yönetim uygulamalarındaki potansiyelinin ortaya konulması açısından kritik öneme sahiptir. FDM'lerin kimyasal yapısı, termal özellikleri, kapsülleme teknikleri, katkı maddeleri ve uygulama alanları üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin daha verimli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için yol göstermektedir. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, FDM'lerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayacaktır.

2.1. Polimer Matrislerin Temel Özellikleri

Polimer matrisler, günümüzün ileri malzeme teknolojilerinde çok çeşitli uygulama alanları bulan, yapısal ve fonksiyonel özellikleriyle öne çıkan temel malzeme sınıflarından biridir. Polimerlerin temel özellikleri, onları hem mühendislik hem de enerji uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Özellikle termoplastikler ve termosetler gibi iki ana polimer grubu, farklı yapısal düzenleri ve çapraz bağlanma dereceleri sayesinde çok çeşitli performans gereksinimlerine cevap verebilmektedir. Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, bu malzemelerin hem geleneksel hem de yenilikçi uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Son yıllarda ise polimerlerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, onların mühendislik uygulamalarındaki başarısını belirleyen en önemli parametrelerdendir. Örneğin, grafen oksit katkılı polipropilen (PP) kompozitler üzerine yapılan bir çalışmada, grafen oksit ilavesinin PP polimerinin çekme dayanımını %42, elastiklik modülünü ise %71 oranında artırdığı, buna karşılık kopma uzaması ve darbe dayanımlarında sırasıyla %341 ve %56 oranında azalma olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, grafen oksit katkısı ile ısı sapma sıcaklığı (HDT) ve Vicat yumuşama sıcaklığında da artış gözlenmiştir. Bu bulgular, polimer matrislerin mekanik ve termal özelliklerinin, katkı maddeleriyle önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermektedir (Yetgin, Karadeniz, & Guleşen, 2017). Bu tür modifikasyonlar, polimerlerin yüksek sıcaklık uygulamalarında veya mekanik yük altında çalışacağı ortamlarda daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Polimer matrislerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilirliği, özellikle FDM'lerin polimerlerle birleştirilmesiyle daha da artmaktadır. Bu tür kompozitler, enerji depolama kapasitesini artırırken, aynı zamanda sistemin mekanik ve kimyasal stabilitesini de iyileştirmektedir. Metal

oksit nanoparçacıklarla güçlendirilmiş polietilen glikol (PEG) bazlı FDM'ler üzerine yapılan bir çalışmada, PEG'in termal iletkenliğinin %27-34 oranında arttığı ve ısı şarj/deşarj sürelerinin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca, bu kompozitlerin faz değişim sıcaklıklarında küçük kaymalar ve termal enerji depolama kapasitesinde %1-5 arasında azalma olduğu, ancak genel olarak iyi bir döngüsel kimyasal stabilite ve TED güvenilirliği sunduğu belirtilmiştir (Ouikhalfan, Hekimoglu, Sari, Gencel, & Tyagi, 2022). Bu bulgular, polimer matrislerin, özellikle nanoparçacık katkılarıyla, termal enerji depolama sistemlerinde verimli ve güvenilir bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Literatürde, polimer matrislerin FDM'lerle birlikte kullanıldığı çeşitli uygulamalar mevcuttur. Örneğin, polimer kapsüller içinde mikroenkapsüle edilen FDM'leri, güneş enerjisiyle ısıtma uygulamalarında yüksek termal kararlılık ve güvenilirlik sunmaktadır. Docosane'in polimetilmetakrilat (PMMA) ile mikroenkapsülasyonu üzerine yapılan bir çalışmada, elde edilen mikroenkapsüle faz değişim malzemesinin (MEFDM) iyi bir kimyasal stabiliteye ve termal döngü dayanımına sahip olduğu, ayrıca 41°C'de erime ve 40,6°C'de kristalleşme sıcaklıklarına sahip olduğu gösterilmiştir. Bu özellikler, MEFDM'lerin güneş enerjisiyle ısıtma gibi termal enerji depolama uygulamalarında potansiyelini ortaya koymaktadır (Alkan, Sari, Karaieklı, & Uzun, 2009).

Polimerlerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilirliği, aynı zamanda enerji dönüşüm verimliliği ve sistem entegrasyonu açısından da önemlidir. Termal enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, enerji arzının sürekliliği ve güvenilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. TED sistemleri üzerine yapılan kapsamlı bir bibliyometrik analizde, son yirmi yılda TED araştırmalarında önemli bir artış olduğu ve ana araştırma temaları arasında FDM'lerin geliştirilmesi, TED sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu ve sistem optimizasyonunun yer aldığı belirtilmiştir. Ayrıca, polimer matrisli FDM'lerin geliştirilmesi ve uygulanması, enerji depolama kapasitesinin artırılması ve sistem güvenilirliğinin sağlanması açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Karadağ, Akçay, & Karakurt, 2024). Bu analizde, TED sistemlerinin sürdürülebilir ve verimli enerji çözümleri sunma potansiyeli vurgulanmıştır.

Polimer matrislerin termal enerji depolama uygulamalarında kullanılabilirliği, aynı zamanda yeni nesil enerji sistemlerinin tasarımında da önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle güneş enerjisiyle çalışan konsantre güneş enerjisi (CSP) santrallerinde, polimer matrisli FDM'leri ve kompozitler, enerji depolama kapasitesini ve sistem esnekliğini artırmaktadır. CSP santrallerinde termal enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu üzerine

yapılan bir çalışmada, TED'nin enerji üretimini %48 oranında artırdığı ve özellikle olumsuz hava koşullarında enerji arzının sürekliliğini sağladığı gösterilmiştir. Bu bulgular, polimer matrisli TED sistemlerinin, yenilenebilir enerji projelerinde güç kalitesini artırmada ve enerji yönetiminde esneklik sağlamada önemli bir araç olduğunu göstermektedir (Al-Failkawi & Abdulrahman, 2025).

Polimer matrislerin termal enerji depolama uygulamalarındaki başarısı, aynı zamanda mikro ve nano ölçekli kapsülleme tekniklerinin geliştirilmesiyle de ilişkilidir. Polimer matrisli FDM'lerin mikro/nanoenkapsülasyonu, FDM'lerinin sızmasını önlerken, aynı zamanda ısı transfer yüzey alanını artırarak sistemin genel verimliliğini yükseltmektedir. Yenilenebilir termal enerji depolamada polimer kapsüllü FDM'ler üzerine yapılan kapsamlı bir incelemede, mikro/nanoenkapsülasyon, gözenekli polimerik yapı ve şekil-stabilizasyon stratejilerinin, FDM'lerin enerji depolama sistemlerinde etkinliğini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu tür sistemlerin güneş termofotovoltaik, atık ısı geri kazanımı, güneş termal elektrik jeneratörleri ve binalarda enerji tasarrufu gibi geniş bir uygulama alanına sahip olduğu vurgulanmıştır (Kumar, Sarkar, & Saha, 2024). Bu bulgular, polimer matrislerin, enerji depolama teknolojilerinde çok yönlü ve yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, polimer matrislerin temel özellikleri, onları hem mühendislik hem de enerji uygulamalarında vazgeçilmez kılmaktadır. Termoplastikler ve termosetler arasındaki yapısal ve fonksiyonel farklılıklar, polimerlerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlamaktadır. Polimerlerin termal, mekanik ve kimyasal dayanımları, bu malzemelerin hem geleneksel hem de yenilikçi uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Özellikle termal enerji depolama sistemlerinde polimer matrislerin kullanımı, enerji verimliliği, sistem güvenilirliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar, polimer matrislerin katkı maddeleriyle ve mikro/nanoenkapsülasyon teknikleriyle geliştirilerek, termal enerji depolama uygulamalarında yüksek performanslı ve çevre dostu çözümler sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

2.2. Polimer/FDM Hibrit Sistemlerinin Tasarımı

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımı, günümüzde enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve çoklu uygulama alanları açısından büyük önem taşımaktadır. Isıl enerji depolama teknolojilerinde FDM'ler, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri ve sabit sıcaklıkta enerji depolama yetenekleri sayesinde öne çıkmaktadır. Ancak, bu malzemelerin doğrudan kullanımı,

düşük ısı iletkenlik, sızdırma riski ve yapısal kararsızlık gibi çeşitli zorluklar içermektedir. Bu nedenle, polimer matrislerle hibritleştirilen FDM sistemleri hem enerji depolama kapasitesini hem de yapısal bütünlüğü artırmak amacıyla multidisipliner bir araştırma alanı olarak ön plana çıkmaktadır. Polimer/FDM hibrit sistemleri, FDM'lerin termal enerji depolama kapasitesini korurken sızıntı, düşük ısı iletkenlik ve zayıf mekanik dayanım gibi sınırlamaları gidermek amacıyla geliştirilen malzeme tasarımlarıdır. Bu sistemlerde FDM, polimer matris içinde fiziksel veya kimyasal yollarla stabilize edilir; böylece şekil stabilitesi, ısı transfer performansı ve döngüsel kararlılık önemli ölçüde iyileştirilir. Hibrit yapıların tasarımında kapsülleme, kompozitleştirme, gözenekli yapı entegrasyonu ve nano-dolgu takviyesi gibi çeşitli stratejiler kullanılmaktadır (H. Zhang, Shi, & Ma, 2021).

2.2.1. Kapsülleme – Mikro/Nano Kapsül FDM Sistemleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin geliştirilmesinde nano ve mikro boyutta kapsülleme teknikleri kullanılmaktadır. FDM'lerin mikrokapsül veya nanokapsül formunda kullanılması, sızıntı problemlerine karşı etkili stratejilerden biridir. Kapsülleme yönteminde FDM, polimer kabuk malzemesi ile çevrelenerek çekirdek-kabuk (core-shell) tipi kompozitler oluşturulur. Özellikle parafin gibi organik FDM'lerin mikro boyutta kapsüllenmesi, sıvı fazda sızdırma riskini ortadan kaldırmakta ve ısı kararlılığı artırmaktadır. Örneğin, n-oktadekan, yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit kili varlığında faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle mikro boyutta kapsüllenmiştir. Hazırlanan mikrokapsüllerin faz değişim sıcaklık aralığı, ısı enerji depolama kapasiteleri ve ısı kararlılıkları, düşük sıcaklıktaki (20-35°C) gizli ısı depolama uygulamalarında kullanılabilir potansiyelini göstermektedir (H. H. Mert & Bayram, 2020). Bu tür kapsülleme teknikleri, polimer/FDM hibrit sistemlerinin çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

2.2.2. Polimer Kompozit FDM Yapıları

Bu yapılar, FDM'in polimer matrisle karıştırılması sonucu elde edilir. Polimer, FDM'i fiziksel olarak hapseder ve kompozit malzeme şeklinde bir şekil-stabil FDM ortaya çıkar. Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımında, polimer matrisler hem mekanik dayanıklılık hem de şekil kararlılığı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin, emülsiyon şablonlama yöntemiyle sentezlenen poli(stiren-ko-divinil benzen) esaslı gözenekli polimerler, modifiye edilmiş kaolinit kil ile kullanılarak n-nonadekan esaslı şekilce kararlı faz değiştiren maddelerin hazırlanmasında destek malzemesi olarak görev almaktadır. Bu tür hibrit sistemlerde, gözenekli yapı sayesinde FDM'in

sızdırmazlığı sağlanırken, polimer matrisin yüzey alanı ve ısıl kararlılığı da artırılmaktadır. Özellikle %1 dolgu içeren gözenekli kompozitlerin en yüksek ısıl kararlılık ve yüzey alanına sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, bu yöntemle üretilen n-nonadekan içeren şekilce kararlı tüm FDM'lerin yüksek ısıl enerji depolama kapasitesine sahip olduğu ve sızdırmazlık özelliği gösterdiği tespit edilmiştir (Bayram, Mert, & Mert, 2023). Bu bulgu, polimer/FDM hibrit sistemlerinin enerji depolama uygulamalarında güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artıran önemli bir tasarım kriteridir.

2.2.3. Gözenekli Polimerlerde FDM Emprenye Teknikleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin tasarımında bir diğer önemli yaklaşım, polimer matrisin gözenekli yapısının optimize edilmesidir. Gözenekli polimerler, FDM'in homojen dağılımını ve hızlı ısı transferini destekler. Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli(stiren-ko-divinil benzen) matrisli kompozitlerde, hiyerarşik gözenekli yapı elde edilerek, FDM'in hem sızdırmazlığı hem de yüksek enerji depolama kapasitesi sağlanmıştır. Bu tür sistemlerde, gözenek morfolojisinin iyileştirilmesi ve dolgu oranının optimize edilmesi, kompozitin ısıl kararlılığını ve yüzey alanını artırmaktadır (Bayram et al., 2023). Böylece, polimer/FDM hibrit sistemleri, enerji depolama uygulamalarında hem mekanik hem de termal açıdan üstün özellikler sunmaktadır.

2.3. Üretim ve Sentez Yöntemleri

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin performansı, kullanılan üretim yöntemleri ve prosese bağlı morfolojik yapı tarafından doğrudan belirlenmektedir. Üretim süreci; FDM'nin polimer matris içinde dağılımını, sızıntı kontrolünü, ısıl iletkenlik profilini, çevrimsel dayanımı ve mekanik özellikleri etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle uygun üretim stratejisinin seçilmesi, uygulamaya bağlı olarak malzemenin hem mikroyapısal hem de makro ölçekli özelliklerinin optimize edilmesi açısından büyük önem taşır (Agyenim, Hewitt, Eames, & Smyth, 2010).

2.3.1. Emülsiyon ve İnterfaz Polimerizasyonu ile Mikro/Nano Kapsül Sentezi

Mikrokapsül ve nanokapsül FDM sistemleri, çekirdek (FDM) ve kabuk (polimer) olmak üzere iki fazlı bir yapıdan oluşur. Kabuk oluşumu genellikle **emülsiyon polimerizasyonu**, **interfaz (ara yüzey) polimerizasyonu** veya **in-situ polimerizasyon** teknikleriyle sağlanır. Bu teknikle, özellikle mikro ve makro kapsülasyon işlemlerinde, FDM'lerin polimer matrisler içinde mikro boyutta kapsüllenmesini sağlar. Örneğin, n-hekzadekan/

modifiye montmorillonit kompozit faz değiştiren maddeler, faz inversiyon emülsifikasyonu yöntemiyle hazırlanmış ve polistiren-ko-divinilbenzen kopolimer kabuk içerisinde mikro boyutta kapsüllenmiştir (H. H. Mert et al., 2020). Bu yöntemde, yüzey modifiye montmorillonit (MMT) kili, emülsiyon sistemine farklı oranlarda ilave edilerek, kapsülün hem ısı hem de yapısal kararlılığı artırılmıştır. Hazırlanan mikrokapsüllerin ısı, morfolojik ve yapısal özellikleri incelenmiş ve elde edilen kompozit malzemelerin düşük sıcaklıktaki (18-30°C) ısıtma ve soğutma sistemlerinde enerji depolanması amacıyla kullanılabilecek potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Polimer/FDM hibrit sistemlerinin sentezinde, kapsülasyon teknikleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Makro, mikro ve nano ölçekli kapsülasyon işlemleriyle, FDM'lerin sıvı fazda sızdırma problemi ortadan kaldırılırken, ısı transfer yüzeyi artırılarak enerji depolama kapasitesi optimize edilmektedir (H. H. Mert et al., 2020). Örneğin, n-hekzadekan faz değiştiren maddesi, stiren ve divinilbenzen kabuk içinde mikro boyutta kapsüllenmiş ve elde edilen mikrokapsüllerin erime entalpisi 131,074 J/g olarak bulunmuştur. Kapsülleme işlemi sayesinde, FDM'lerin dış çevrelerden etkilenme derecesi azaltılmakta ve malzemenin katıdan sıvıya geçişi esnasında mevcut kabuk hacminde sabit tutulması mümkün olmaktadır (H. H. Mert & Mert, 2020).

2.3.2. Elektroçigirme (Electrospinning) ile FDM-Polimer Lif Üretimi

Elektroçigirme tekniği, polimer nanoliflerin üretiminde sağladığı esneklik, ölçeklenebilirlik ve morfolojik kontrol avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Elektroçigirme ile üretilen liflerin çapı genellikle 100 nm ile birkaç mikrometre arasında değişmektedir ve bu lifler, yüksek yüzey alanı/hacim oranı, gözeneklilik ve fonksiyonel katkı maddelerinin homojen dağılımı gibi özellikler sunar (Frenot & Chronakis, 2003). Elektroçigirme sürecinde, polimer çözeltilerinin veya eriyiklerinin bir elektrik alanı altında ince lifler halinde çekilmesiyle sürekli ve homojen lifler elde edilir. Bu süreçte, polimer çözeltisinin konsantrasyonu, viskozitesi, elektriksel iletkenliği ve yüzey gerilimi gibi parametreler, elde edilen liflerin morfolojisi ve çapı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (S. Q. Liu, White, & Reneker, 2019). Liu ve arkadaşlarının çalışmasında, polimer çözeltisinin konsantrasyonu, elektriksel iletkenliği ve yüzey geriliminin ayarlanmasıyla, polimer nanoliflerin çapı ve morfolojisinin hassas bir şekilde kontrol edilebildiği gösterilmiştir (S. Q. Liu et al., 2019). Bu tür parametrelerin kontrolü, FDM-polimer liflerin istenen özelliklerde üretilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Elektroçigirme ile FDM-polimer lif üretimi, özellikle termal enerji depolama uygulamalarında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Babapoor ve

arkadaşlarının çalışmasında, PEG gibi FDM'leri, poliamid-6 (PA6) ve çeşitli nanopartiküllerle birlikte tek nozullu elektroegirme yöntemiyle kompozit nanolifler halinde üretilmiştir (Babapoor, Karimi, & Khorram, 2016). Bu çalışmada, elde edilen nanokompozit liflerin yüksek termal stabiliteye ve güvenilirliğe sahip olduğu, ayrıca nanoparçacık yüklemesinin artırılmasıyla lif çapının azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle Al_2O_3 katkılı kompozitlerin termal iletkenlikte maksimum artış sağladığı belirtilmiştir (Babapoor et al., 2016). Bu bulgular, elektroegirme ile üretilen FDM-polimer liflerin, enerji depolama ve ısı yönetimi uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir.

Elektroegirme ile FDM-polimer lif üretiminde, çekirdek-kabuk (core-sheath) yapılarının geliştirilmesi de önemli bir araştırma alanıdır. Arat ve arkadaşlarının çalışmasında, poliakrilonitril (PAN) kabuk ve PEG veya Poli(etilen glikol) metil esterler (PEGME) çekirdekten oluşan nanolifler, koaksiyel elektroegirme yöntemiyle üretilmiştir (Noyan, Onder, Sarier, & Arat, 2018). Bu çalışmada, üretilen liflerin morfolojisi, termal stabilitesi ve faz değişim performansları detaylı olarak incelenmiştir. DSC analizleri sonucunda, PAN-PEG ve PAN-PEGME nanoliflerinin ısıtma entalpilerinin sırasıyla 38-133 J/g ve 29-60 J/g arasında değiştiği ve iyi bir enkapsülasyon verimliliği sağlandığı gösterilmiştir (Noyan et al., 2018). Ayrıca, tekstil bazlı sandviç yapılar halinde kullanılan bu nanoliflerin, çevre sıcaklık değişimlerine karşı tamponlayıcı bir işlev gördüğü ve termal özelliklerinin arttığı belirtilmiştir (Noyan et al., 2018). Bu tür çekirdek-kabuk yapılar, FDM'in polimer matris içinde sızmasını engelleyerek, uzun ömürlü ve güvenilir enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

2.3.3. 3B Yazdırma (Additive Manufacturing) ile FDM-Polimer Yapıları

3B yazdırma teknolojileri, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karmaşık geometrilerin hızlı, hassas ve malzeme israfı olmadan üretilmesine olanak tanır. Bu teknoloji, özellikle enerji depolama ve yönetimi uygulamalarında, FDM-polimer kompozitlerinin istenen şekil ve boyutlarda üretilmesini mümkün kılarak, uygulama alanlarını genişletmektedir. Ramesh ve arkadaşları, 3B yazdırma teknolojisinin endüstrideki hızlı gelişimini ve gelecekteki potansiyelini vurgulayarak, bu teknolojinin özellikle yeni nesil kompozit malzemelerin üretiminde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir (Ramesh, Niranjana, Bhoopathi, & Rajeshkumar, 2024). Ayrıca, 3B yazdırma ile üretilen polimer matris kompozitlerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin, kullanılan katkı maddelerine ve matrisin yapısına bağlı olarak değiştirilebildiği ifade edilmiştir. Singh ve arkadaşları, 3B yazdırma ile üretilen polimer matris kompozitlerin, özellikle enerji depolama, otomotiv,

havacılık ve biyomedikal alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir (Singh, Kumar, & Chohan, 2020).

FDM-polimer kompozitlerinin 3B yazdırma ile üretimi, malzeme seçimi ve üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirir. Fused Deposition Modeling (FDM) veya Fused Filament Fabrication (FFF) gibi yaygın 3B yazdırma tekniklerinde, polimer matris içerisine mikroenkapsüle FDM'ler, karbon nanotüpler, metal teller veya bor nitrür gibi katkı maddeleri eklenerek kompozit filamentler hazırlanır. Park ve arkadaşları, FDM tabanlı 3B yazdırmada kullanılan polimer kompozit filamentlerin üretim yöntemlerini, fiziksel ve mekanik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiş ve karbon nanomalzemeler, metaller ve seramiklerin polimer matrislere entegre edilmesiyle fonksiyonel kompozitlerin üretilebileceğini göstermiştir (Park & Fu, 2021). Bu tür kompozit filamentler, enerji depolama ve termal yönetim uygulamalarında kullanılmak üzere karmaşık geometrilerde 3B yazdırılabilmektedir.

2.3.4. Fiziksel ve Kimyasal Karışım Teknikleri

FDM-polimer kompozitlerinin geliştirilmesinde karşılaşılan başlıca zorluklardan biri, FDM'lerin düşük termal iletkenliği ve yapısal stabilitesidir. FDM'lerin doğrudan kullanımı, özellikle TED uygulamalarında, sızıntı, düşük mekanik dayanım ve yetersiz ısı transferi gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, FDM'lerin polimer matrislerle fiziksel veya kimyasal yollarla birleştirilmesi, hem enerji depolama kapasitesini hem de mekanik ve termal dayanımı artırmak için yaygın olarak tercih edilmektedir (Kale et al., 2025). FDM-polimer kompozitlerinde karışım tekniklerinin seçimi, malzemenin uygulama alanına göre değişmekte ve nihai ürünün performansını doğrudan etkilemektedir.

Fiziksel karışım teknikleri, FDM ve polimer matrisin mekanik olarak bir araya getirilmesini içerir. Bu yöntemler arasında çözeltiden dökme, sıcak presleme, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi işlemler yer alır. Örneğin, polipropilen/montmorillonit (PP/MMT) kompozit köpüklerin üretiminde, polimer ve seramik bileşenler ekstrüzyon makinesinde eriyik olarak karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Ardından, kimyasal köpürtücü ajan eklenerek ekstrüde edilen karışım köpük formunda granüllere dönüştürülmüş ve bu granüller enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Bu süreçte, fiziksel karışımın homojenliği ve bileşenlerin dağılımı, kompozitin termal ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Ayrıca, kil ilavesinin polimerin termal direncini artırdığı, ancak gözenek artışı ile termal özelliklerin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir (Ulutaş, Taşdemir, Korkmaz, Kuvvet, & Duran,

2024). Bu çalışma, fiziksel karışım tekniklerinin, özellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerin, FDM-polimer kompozitlerinin üretiminde yaygın olarak kullanıldığını ve bu tekniklerin malzemenin mikroyapı ve termal özellikleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Kimyasal karışım teknikleri ise, FDM ve polimer matris arasında kimyasal bağların oluşturulmasını veya arayüzey etkileşimlerinin güçlendirilmesini amaçlar. Bu teknikler, özellikle polimer matris ile FDM arasında uyumluluğun artırılması, sızıntının önlenmesi ve termal iletkenliğin iyileştirilmesi açısından önemlidir. Kimyasal karışım tekniklerinde, yüzey modifikasyonu, bağlayıcı ajanlar (örneğin, maleik anhidrit aşılı polipropilen gibi), çapraz bağlama ve fonksiyonel grupların eklenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, polipropilen/kalsiyum borat/maleik anhidrit aşılı polipropilen (MA-g-PP) kompozitlerinde, MA-g-PP'nin uyumlaştırıcı olarak kullanılması, kalsiyum borat partiküllerinin PP matrisinde daha homojen dağılmasını ve arayüzey yapışmasının artmasını sağlamıştır. Bu kimyasal karışım yaklaşımı, kompozitin yoğunluk, HDT, Vicat yumuşama noktası, nem içeriği, LOI, sertlik ve elastiklik modülü gibi özelliklerinde iyileşmelere yol açmıştır (Ulutaş & Taşdemir, 2024). Bu bulgu, kimyasal karışım tekniklerinin, özellikle fonksiyonel dolgu maddeleri ve uyumlaştırıcı ajanların kullanımıyla, FDM-polimer kompozitlerinde arayüzey etkileşimlerini güçlendirdiğini ve malzemenin performansını artırdığını göstermektedir. Başka bir çalışmada stearik asidin SiO₂ ve PMMA kabukları içinde kapsüllenerek PMMA matrisine dahil edilmesiyle elde edilen kompozitler, sızıntı olmadan uygun depolama kapasitesi ve şekillendirilebilirlik sunmuştur (Sahan & Paksoy, 2018). Bu örnek, fiziksel karışım tekniklerinin, özellikle kapsülleme ve matris entegrasyonu yoluyla, FDM-polimer kompozitlerinin uygulama alanlarını genişlettiğini göstermektedir.

2.3.5. Yeşil ve Sürdürülebilir Üretim Yaklaşımları

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin sentezinde, doğal ve yenilenebilir kaynaklı polimerlerin kullanımı da sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Selüloz nanofibril (SNF) temelli parafin esaslı kompozit FDM'ler, dondurarak şablonlama ve tek adımda impregnasyon yöntemleriyle üretilmiş ve enerji etkin, çevre dostu yeşil binalarda iç mekan uygulamaları için uygun adaylar olarak değerlendirilmiştir (Kanlı, Mert, & Mert, 2021). Bu çalışmada, SNF köpük matrisi içerisine n-hekzadekan emdirilmiş ve elde edilen kompozitlerin erime entalpisi 54,7 J/g olarak bulunmuştur. Kompozitlerin faz geçiş sıcaklığı ve gizli ısı depolama kapasitesi, enerji verimliliği gerektiren uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir.

2.4. Polimer/FDM Hibrit Sistemlerinin Termal Performans Analizi

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin enerji depolama kapasitesi, ısı iletkenlik davranışı, döngüsel kararlılığı ve faz değişim karakteristikleri, malzemenin uygulamalardaki verimliliğini doğrudan belirlemektedir. Termal performansın analizi için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), termal iletkenlik ölçümü, ısı döngü testleri, sıcaklık dağılım analizleri ve ısı depolama-boşaltma kinetikleri gibi analitik teknikler kullanılmaktadır.

Polimer/FDM hibrit sistemlerinin ısı enerji depolama verimliliğinin belirlenmesinde en kritik parametreler; faz değişim sıcaklığı (T_m), faz değişim entalpisi (ΔH) ve özgül ısı kapasitesidir (C_p). Bu termofiziksel özelliklerin hassas karakterizasyonu için Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) altın standart olarak kabul edilmektedir. DSC analizleri, polimerik matris içerisine hapsedilen FDM'in erime ve donma davranışlarını ortaya koyarken, aynı zamanda polimer ağ yapısının FDM kristalizasyonu üzerindeki olası kısıtlayıcı etkilerini (confinement effect) ve aşırı soğuma (supercooling) derecesini belirlemeye olanak tanır. İdeal bir hibrit sistemde, FDM'in kütle oranına bağlı olarak teorik enerji depolama kapasitesinin mümkün olduğunca korunması ve polimer matrisin ısı transferine engel oluşturmayacak bir arayüzey uyumu sergilemesi beklenir.

Enerji depolama kapasitesinin yanı sıra, geliştirilen kompozit yapının termal kararlılığı ve uzun vadeli performansı, malzemenin endüstriyel uygulanabilirliği açısından belirleyicidir. Termogravimetrik Analiz (TGA), hibrit malzemenin bozunma sıcaklığını (T_{deg}) tespit ederek çalışma sıcaklığı aralığının güvenli sınırlarını çizer. Buna ek olarak, polimerlerin doğası gereği düşük olan termal iletkenlik katsayılarının iyileştirilmesi, şarj/deşarj (erime/donma) sürelerini kısaltmak adına elzemdir; bu nedenle Lazer Flash Analizi (LFA) veya Hot Disk yöntemleri ile ısı iletkenlik değişimleri izlenmelidir. Son olarak, malzemenin binlerce kez tekrarlanan ısınıp soğuma süreçlerinde kimyasal yapısını ve fiziksel bütünlüğünü koruyup korumadığı, hızlandırılmış termal döngü testleri ile doğrulanarak sistemin sızıntı yapmama (leakage-proof) özelliği garanti altına alınmalıdır.

2.5. Uygulama Alanları

Polimer/FDM hibrit sistemleri, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri, şekil stabilite, gelişmiş termal kararlılıkları ve tasarıma uygun morfolojileri sayesinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle polimer matris tarafından sağlanan mekanik dayanım, FDM'in sızıntı problemini ortadan kaldırması ve nano doldurucular ile artırılan ısı iletkenlik özellikleri, bu

hibritleri enerji verimliliği gerektiren pek çok sektörde öne çıkarmaktadır (Brecht et al., 2024).

Bu hibrit sistemlerin en önemli kullanım alanlarından biri bina ve yapı malzemeleridir. Binalarda pasif ısı yönetiminde kullanılan FDM-polimer kompozitleri, duvar panelleri, alçıpan sistemleri, yalıtım katmanları ve çatı kaplamalarına entegre edilerek iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını azaltır. Bu sayede yaz aylarında serinletme, kış aylarında ise ısıtma yükleri ciddi oranda düşürülür. Özellikle akrilik, epoksi ve polietilen matrisli şekil stabil FDM'ler, 20–35 °C sıcaklık aralığında etkili oldukları için konut ve ofis uygulamalarında yoğun bir şekilde tercih edilmektedir (Faraj, Khaled, Faraj, Hachem, & Castelain, 2021). Yapı sektöründe hibrit sistemler sadece enerji verimliliği değil, aynı zamanda yangın dayanımı, nem kontrolü ve uzun dönem döngüsel stabilite açısından da avantaj sağlamaktadır.

Bir diğer önemli uygulama alanı elektronik cihazların termal yönetimidir. Mikroişlemciler, LED modülleri, bataryalar ve güç dönüştürücüler gibi ısı yoğunluğu yüksek elektronik bileşenlerin aşırı ısınması performans kaybına ve ciddi güvenlik risklerine yol açmaktadır. Polimer/FDM hibritleri, yüzeye yakın konumlandırılarak ısıнын anlık olarak depolanmasını ve daha sonra kontrollü şekilde geri verilmesini sağlar. Özellikle grafen, karbon nanotüp ve bor nitrid gibi yüksek iletken dolgu malzemeleri ile desteklenmiş FDM kompozitleri elektronik soğutma uygulamalarında ısı iletkenliği artırarak hızlı ısı transferine olanak tanımaktadır (Saha & Dutta, 2012). Bu hibritler aynı zamanda esnek elektroniklerde ve giyilebilir teknoloji bileşenlerinde de uygulanmaktadır.

Polimer/FDM sistemlerinin yükselen bir diğer uygulama alanı **batarya termal yönetimidir**. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle ısı kaçak (thermal runaway) riski taşımaktadır. FDM kompozitlerinin batarya modüllerine entegre edilmesi, hücre sıcaklığını dar bir aralıkta sabit tutarak bataryaların güvenli çalışma performansını artırır. Bu hibritler, şarj sırasında oluşan aşırı ısının FDM tarafından absorbe edilmesini sağlarken, polimer matris aracılığıyla mekanik dayanımı da artırır. Özellikle elektrikli araçlarda, grafen ve metal oksit takviyeli FDM-polimer yapılar batarya yönetim sistemlerinde kritik bir yenilikçi çözüm olarak değerlendirilmektedir (Alva, Liu, Huang, & Fang, 2017).

Güneş enerjisi sistemleri, hibrit FDM uygulamalarının bir başka önemli alanıdır. Güneş kolektörlerinde FDM tabakaları, gündüz depolanan ısının gece boyunca yavaşça geri verilmesini sağlar. Aynı şekilde, polimer matris içinde stabilize edilmiş FDM'ler, fotovoltaik (PV) panellerin yüzey sıcaklığını düşürerek panel verimini artırır. Güneş enerjisi kurutucuları, su ısıtma

sistemleri ve termal depolama tankları gibi cihazlarda hibrit sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Gadhane, Pathan, Kore, & Prabhune, 2021).

Polimer/FDM hibritleri ayrıca akıllı tekstiller alanında da yenilikçi uygulamalar sunmaktadır. Elektroegirme veya mikroenkapsülleme teknikleriyle üretilen FDM yüklü polimer lifleri, sıcaklık değişimlerine adaptif tepki veren giysilerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu tekstiller, vücut sıcaklığını belirli aralıkta tutarak sporcular, askerî personel ve açık hava çalışanları için konfor artırıcı çözümler sunmaktadır. Giyilebilir sensörlerle entegre edildiğinde hibrit FDM sistemleri hem ısı yönetim hem de elektronik bileşenlerin stabil çalışması için ikili fonksiyon sağlayabilmektedir (Nagar & Sreenivasa, 2024).

Bir başka uygulama alanı da soğuk zincir lojistiği ve tıbbi taşımacılıktır. Aşılar, biyolojik örnekler, ilaçlar ve donma hassasiyeti olan gıdalar, belirli sıcaklık aralıklarında taşınmalıdır. Şekil stabil FDM-polimer paketleri bu malzemelerin ısı düzenini uzun süre koruyarak bozulmayı engeller. Bu sistemlerin en büyük avantajı, sızıntı yapmamaları ve tekrar kullanılabilir olmalarıdır.

Son olarak polimer/FDM hibritleri savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve akıllı ambalaj teknolojileri gibi stratejik alanlarda da uygulanmaktadır. Termal kamuflaj malzemeleri, hafif kompozit kaplamalar, motor çevresi ısı yönetim komponentleri gibi çeşitli sistemlerde hibrit FDM yapılarının kullanımı giderek artmaktadır.

3. Sonuç

Polimer/FDM hibrit sistemleri, termal enerji depolama teknolojilerinin mevcut sınırlılıklarını aşmak için geliştirilmiş, çok yönlü ve yüksek performanslı malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. FDM'lerin doğal olarak sahip olduğu yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, polimer matrislerin sağladığı mekanik dayanım, şekil stabilitesi ve işlenebilirlik özellikleriyle birleştiğinde hem laboratuvar ölçeğinde hem de endüstriyel uygulamalarda son derece başarılı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Polimer matrisler, FDM'in erime sırasında karşılaşılan sızıntı problemini etkin şekilde çözerken, nano doldurucuların eklenmesiyle ısı iletkenlik değerleri iyileştirilmekte ve hibrit sistemlerin hızlı ısı depolama-boşaltma performansı geliştirilebilmektedir.

Güncel literatür, polimer/FDM hibritlerinin sadece enerji depolama verimini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda elektroniklerde termal yönetim, binalarda pasif ısı düzenleme, bataryalarda güvenlik ve sıcaklık kontrolü, giyilebilir teknolojilerde konfor sağlama gibi pek çok uygulama

alanında kritik bir teknolojik bileşen hâline geldiğini göstermektedir. Bu hibrit sistemlerin esnek üretim yöntemleri (mikrokapsülleme, çözelti dökümü, elektroegirme, 3B yazdırma vb.), malzeme tasarımının farklı sektör ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Böylece hem geleneksel malzemelerle uyumlu kompozitler geliştirilmekte hem de tamamen yeni fonksiyonel yapılar ortaya çıkmaktadır.

Bununla birlikte hibrit sistemlerin büyük ölçekli üretimi, maliyet etkinliği, uzun süreli döngüsel dayanımı, ara yüzey etkileşimlerinin kontrolü ve çevresel etkiler gibi konularda hâlen çözülmesi gereken bazı bilimsel ve mühendislik sorunları bulunmaktadır. Polimerlerin termal bozunmaya karşı dayanımının artırılması, FDM-polimer etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması, yüksek ısıl iletkenlik sağlayan ancak mekanik özellikleri koruyan dolgu stratejilerinin geliştirilmesi gelecekteki araştırmaların öncelikli alanları arasında yer almaktadır. Ayrıca yapay zekâ destekli malzeme optimizasyonu, biyobozunur polimerlerle sürdürülebilir hibrit sistemler ve yeni nesil mikro/nano mühendislik teknikleri gibi yenilikçi yaklaşımlar, polimer/FDM hibrit sistemlerinin gelişiminde önemli rol oynayacaktır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polimer/FDM hibrit sistemleri hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük potansiyel taşımakta olup enerji verimliliğinin artırılması, karbon ayak izinin azaltılması ve sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi gibi hedefler doğrultusunda önemli bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, hibrit sistemlerin tasarımı, üretimi ve performans değerlendirmesine yönelik çalışmaların artarak devam etmesi, geleceğin enerji odaklı malzeme bilimi uygulamalarında kritik öneme sahiptir.

Kaynakça

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615-628.
- Al-Faillkawi, F., & Abdulrahman, B. (2025). Evaluating the Role of Thermal Energy Storage in the Performance of Concentrated Solar Power Plants. *Proceedings of 15th International Conference on Renewable and Clean Energy, Icrce 2025*, 1434, 47-54.
- Alkan, C., Sari, A., Karaipekli, A., & Uzun, O. (2009). Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 143-147.
- Alva, G., Liu, L. K., Huang, X., & Fang, G. Y. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706.
- Babapoor, A., Karimi, G., & Khorram, M. (2016). Fabrication and characterization of nanofiber-nanoparticle-composites with phase change materials by electrospinning. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1225-1235.
- Bayram, S., Mert, H. H., & Mert, M. S. (2023). Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli (stiren-ko-divinil benzen) matrisine sahip n-nonadekan içeren şekilce kararlı kompozit faz değiştiren maddelerin hazırlanması ve özelliklerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 435-450.
- Brechtl, J., Ullman, A. M., Li, K., Yang, G., Nanda, J., Nawaz, K., & Sacchi, R. L. (2024). Phase change electrolytes for combined electrochemical and thermal energy storage. *Energy Reports*, 11, 3931-3940.
- Cárdenas, B., & León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737.
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 33.
- Feldman, D., Shapiro, M., & Banu, D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar energy materials*, 13(1), 1-10.
- Frenot, A., & Chronakis, I. S. (2003). Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(1), 64-75.
- Gadhave, P., Pathan, F., Kore, S., & Prabhu, C. (2021). Comprehensive review of phase change material based latent heat thermal energy storage system. *International Journal of Ambient Energy*.

- Kale, P., Gondane, P., Bhutada, P., Patil, A., Patil, Y., & Yadav, R. (2025). Phase Change Materials in Thermal Energy Storage: A Comprehensive Review of Properties, Advances, and Challenges. 2025 International Conference on Sustainable Energy Technologies and Computational Intelligence (SETCOM),
- Kanlı, Z., Mert, M. S., & Mert, H. H. (2021). Isıl Enerji Depolama Uygulamaları İçin Selüloz Nanofibril Temelli Parafin İçeren Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(22), 273-281.
- Karadağ, M., Akçay, İ. T., & Karakurt, A. S. (2024). Trends and Emerging Themes in Thermal Energy Storage: A Bibliometric Study. *Journal of Marine and Engineering Technology*, 4(2), 44-53.
- Kerroumi, N. (2017). Solar thermal energy storage using latent heat: discharging energy from phase change material. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 4(3), 37-45.
- Kumar, S., Sarkar, C., & Saha, S. (2024). Renewable thermal energy storage in polymer encapsulated phase-change materials: a comprehensive overview. *Challenges and Opportunities of Distributed Renewable Power*, 181-214.
- Lin, Y. X., Jia, Y. T., Alva, G., & Fang, G. Y. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742.
- Liu, A. B., Xie, H. Q., Wu, Z. H., & Wang, Y. Y. (2022). Advances and outlook of TE-PCM system: a review. *Carbon Neutrality*, 1(1).
- Liu, S. Q., White, K. L., & Reneker, D. H. (2019). Electrospinning Polymer Nanofibers With Controlled Diameters. *Ieee Transactions on Industry Applications*, 55(5), 5239-5243.
- Mert, H. H., & Bayram, S. (2020). Isıl Enerji Depolama Uygulamalarına Yönelik Mikrokapsüllenmiş N-Oktadekan/Nanokil Kompozit Faz Değiştiren Malzemelerin Geliştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 675-687.
- Mert, H. H., & Mert, M. S. (2020). Faz Değiştiren Madde Olarak n-Hekzadekan Esaslı Mikrokapsüllerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Performansının T-Kayıt Yöntemiyle Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(18), 148-161.
- Mert, H. H., Mert, M. S., & Mert, E. H. (2020). N-Hekzadekan/Montmorillonit Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Hazırlanması Ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 229-239.
- Mert, M. S., Sert, M., & Mert, H. H. (2018). Isıl Enerji Depolama Sistemleri İçin Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161-174.

- Nagar, S., & Sreenivasa, S. (2024). Polymer-based supporting materials and polymer-encapsulated phase change materials for thermal energy storage: A review on the recent advances of materials, synthesis, and characterization techniques. *Polymer Engineering and Science*, 64(9), 4341-4370.
- Noyan, E. C. B., Onder, E., Sarier, N., & Arat, R. (2018). Development of heat storing poly(acrylonitrile) nanofibers by coaxial electrospinning. *Thermochimica Acta*, 662, 135-148.
- Oudaoui, K., & Faraji, M. (2022). Numerical Study of Latent Heat Discharge of a Phase Change Material Shell-and-Tube Thermal Energy Storage System. International Moroccan Congress of Mechanics,
- Ouikhalfan, M., Hekimoglu, G., Sari, A., Gencel, O., & Tyagi, V. V. (2022). Metal Oxide Nanoparticle Dispersed-Polyethylene Glycol: Thermal Conductivity and Thermal Energy Storage Properties. *Energy & Fuels*, 36(5), 2821-2832.
- Park, S., & Fu, K. (2021). Polymer-based filament feedstock for additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 213.
- Ramesh, M., Niranjana, K., Bhoopathi, R., & Rajeshkumar, L. (2024). Additive manufacturing (3D printing) technologies for fiber-reinforced polymer composite materials: A review on fabrication methods and process parameters. *E-Polymers*, 24(1).
- Saha, S. K., & Dutta, P. (2012). Thermal Management of Electronics Using PCM-Based Heat Sink Subjected to Cyclic Heat Load. *Ieee Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology*, 2(3), 464-473.
- Sahan, N., & Paksoy, H. (2018). Novel shapeable phase change material (PCM) composites for thermal energy storage (TES) applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 380-387.
- Singh, B., Kumar, R., & Chohan, J. S. (2020). Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Materials Today-Proceedings*, 33, 1562-1567.
- Temel, Ü. N., & Çiftçi, B. Y. (2018). Determination of Thermal Properties of A82 Organic Phase Change Material Embedded with Different Type Nanoparticles. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology*, 38(2), 75-85.
- Ulutaş, E., & Taşdemir, M. (2024). Polipropilen (Pp)/Kalsiyum Borat [Ca₃(Bo₃)₂]/Maleik Anhidrit Aşılı Polipropilen (Ma-G-Pp) Polimer Kompozitinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 1421-1431.
- Ulutaş, E., Taşdemir, M., Korkmaz, Ö. F., Kuvvet, N., & Duran, M. C. (2024). Polipropilen/montmorillonit kompozit köpüğünün fiziksel, termal ve

morfolojik özelliklerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1207-1218.

- Yetgin, S. H., Karadeniz, B., & Guleşen, M. (2017). Grafen Oksit Katkılı Polipropilen Polimer Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerin İncelenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 34-40.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.
- Zhang, H., Shi, T., & Ma, A. (2021). Recent advances in design and preparation of polymer-based thermal management material. *Polymers*, 13(16), 2797.
- Zhang, N., Yuan, Y. P., Cao, X. L., Du, Y. X., Zhang, Z. L., & Gui, Y. W. (2018). Latent Heat Thermal Energy Storage Systems with Solid-Liquid Phase Change Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 20(6).
- Zohra, M. B., Amine, R., & Alhamany, A. (2019). Development of thermal energy storage system based on phase change materials. 2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE).

Enerji Uygulamaları İçin Polimer–MOF’lar (Metal-Organik İskeletler)

Nihal Deligönül¹

Özet

Sürdürülebilir enerji çözümlerine artan talep, enerji depolama ve dönüşümü için ileri malzemelerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Geleneksel malzemeler sıklıkla düşük yüzey alanı, sınırlı ayarlanabilirlik ve sınırlı mekanik stabilite gibi kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Metal-organik çerçeveler (MOF’lar) ve polimer bazlı hibritleri bu konuda çok yönlü bir çözüm sunar. MOF’lar yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözeneklilik ve çok işlevli özellikler sağlayarak piller, süperkapasitörler, gaz adsorpsiyonu ve fotokataliz gibi uygulamalara uygun hâle gelir.

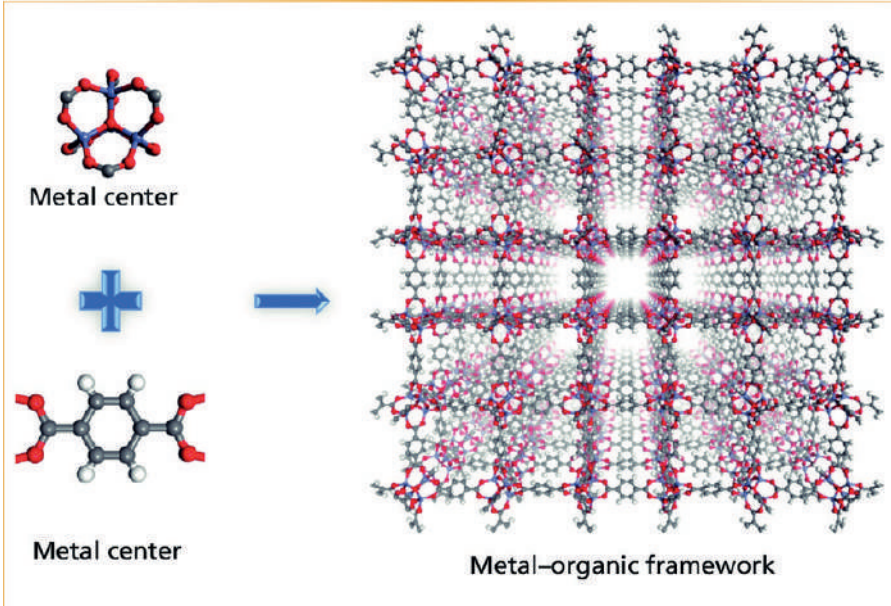
Polimerler ise esneklik, kimyasal ayarlanabilirlik ve işlenebilirlik katarak MOF hibritlerinde mekanik stabiliteyi ve arayüz uyumluluğunu artırır. Bu polimer–MOF malzemeler, MOF’un gözenekliliği ve aktivitelerini polimerin iletkenliği ve dayanıklılığı ile sinerjik şekilde birleştirerek iyonik/elektronik taşıma, döngü stabilitesi ve yapısal sağlamlığı iyileştirir. Uygulama alanları arasında gaz depolama ve ayırma (H_2 , CH_4 , CO_2), enerji depolama, enerji dönüşümü (yakıt hücreleri, fotokataliz) ve katalitik süreçler yer alır.

Potansiyeline rağmen, uzun dönem stabilite, ölçeklenebilir sentez, tekrarlanabilirlik ve MOF’un intrinsik iletkenliği hâlâ önemli zorluklar olarak durmaktadır. Gelecek yönelimler arasında esnek/giyilebilir cihazlar, katı elektrolitler, 2D veya katmanlı MOF’lar, çevre dostu sentez yöntemleri ve çok işlevli hibritler öne çıkmaktadır. Bu zorlukların aşılması, polimer–MOF hibritlerinin sürdürülebilir ve yüksek performanslı enerji teknolojileri için temel malzemeler hâline gelmesini sağlayacaktır.

1 Prof. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, nihal.deligonul@gop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-7381-2611

1. Giriş

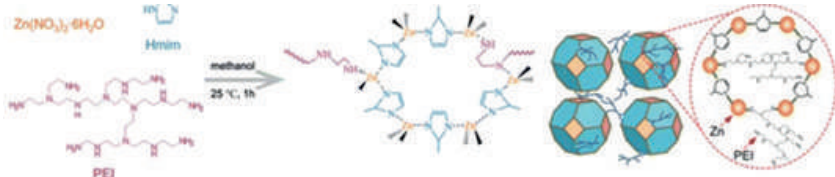
Sürdürülebilir ve verimli enerji çözümlerine yönelik küresel talep, enerji depolama ve dönüşümü alanında ileri malzemeler üzerine kapsamlı araştırmaları teşvik etmiştir. Geleneksel enerji malzemeleri sıklıkla düşük yüzey alanı, sınırlı kimyasal ayarlanabilirlik, çok işlevlilik eksikliği ve yetersiz mekanik kararlılık gibi kısıtlamalarla karşılaşır. Bu sınırlamaları aşmak için, yapısal ve fonksiyonel özellikleri özenle tasarlanmış yenilikçi malzemelere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, metal-organik çerçeveler (MOF'lar) ve bunların türevleri ile kompozitleri son derece esnek ve çok yönlü platformlar olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1.1). Kristal gözenekli yapıları, ayarlanabilir kimyasal bileşimleri ve çok işlevli özellikleri, MOF'ları piller, süperkapasitörler, gaz adsorpsiyonu ve fotokataliz gibi geniş bir enerji uygulamaları yelpazesi için uygun hâle getirir. MOF'lar, yüksek düzeyde organize ve ayarlanabilir bir iskelet sağlayarak, geleneksel malzemelerin karşılaştığı temel kısıtlamaları aşmakta ve gelecek nesil enerji cihazlarının tasarımında yeni fırsatlar sunmaktadır (Cui et al., 2025; Durán-Egido et al., 2025; Ismail et al., 2025; Yang et al., 2024).



Şekil 1.1. Bir MOF kafesinin gözenekli kristal yapı

Polimerler, enerji malzemelerinin geliştirilmesinde, doğal esneklikleri, kimyasal ayarlanabilirlikleri ve kolay işlenebilirlikleri sayesinde benzersiz

avantajlar sunar. Kompozitlere dahil edildiklerinde mekanik sağlamlık, yapısal bütünlük ve uyarlanabilir fonksiyonel özellikler sağlayabilirler. Enerji uygulamalarında polimerler, iyonik iletkenliği artıran, ara yüzey direncini azaltan ve cihazların genel kararlılığını iyileştiren katı hal elektrolitleri için etkili matrisler olarak görev yapar. Çok yönlü kimyasal yapıları, fonksiyonel grupların veya çapraz bağlama stratejilerinin eklenmesine olanak tanır; bu sayede MOF'lar gibi diğer bileşenlerle etkileşimleri optimize ederek hibrit malzemeleri belirli uygulamalara uyarlamak mümkündür. MOF'lar, metal iyonları veya kümelerinin organik bağlantılayıcılarla koordine edilmesiyle oluşan kristal yapı, yüksek gözenekli üç boyutlu malzemelerdir. Yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek boyutu, kristallik ve kimyasal fonksiyonellik gibi ayırt edici özellikleri, onları enerji uygulamaları için son derece cazip kılar. MOF'lar, iyon taşınımı, kataliz, gaz depolama ve enerji dönüşümü süreçlerini kolaylaştırabilir. Ancak, saf MOF'lar genellikle düşük elektriksel iletkenlik, sınırlı mekanik kararlılık ve döngüsel koşullar altında zorluklar gibi problemlerle karşılaşır; bu da cihazlarda doğrudan kullanılmalarını sınırlayabilir. Bu sınırlamalar, MOF'ları diğer fonksiyonel bileşenlerle entegre ederek performanslarını artıracak kompozit malzemelerin geliştirilmesini motive etmektedir (Schmidt & Schmidt, 2020; W. Wang et al., 2024; Y. Wang et al., 2024a).



Şekil 1.2. Zn(II)-Temelli Metal-Organik Çerçeve (MOF) ve PEI Polimeri ile Hibrit Yapı Sentezi ve Mekanizması

Polimer ve MOF kombinasyonu, her iki bileşenin avantajlarını sinerjik şekilde birleştiren hibrit malzemeler oluşturur (Şekil 1.2). Polimer-MOF hibritleri, MOF'ların yüksek gözenekliliğini, yüzey alanını ve katalitik aktivitesini korurken, polimerlerin mekanik esnekliği, işlenebilirliği ve kimyasal ayarlanabilirliğinden faydalanır. Bu sinerji, iyileştirilmiş iyonik iletkenlik, daha yüksek kapasitans, daha iyi döngüsel stabilite ve mekanik sağlamlık gibi geliştirilmiş performans özelliklerine dönüşür. Bu hibritler, iletkenlik, kararlılık ve esneklik gibi gereksinimlerin birleşimini karşılamakta zorlanan geleneksel malzemelere kıyasla, katı hal elektrolitleri, esnek enerji depolama cihazları ve giyilebilir elektronikler için özellikle umut vericidir. Polimer zincirleri ile MOF iskeletleri arasındaki ayarlanabilir etkileşimler,

yük taşınımını, ara yüzey özelliklerini ve yapısal bütünlüğü hassas şekilde kontrol etmeye olanak tanır ve özelleştirilmiş enerji cihazlarının tasarımına imkân sağlar.

2. Polimerler, MOF'lar ve Kombinasyonlarının Temelleri

2.1. Enerji ile İlgili Polimer Özellikleri

Polimerler, yapısal esneklikleri, ayarlanabilir fiziko-kimyasal özellikleri ve büyük ölçekli üretime uyumları sayesinde modern enerji teknolojilerinde merkezi bir rol oynar. Katı hâl piller ve yakıt hücrelerinden süperkapasitörlere ve esnek enerji hasadı sistemlerine kadar pek çok uygulamada bir polimerin performansı temelde dört ana özelliğine dayanır: esneklik, iyonik/elektriksel iletkenlik, kimyasal kararlılık ve kolay üretim. Bu bağlamda özellikle PEO (polyethylene oxide), PEDOT (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) ve PVK (poly(vinyl carbazole)) gibi yaygın sistemler dikkat çeker. Polimerlerin enerji sistemlerindeki belirgin avantajlarından biri, zincir segmentlerinin hareketliliğinden kaynaklanan mekanik esnekliktir; bu özellik, malzemelerin kırılmadan bükülmesine, gerilmesine ve düzensiz yüzeylere uyum sağlamasına olanak tanır. Esneklik, katı polimer elektrolitlerinde elektrot arayüzleriyle iyi temas, giyilebilir veya bükülebilir enerji cihazlarında mekanik dayanım ve MOF-polimer hibritlerinde MOF kristallerinin gevrekliğini telafi etmek açısından kritiktir. PEO ve PVK yüksek zincir hareketliliği sayesinde ince ve esnek filmler oluşturabilirken, nispeten daha rijit yapıları PEDOT kompozitler, katkı maddeleri veya elastomer karışımlarıyla oldukça esnek hâle getirilebilir.

İyonik ve elektriksel iletkenlik, enerjiyle ilişkili polimerlerin işlevlerinin temel belirleyicilerindendir. PEO, eter oksijen gruplarının Li^+ ve diğer katyonlarla koordinasyonu sayesinde yaygın olarak çalışılan bir polimer elektrolittir ve amorf bölgelerindeki segmental hareketlilik iyon taşınımını destekler. PEDOT ve PVK gibi iletken polimerler ise π -konjuge omurgaları boyunca delokalize yük taşıyıcıları ile elektronik iletkenlik sağlar. PEDOT (özellikle PEDOT:PSS formunda) süperkapasitörlerden enerji hasat cihazlarına kadar pek çok alanda kullanılan yüksek iletkenliğe sahip bir malzemedir; iletkenliği dopantlar, işleme katkıları veya MOF/karbon yapılarıyla birleştirme yoluyla ayarlanabilir. PVK doğal hâliyle yüksek iletken olmasa da katkıma veya foto-uyarılma durumlarında etkin yük taşınımı sağlayarak özellikle optoelektronik ve fotovoltaiik uygulamalarda önemli bir rol oynar. Bu polimerlerdeki iyonik ve elektronik yolların bir arada bulunabilmesi, hibrit elektrolitlerde karma iletkenlik veya elektrot kaplamalarında hızlı yük transferi gibi gelişmiş enerji işlevlerini mümkün kılar (Şekil 1.3) (Dëdek et al., 2022a; Kermanshahi et al., 2025; Wu et al., 2025).



Şekil 1.3. CP, MOF ve MOF@CP Sinerjik Özelliklerinin Şematik Görünümü

Kimyasal kararlılık, polimer tabanlı enerji bileşenlerinin uzun vadeli güvenilirliği için kritik bir özelliktir. Enerji cihazları yüksek sıcaklık, nem, oksidatif ortamlar veya reaktif türler gibi zorlu koşullarda çalıştığından, kullanılan polimerlerin zincir kırılması, oksidasyon veya hidroliz gibi bozunma mekanizmalarına karşı direnç göstermesi gerekir. PEO birçok pil ortamında kararlı olmakla birlikte zamanla kristalleşmeye eğilimlidir; çapraz bağlama veya karışım yöntemleri bu durumu iyileştirir. PEDOT, süperkapasitör ve elektrokimyasal sistemlerde çoklu döngüler boyunca işlevini sürdürebilen yüksek redoks kararlılığıyla bilinir. PVK ise aromatik yapısının sağladığı fotokimyasal ve termal dayanım nedeniyle güneş enerjisi ve optoelektronik uygulamalarda güvenilir performans sunar. Polimerlerle MOF'ların birleştirilmesi, MOF partiküllerinin stabilize edici dolgu görevi görmesi veya polimerlerin metal merkezleri pasive etmesi gibi ek kararlılık avantajları da sağlar. Polimerlerin enerji uygulamalarındaki en cazip özelliklerinden biri de kolay işlenebilirlik ve ölçeklenebilirliktir. Yüksek sıcaklık veya basınç gerektiren inorganik malzemelerin aksine polimerler çözelti dökümü, elektrospindleme, yüzeyde veya gözenek içinde in situ polimerizasyon, baskı ve kaplama teknikleri gibi düşük maliyetli yöntemlerle üretilir. PEO bazlı elektrolitler basitçe polimer ve tuzun çözülmesi ve solventin buharlaştırılmasıyla hazırlanabilir; PEDOT:PSS su bazlı olması sayesinde geniş alanlı iletken kaplamalar için uygundur; PVK ise spin-

coating veya baskı teknikleriyle kolaylıkla işlenebilir ve bu durum güneş pilleri ve LED'ler gibi cihazların ölçeklenebilir üretimine katkıda bulunur (Durán-Egido et al., 2025; Namsheer & Rout, 2021; Prunet et al., 2021).

Sonuç olarak, enerji teknolojilerinde kullanılan polimerler mekanik esneklik, ayarlanabilir iyonik/elektriksel iletkenlik, yüksek kimyasal kararlılık ve basit-ölçeklenebilir üretim gibi benzersiz özellikleri bir araya getirir. Bu özellikler polimerleri hem geleneksel hem de yeni nesil enerji cihazları için vazgeçilmez kılar. Ayrıca polimerlerin yüksek yüzey alanlı ve düzenli yapıları MOF'larla birleştirilmesi, bu özelliklerin daha da geliştirilmesine ve sinerjik avantajlara sahip üstün hibrit malzemelerin ortaya çıkmasına olanak tanır.

2.2 Enerji ile İlgili MOF Özellikleri

Metal-organik kafesler (MOF'lar), enerji, çevre ve adsorpsiyon uygulamaları için en umut verici malzeme sınıflarından biri olarak öne çıkar; bunun nedeni yapısal ve kimyasal özelliklerinin benzersiz birleşimidir. MOF'lar yüksek yüzey alanı, iyi tanımlanmış ve ayarlanabilir gözenek yapısı, değiştirilebilir metal merkezleri ve fonksiyonelleştirilebilir organik bağlayıcılar gibi temel özelliklere sahiptir. Bu özellikler, onları enerjiyle ilgili uygulamalar için son derece çekici hâle getirir. MOF'ların en belirgin avantajlarından biri, olağanüstü büyük iç yüzey alanıdır. Metal düğüm kümeleri ve organik bağlayıcılarla inşa edilen MOF'lar, son derece gözenekli ve açık çerçeve yapıları oluşturur; bu, geleneksel gözenekli malzemelerin (aktif karbonlar, zeolitler vb.) çok ötesinde yüzey alanı sağlar. Yüksek yüzey alanı, adsorpsiyon, konuk-madde etkileşimleri, iyon taşınımı veya katalitik reaksiyonlar için geniş iç arayüzler sunar. Enerji uygulamalarında, örneğin gaz depolama (H_2 , CH_4), CO_2 yakalama veya piller ve süperkapasitörlerde iyon depolama gibi alanlarda, büyük yüzey alanı birim kütle başına yüksek kapasite ve aktif bölgelerin verimli kullanılmasını sağlar. Bu nedenle MOF'lar, yüksek adsorpsiyon kapasitesi veya yoğun etkileşim gerektiren uygulamalarda mükemmel iskelet veya taşıyıcı görevi görür ve birçok geleneksel malzemeyi geride bırakır (Sher et al., 2024).

MOF'lar sadece gözenekli olmakla kalmaz, aynı zamanda metal düğümler, organik bağlayıcılar ve sentez koşullarının seçimiyle gözenek boyutları, şekilleri ve topolojisi üzerinde hassas kontrol sağlar. Bu ayarlanabilirlik, mikrogözeneklerden (<2 nm) mezogözeneklere (2–50 nm) kadar ve gelişmiş sistemlerde hiyerarşik çok ölçekli gözenekliliğe (mikro + mezo + makro) olanak tanır. Bu tanımlı gözenek yapısı, boyut, şekil veya kinetik/termodinamik uyumluluğa göre konuk türlerin seçici adsorpsiyonu ve ayrımı, hiyerarşik yapı sayesinde hızlı difüzyon ve taşınım, ayrıca büyük veya

işlevsel moleküllerin gözeneklere yerleşmesi gibi avantajlar sağlar. Böylece MOF'lar, gaz ayrımı, kataliz, depolama ve hibrit malzeme tasarımı gibi çok çeşitli enerji ve adsorpsiyon görevleri için özelleştirilebilir (Sandhu et al., 2024).

MOF'lardaki metal düğümler, yapısal omurga oluşturma yanısıra çerçevenin kimyasal reaktivitesini ve redoks özelliklerini de belirler. Farklı metal türleri (ör. Zn, Zr, Cu, Fe) veya karışık metal kompozisyonları seçilerek redoks davranışı, katalitik aktivite, bağlanma afinitesi ve kimyasal kararlılık gibi özellikler ayarlanabilir. Metal merkezlerinin bu şekilde ayarlanabilir olması, enerji dönüşümü (elektrokataliz, su ayrıştırma, CO₂ indirgeme), redoks aracılı depolama ve yakıtla ilgili reaksiyonlar için katalitik veya redoks aktif bölgeler sağlarken, açık metal merkezleri gaz molekülleri (H₂, CO₂, CH₄) veya diğer konuklarla güçlü etkileşim kurarak adsorpsiyon kapasitesini ve seçiciliği artırır. Ayrıca, metal seçimine bağlı olarak MOF'ların kimyasal ve termal kararlılığı optimize edilebilir, bu da gerçek dünyadaki enerji uygulamaları için kritik bir faktördür (Dedek et al., 2022b). MOF'lardaki organik bağlayıcılar yalnızca yapısal boşluklar sağlamakla kalmaz; aynı zamanda gözeneklere istenilen etkileşimleri, kimyasal ortamları veya işlevsel özellikleri kazandırmak için kimyasal “kulp” görevi görür. Bağlayıcılara polar fonksiyonel gruplar (–NH₂, –OH, –COOH), heteroatomlar, aromatik halkalar veya diğer fonksiyonel moceküller eklenebilir. Bu sayede adsorpsiyon seçiciliği, kimyasal reaktivite, katalitik potansiyel ve çerçevenin stabilitesi gibi özellikler ayarlanabilir. Bağlayıcıların seçimi veya modifikasyonu, MOF'ların belirli uygulamalara göre “programlanmasına”, moleküler düzeyde kimyasal ortamın şekillendirilmesine ve hibrit malzemelerin entegrasyonuna imkân tanır. Tüm bu özelliklerin birleşimi — yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir ve hiyerarşik gözeneklilik, değiştirilebilir metal merkezleri ve fonksiyonelleştirilebilir bağlayıcılar — MOF'ları son derece çok yönlü bir platform hâline getirir. Bu çok yönlülük, yüksek kapasiteli gaz veya yakıt depolama ve ayrımı, metal merkezler ve özel gözenek ortamları kullanarak kataliz ve enerji dönüşümü, polimerler, iletken dolgu maddeleri, elektrolitler, katalizörler veya diğer işlevsel bileşenlerin entegre edilebileceği hibrit malzemeler için taşıyıcı iskeletler, gaz filtreleme ve CO₂ yakalama gibi seçici membran ve filtre uygulamaları ile enerji depolama cihazlarında verimli iyon ve konuk madde yerleşimi gibi çok sayıda uygulamada avantaj sağlar. Sistematik incelemeler ve kritik değerlendirmeler, doğru tasarım ve sentezle MOF'ların geleneksel gözenekli malzemelere kıyasla enerjiyle ilişkili uygulamalarda önemli ölçüde üstün performans sergileyebileceğini göstermektedir (Feng et al., 2019; Tao & Xu, 2024).

2.3 Polimer–MOF Hibritlerinin Avantajları

Polimerlerin metal-organik kafesler (MOF’lar) ile entegrasyonu, enerjiyle ilişkili malzemelerin geliştirilmesinde son derece umut verici bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Polimer–MOF hibritleri, her iki bileşenin benzersiz özelliklerini sinerjik olarak birleştirerek, bir dizi kritik parametrede geliştirilmiş performans sağlar. MOF’lar olağanüstü yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözeneklilikleriyle bilinir; ancak organik bağlayıcıları ve metal düğümleri nedeniyle doğal elektriksel iletkenlikleri genellikle sınırlıdır. Polimetilen oksit (PEO), poli(3,4-etilendioksitofen) (PEDOT) veya poli(vinil karbazol) (PVK) gibi iletken polimerlerin MOF matrislerine eklenmesi, hem elektriksel hem de iyonik iletkenliği önemli ölçüde artırır. İletken polimerler sürekli elektron yolları sağlar ve hibrit malzeme içinde daha hızlı yük taşınımına olanak tanır. Bu geliştirme, yüksek iletkenliğin doğrudan daha iyi enerji ve güç yoğunluklarına dönüştüğü piller ve süperkapasitörler gibi uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Son çalışmalar, polimer infiltrasyonu veya MOF gözeneklerine bağlanmasının, elektron ve iyon hareketini kolaylaştıran perkolasyon ağları oluşturabileceğini ve saf MOF’larda tipik olan iletkenlik sınırlamasını aşabileceğini göstermektedir (Dëdek et al., 2022b; Ma et al., 2025a).

Saf MOF kristalleri genellikle kırılgandır ve mekanik stres veya termal döngüleme altında bozulabilir; bu da pratik kullanımlarını sınırlar. Polimerler esneklik ve dayanıklılık sağlayarak hibritin mekanik bütünlüğünü iyileştirir. Bu etki, polimerlerin termal genleşme ve büzölmeye tampon görevi görmesi nedeniyle termal kararlılığı da artırır; tekrarlayan kullanımlar sırasında çatlama veya parçalanma olasılığı azalır. Ortaya çıkan polimer–MOF kompozitleri, esnek veya giyilebilir cihazlar için daha uygundur ve daha zorlu çalışma ortamlarına dayanabilir. Örneğin, MOF partiküllerine polimer kaplama veya kabuk eklenmesi, termal ve mekanik stres altında kristallik ve gözenekliliğin korunmasına yardımcı olur (Ma et al., 2025a).

Enerji depolama cihazlarında uzun vadeli çevrim kararlılığı hayati öneme sahiptir. Polimer–MOF hibritleri, artırılmış iletkenlikleri, mekanik dayanıklılıkları ve şarj/deşarj döngüleri sırasında hacim değişimlerini karşılayabilme yetenekleri sayesinde geliştirilmiş çevrim performansı sergiler. Polimer matrisi MOF parçacıklarının kümelenmesini önler ve yapısal bozulmayı azaltırken verimli iyon taşınımını sürdürür. Bu hibritler, saf MOF veya polimer elektrotlara kıyasla kapasite kaybını azaltır ve uzun döngü ömrü sunar. Ayrıca polimerler, stabil katı elektrolit ara yüzlerinin oluşmasını kolaylaştırarak pil güvenliğini ve performansını artırır.

MOF'ların en önemli avantajlarından biri, gaz moleküllerinin seçici olarak adsorbe edilmesine olanak tanıyan son derece ayarlanabilir gözenek yapılarıdır; bu gazlar arasında hidrojen (H_2), metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) yer alır. Polimerlerle birleştiğinde, bu hibritler seçici gaz alımı ve ayrımı gerçekleştirebilir ve stabilite ile işlenebilirlik açısından avantaj sağlar. Polimerler, yüzey kimyasını özelleştirebilir, istenmeyen difüzyon yollarını engelleyebilir veya MOF gözenekliliğini ve seçiciliğini koruyan koruyucu matrisler olarak işlev görebilir. Bu hibritler, gaz depolama, yakıt saflaştırma ve karbon-nötr enerji teknolojileri için CO_2 yakalama gibi uygulamalarda umut vadeder (Dedek et al., 2022a; Kalaj et al., 2020).

3. Polimer–MOF Hibritlerinin Enerji Uygulamaları

Polimerler ve metal-organik kafesler (MOF'lar) bir araya getirildiğinde, gaz/yakıt depolama ve ayrımı, enerji depolama (piller ve süperkapasitörler), enerji dönüşümü (yakıt hücreleri, güneş/ fotokataliz) ve enerji toplama veya katalitik süreçler gibi geniş bir enerji uygulamaları yelpazesi için son derece esnek ve çok yönlü bir platform oluştururlar. Polymer–MOF hibritleri, her iki bileşenin benzersiz özelliklerini birleştirerek performansı artırır: MOF'lar yüksek yüzey alanı, ayarlanabilir gözenek yapısı, fonksiyonelleştirilebilir metal merkezleri ve organik bağlayıcılarla gaz depolama ve ayrımı, kataliz, enerji dönüşümü ve depolama için ideal iskeletler sağlar. Polimerler ise mekanik esneklik, iletkenlik, işlenebilirlik ve çevresel kararlılık kazandırarak, hibrit malzemelerin gerçek dünya uygulamalarına uygun hale gelmesini sağlar .

Gaz depolama ve ayrımında, polimer–MOF hibritleri özellikle hidrojen (H_2), metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) için dikkat çekicidir. MOF'ların yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve seçici gözenek kanalları, polimer matrisle birleştirildiğinde mekanik dayanıklılık, işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik sunar; bu, tanklar, membranlar veya ayırma üniteleri gibi pratik uygulamalar için önemlidir. Karma polimer-MOF membranlar (mixed-matrix membranes, MMM) CO_2/CH_4 seçiciliği ve permeabilitiyi artırırken, arayüz kusurlarını ve plastikleşmeyi azaltır.

Enerji depolama uygulamalarında, saf MOF'lar düşük elektriksel iletkenlik ve sınırlı yük taşıma kapasitesi nedeniyle doğrudan elektrot veya elektrolit olarak kullanılamaz. Hibritleşme, iletken polimerler veya polimer matrisine gömülü MOF malzemeleri aracılığıyla bu sınırlamaları aşar, böylece süperkapasitörlerde spesifik kapasite, hız performansı ve döngü stabilitesi artar. Benzer şekilde, hibrit polimer–MOF kompozit elektrolitler, iyon taşınımını iyileştirir, iyon kanallarını düzenler ve dendrit

oluşumu veya elektrolit bozunumu gibi sorunları azaltabilir. MOF kaynaklı gözenekli karbonlar, iletken polimer kaplamalar veya kompozit mimarilerle birleştirildiğinde yüksek kapasiteli elektrotlar veya süperkapasitör malzemeleri için ideal bir yol sunar (Ma et al., 2025b; Y. Wang et al., 2024b).

Enerji dönüşümü alanında, polimer-MOF hibritleri proton iletken membranlar, güneş-yakıt üretimi, fotokataliz ve diğer katalitik enerji süreçlerinde etkili özellikler gösterir. MOF'ların gözenekli yapısı ve proton iletken yolları, polimer matrisle birleştirildiğinde su tutma, proton hareketliliği ve mekanik dayanıklılığı artırarak yakıt hücreleri veya akışkan pillerin performansını yükseltebilir. MOF kaynaklı gözenekli metal-oksit filmler ise ışık absorplayıcılar için stabil bir iskelet sağlayarak fotovoltaiik ve fotoelektrokimyasal uygulamalarda yük taşıma ve ayrımı destekler. Ayrıca hibritler, katalitik veya adsorpsiyon aktif çerçeveleri polimer veya karbon iletken ağlarla birleştirilerek etkin elektron/proton iletimi, yapısal sağlamlık ve üretilebilirlik sağlar.

Enerji toplama ve kataliz uygulamalarında (termoelektrik, piezoelektrik, OER/HER, CO₂ indirgeme, biyokütle dönüşümü), polimer-MOF hibritleri mekanik ve termal stabiliteyi artırır, çevresel dayanıklılığı geliştirir ve elektriksel özellikleri iyileştirir. MOF metal merkezleri katalitik olarak aktif kalarken, polimer veya karbon matrisler iletkenlik ve yapısal bütünlüğü destekler. Bu hibrit yaklaşım, yüksek yüzey alanı, katalitik merkezler ve iletken yolları bir araya getirerek çok işlevli sistemler oluşturur; adsorpsiyon, kataliz ve iletimi tek bir malzemede birleştirmek mümkün olur (Dėdek et al., 2022c; Szcze'sniak et al., 2025).

Her ne kadar polimer-MOF hibritleri büyük potansiyele sahip olsa da, pratik uygulamalara geçişte üretim, stabilite ve performans sorunları gibi zorluklar bulunmaktadır. Kompozit elektrolitlerde MOF dolgu maddelerinin polimer zincir dinamiği ve iyon taşınımına etkisi tam olarak anlaşılmamış, gaz ayırım membranlarında uzun dönem kararlılık ve endüstriyel koşullarda yeniden üretilebilirlik hâlâ sorun teşkil etmektedir. MOF tabanlı elektrotlarda düşük iletkenlik hâlen bir sınırlamadır; hibritleşme yardımcı olsa da homojen perkolasyon ve arayüz kalitesini sağlamak zordur (Ma et al., 2025b; Y. Wang et al., 2024b).

Genel olarak, polimer-MOF hibritleri MOF'ların adsorpsiyon, gözeneklilik, katalitik potansiyel ve yüksek yüzey alanını polimerlerin iletkenlik, esneklik, işlenebilirlik ve mekanik kararlılığı ile birleştirilerek, saf MOF veya saf polimerin sınırlamalarını aşar. Gaz/yakıt depolama ve ayrımı, piller, süperkapasitörler, yakıt hücreleri, fotokatalitik H₂ üretimi, kataliz ve enerji toplama gibi uygulamalarda, bu hibrit malzemeler sürdürülebilir

ve düşük karbonlu bir enerji geleceğinde önemli rol oynama potansiyeline sahiptir. Araştırmalar arayüz uyumu, uzun dönem stabilite, ölçek büyütme ve yeniden üretilebilirlik gibi kalan zorlukları çözdükçe, hibritlerin daha fazla demo ve ticari ölçekli uygulamaları ortaya çıkacaktır.

4. Zorluklar ve Gelecek Yönelimler

Polimer–MOF hibritleri enerji uygulamaları için büyük bir potansiyel taşıırken, laboratuvar ölçeğindeki başarıları gerçek dünya teknolojilerine taşımak için aşılması gereken birkaç kritik zorluk bulunmaktadır. MOF’lar çoğu zaman nem, su veya elektrokimyasal olarak agresif koşullara karşı hassastır; pil döngüsü veya yakıt hücresi çalışması sırasında maruz kalınan reaktif türler MOF kristal yapısının bozulmasına, gözeneklerin çökmesine veya metal merkezlerin çözülmesine yol açabilir. Polimerle birleştirildiğinde, hibrit arayüz bu kararlılık sorunlarını daha da artırabilir. Bu nedenle, gerçek çalışma koşulları altında uzun dönem kimyasal, termal ve elektrokimyasal stabilite sağlamak hâlâ bir zorluktur (Argirusis et al., 2025). Hibrit malzemelerin etkin olması, polimer matrisi ile MOF çerçevesi arasında yakın temas ve iyi uyumluluk gerektirir. Birçok bildirilen kompozitte arayüz kusurları, zayıf yapışma veya düzensiz dağılım gözlemlenmiştir; bu durum iyon/elektron taşınımını, mekanik bütünlüğü ve homojen performansı olumsuz etkiler. Fonksiyonelleştirme, uyum sağlayıcılar veya yüzey graftlama gibi yöntemlerle moleküller arası etkileşimleri optimize etmek ve homojen, kusursuz arayüzler oluşturmak önemlidir, ancak özellikle büyük ölçeklerde zordur (Cao et al., 2022). Laboratuvar ölçeğinde iyi performans gösteren hibritler, endüstriyel üretime ölçeklendirildiğinde yeni zorluklarla karşılaşır. Üretimde tekrar edilebilirlik, yüksek kaliteli MOF temini, çözücü kullanımı ve çevresel etkiler ile büyük alanlı filmler, membranlar veya hacimsel kompozitler için uygun üretim yöntemleri hâlâ sorun teşkil etmektedir. Ölçeklenebilir ve maliyet-etkin sentez ve işleme yöntemleri olmadan, polimer–MOF hibritleri akademik prototiplerin ötesine geçemez (Lacim et al., 2025; Pander et al., 2023; Vrtovec et al., 2023).

Elektriksel iletkenlik açısından birçok MOF hâlâ yalıtkan özelliktedir. İletken polimerler veya dolgu maddeleri bu sorunu kısmen telafi etse de, ideal olarak MOF’un kendisi ya da türevleri iyonik/elektronik iletimi desteklemelidir. Gözenekliliği ve yapısal stabiliteyi koruyan intrinsik iletken veya redoks-aktif MOF’ların geliştirilmesi, yüksek performanslı hibrit elektrotlar, katı elektrolitler ve elektrokimyasal cihazlar için acil bir ihtiyaçtır.

Geleceğe baktığımızda, polimer–MOF hibritlerinde birkaç umut verici yön öne çıkmaktadır: esnek ve giyilebilir enerji cihazları, MOF gözenekliliği

ile polimer ağ stabilitesini birleştiren katı elektrolitler, 2D veya katmanlı MOF mimarileri, sürdürülebilir ve çevre dostu sentez yöntemleri, biyolojik kökenli polimerler ve çok işlevli hibrit sistemler (depolama + kataliz + ayırım gibi). Bu yönler, hibrit malzemelerin pratik uygulanabilirliğini ve performansını büyük ölçüde artırabilir.

5. Sonuç

Polimer–MOF hibritleri, MOF’ların yapısal ve kimyasal çeşitliliği ile polimerlerin esnekliği, işlenebilirliği ve genellikle iletkenliğinin sağladığı benzersiz bir sinerji sunar. Bu sinerji doğru şekilde kullanıldığında, yüksek gözeneklilik, ayarlanabilir fonksiyonellik, iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve uygulamaya özel özellikler kazandırarak çok çeşitli enerji uygulamalarına uygun malzemeler ortaya çıkarır.

Gelecek nesil enerji sistemlerinde — ileri piller, süperkapasitörler, gaz depolama ve ayırım birimleri, yakıt hücreleri ve esnek/giyilebilir enerji cihazları dahil — polimer–MOF hibritleri benzersiz avantajlar sunar. Ancak bu potansiyelin ölçeklenebilir şekilde gerçekleştirilmesi için, gerçek dünya koşullarında stabilite, arayüz mühendisliği, üretim ölçeklendirmesi ve intrinsik iletken MOF geliştirilmesi gibi zorlukların aşılması gereklidir. Gelecek araştırmaların, yalnızca kademeli iyileştirmelerle sınırlı kalmaması önemlidir. Bunun yerine yenilikçi hibrit tasarım stratejileri, yeşil ve ölçeklenebilir sentez yöntemleri, 2D ve katmanlı MOF mimarileri ile çok işlevli kompozit sistemlere odaklanmalıdır. Bu çabalar sayesinde, polimer–MOF hibritleri sürdürülebilir ve yüksek performanslı enerji teknolojileri için temel malzemeler haline gelebilir.

Kaynakça

- Argirusis, C., Alizadeh, N., Katsanou, M. E., Argirusis, N., & Sourkouni, G. (2025). Advances in Metal-Organic Frameworks (MOFs) for Rechargeable Batteries and Fuel Cells. *Batteries* 2025, Vol. 11, Page 192, 11(5), 192.
- Cao, Z., Momen, R., Tao, S., Xiong, D., Song, Z., Xiao, X., Deng, W., Hou, H., Yasar, S., Altin, S., Bulut, F., Zou, G., & Ji, X. (2022). Metal-Organic Framework Materials for Electrochemical Supercapacitors. *Nano-Micro Letters* 2022 14:1, 14(1), 181.
- Cui, M., Pei, M., & Kim, S. (2025). Recent advances in metal-organic framework-based inorganic composite electrodes for capacitors: a comprehensive review. *Advances in Industrial and Engineering Chemistry* 2025 1:1, 1(1), 8-.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022a). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022b). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Dědek, I., Kupka, V., Jakubec, P., Šedajová, V., Jayaramulu, K., & Otyepka, M. (2022c). Metal-organic framework/conductive polymer hybrid materials for supercapacitors. *Applied Materials Today*, 26, 101387.
- Durán-Egido, V., García-Giménez, D., Martínez-López, J. C., Pérez-Vidal, L., & Carretero-González, J. (2025). Metal-Organic Frameworks as Fillers in Porous Organic Polymer-Based Hybrid Materials: Innovations in Composition, Processing, and Applications. *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 1941, 17(14), 1941.
- Feng, L., Wang, K. Y., Lv, X. L., Yan, T. H., & Zhou, H. C. (2019). Hierarchically porous metal-organic frameworks: synthetic strategies and applications. *National Science Review*, 7(11), 1743.
- Ismail, K. M., Hefnawy, M. A., Hassan, S. S., & Medany, S. S. (2025). Synergistic Integration Nanoarchitectonics of Zn-MOF and Poly(1-Amino-9, 10-anthraquinone) for Enhanced Capacitor Performance. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 2025, 1-17.
- Kalaj, M., Bentz, K. C., Ayala, S., Palomba, J. M., Barcus, K. S., Katayama, Y., & Cohen, S. M. (2020). MOF-Polymer Hybrid Materials: From Simple Composites to Tailored Architectures. *Chemical Reviews*, 120(16), 8267-8302.
- Kermanshahi, P. K., Estaji, S., Zivari, E., Moghari, S., Poshtahani, P. A., Mof-takhari, S., & Khonakdar, H. A. (2025). A comprehensive review on electroactive MOF-reinforced nanocomposites: From material design to practical applications. *Materials Today Sustainability*, 32, 101229.

- Lacim, H., Molahalli, V., Prajongthath, P., Pattanaporkratana, A., Pathak, G., Phetthong, B., Hongkarnjanakul, N., & gptham, N. (2025). Porosity Tunable Metal-Organic Framework (MOF)-Based Composites for Energy Storage Applications: Recent Progress. *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 130, 17(2), 130.
- Ma, R., Hou, Y., Zhang, W., Pan, Y. T., Huo, S., & Shi, C. (2025a). MOF-based nanocomposites in polymer matrix: progress and prospects. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2025 8:5, 8(5), 351-.
- Ma, R., Hou, Y., Zhang, W., Pan, Y. T., Huo, S., & Shi, C. (2025b). MOF-based nanocomposites in polymer matrix: progress and prospects. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2025 8:5, 8(5), 351-.
- Namsheer, K., & Rout, C. S. (2021). Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. *RSC Advances*, 11(10), 5659–5697.
- Pander, M., Gil-San-Millan, R., Delgado, P., Perona-Bermejo, C., Kostrzewa, U., Kaczkowski, K., Kubicki, D. J., Navarro, J. A. R., & Bury, W. (2023). MOF/polymer hybrids through in situ free radical polymerization in metal-organic frameworks. *Materials Horizons*, 10(4), 1301–1308.
- Prunet, G., Pawula, F., Fleury, G., Cloutet, E., Robinson, A. J., Hadziioannou, G., & Pakdel, A. (2021). A review on conductive polymers and their hybrids for flexible and wearable thermoelectric applications. *Materials Today Physics*, 18, 100402.
- Sandhu, Z. A., Raza, M. A., Awwad, N. S., Ibrahim, H. A., Farwa, U., Ashraf, S., Dildar, A., Fatima, E., Ashraf, S., & Ali, F. (2024). Metal–organic frameworks for next-generation energy storage devices; a systematic review. *Materials Advances*, 5(1), 30–50.
- Schmidt, B. V. K. J., & Schmidt, B. V. K. J. (2020). Metal-Organic Frameworks in Polymer Science: Polymerization Catalysis, Polymerization Environment, and Hybrid Materials. *Macromolecular Rapid Communications*, 41(1), 1900333.
- Sher, F., Hayward, A., El Guerraf, A., Wang, B., Ziani, I., Hrnjić, H., Boškailo, E., Chupin, A., & Nemțanu, M. R. (2024). Advanced metal–organic frameworks for superior carbon capture, high-performance energy storage and environmental photocatalysis – a critical review. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(41), 27932–27973.
- Szcze’śniak, S., Marcinkowska, A., Gajewski, P., Chen, T., Reddy, N. P., & Li, M. (2025). Enhancing Solid-State Li-Ion Batteries with MOF–Polymer Composite Electrolytes—Effect Mechanisms and Interface Engineering. *Gels* 2025, Vol. 11, Page 946, 11(12), 946.

- Tao, Y. R., & Xu, H. J. (2024). A critical review on potential applications of Metal-Organic frameworks (MOFs) in adsorptive carbon capture technologies. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121504.
- Vrtovec, N., Jurjevec, S., Zabukovec Logar, N., Mazaj, M., & Kovačič, S. (2023). Metal Oxide-Derived MOF-74 Polymer Composites through Pickering Emulsion-Templating: Interfacial Recrystallization, Hierarchical Architectures, and CO₂ Capture Performances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(14), 18354–18361.
- Wang, W., Chen, D., Li, F., Xiao, X., & Xu, Q. (2024). Metal-organic-framework-based materials as platforms for energy applications. *Chem*, 10(1), 86–133.
- Wang, Y., Pan, T., Yuan, G., Li, Q., & Pang, H. (2024a). MOF and MOF-derived composites for flexible energy storage devices. *Composites Communications*, 52, 102144.
- Wang, Y., Pan, T., Yuan, G., Li, Q., & Pang, H. (2024b). MOF and MOF-derived composites for flexible energy storage devices. *Composites Communications*, 52, 102144.
- Wu, X., Kang, P., Zhang, Y., Guo, H., Yang, S., Zheng, Q., Wang, L., & Jiang, W. (2025). Highly electrically conductive MOF/conducting polymer nanocomposites toward tunable electromagnetic wave absorption. *Journal of Materials Science & Technology*, 205, 258–269.
- Yang, X., Cheng, T. C., & Morris, A. J. (2024). Polymer-grafted metal–organic frameworks: design, synthesis, and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(13), 4562–4592.

Çok Fonksiyonlu Polimerik Sistemler

Editör:

Nilay Akkuş Taş