

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, antikör vb.) immobilizasyonunu kolaylaştırarak biyosensör performansını artırır (Sandhyarani, 2019).

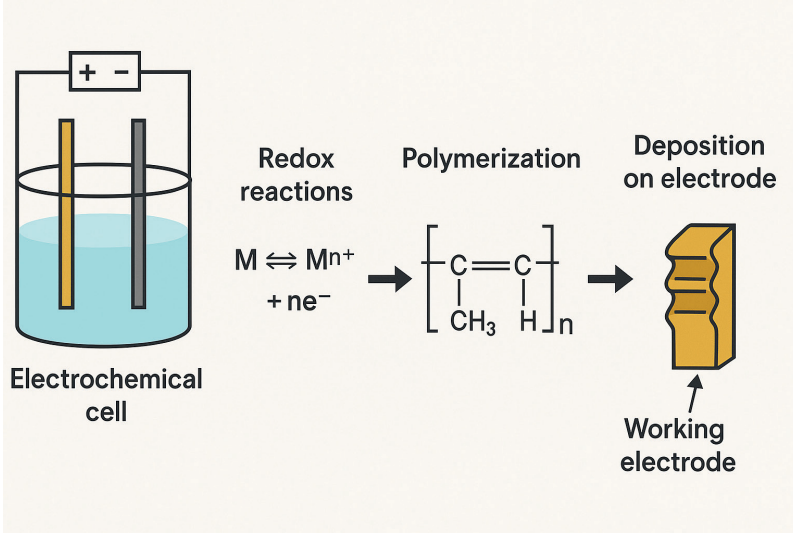
4.2. Nanokompozit ve Fonksiyonel Katkılar

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.



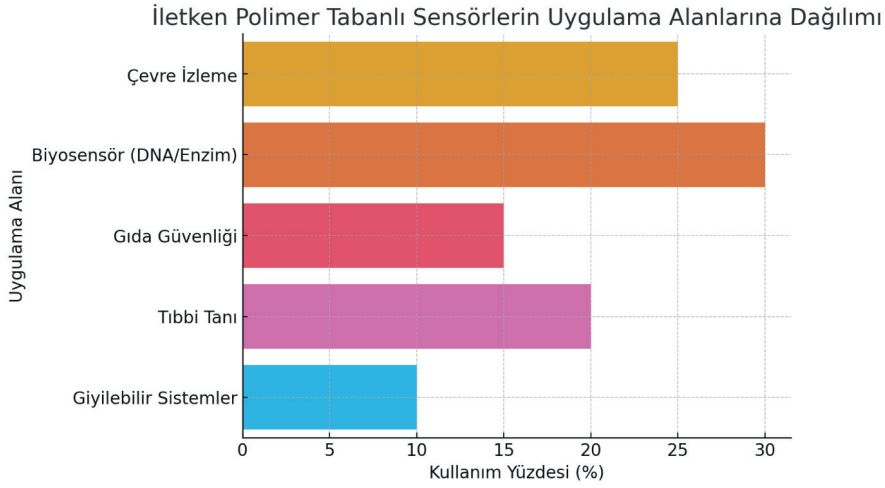
Şekil 1. Elektropolimerizasyon Sürecinin Temsili Diyagramı

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. Stabilité 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 problemin 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., & 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.
- 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., & 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.

- 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., & Prabhu, 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. *İsi 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).