

**BİYOMOLEKÜLLERİN TESPİTİNDE KULLANILAN NANOMALZEME
TABANLI BİYOSENSÖR TASARIMI VE UYGULAMALARI**

Muratcan ÇAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik

Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

İzmir

İzmir Bakırçay

Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim

Enstitüsü Ocak

2026

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen TEZ.2024.002 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir (Tez Çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmişse).

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

İzmir Bakırçay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında öğrenim görmekte olan Muratcan ÇAM ’ın “Biyomoleküllerin Tespitinde Kullanılan Nanomalzeme Tabanlı Biyosensör Tasarımı ve Uygulamaları” başlıklı tezi 19/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “İzmir Bakırçay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN	
Üye	Doç. Dr. Gülnur ÖNSAL	
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN	

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

JURY AND INSTITUTE APPROVAL

The thesis titled " Design and Applications of Nanomaterial Based Biosensors Used in Detection of Biomolecules" by Muratcan ÇAM, who is pursuing his studies in the Department of Electrical-Electronics Engineering at the Graduate School of İzmir Bakırçay University, was evaluated by the jury below on 19/12/2025 and was accepted as a Master's thesis in the Department of Electrical-Electronics Engineering in accordance with the relevant articles of the "İzmir Bakırçay University Graduate Education and Examination Regulations.."

Jury Members	Title Name Surname	Signature
Member (Thesis Advisor)	Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN	
Member	Doç. Dr. Gülnur ÖNSAL	
Member	Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN	

Director of the Postgraduate School
Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

ÖZET

BİYOMOLEKÜLLERİN TESPİTİNDE KULLANILAN NANOMALZEME TABANLI BİYOSENSÖR TASARIMI VE UYGULAMALARI

Muratcan ÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2026

Danışman: Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

İnsanlığın gelişimi açısından disiplinler arası çalışma ve farklı bilim dallarının etkileşimi sağlık alanında yeni teknolojilerin doğmasına olanak tanımaktadır. Bu yeniliklerden biri olan biyosensörler, biyolojik bir tanıma elemanı ile fiziksel bir dönüştürücünün birleşiminden oluşan, hedef analitleri hızlı, hassas ve özgül bir şekilde algılayabilen cihazlar olarak dikkat çekmektedir. Geleneksel analiz yöntemlerine kıyasla düşük maliyet, taşınabilirlik, gerçek zamanlı ölçüm imkânı ve kullanım kolaylığı gibi avantajlardan dolayı biyosensör araştırmaları son yıllarda büyük ivme kazanmıştır. Özellikle nanoteknoloji alanındaki gelişmeler, biyosensör performansını artırma konusunda önemli katkılar sağlamış, yüzey alanı, iletkenlik ve biyouyumluluk gibi özellikleri geliştiren nanomalzemeler sayesinde daha duyarlı ve seçici sensör sistemleri geliştirilebilmiştir. Bu gelişmeler, biyosensörlerin antibiyotik tespiti gibi halk sağlığını doğrudan etkileyen kritik uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada organik malzeme sınıfında yer alan Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) ile biyomalzeme olarak bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Polilaktik Asit (PLA) ve iz miktarda nanomalzeme tercih edilmiştir. Bu malzemeler ile üretilen biyosensörler Referans cihaz saf su, Diafuryl (1. antibiyotik) ve Enfexia (2. antibiyotik) kategorisine ayrılmış olup deneysel çalışma elektriksel ve optiksel karakterizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler grafiksel olarak analiz edildiğinde, 1:2 (P3HT:PLA) katkı oranına sahip

biyosensörlerde biyomalzemenin organik malzeme üzerinde negatif etki oluşturduğu ve biyosensörün hassasiyetini zayıflattığı gözlemlenmiştir. 2:1 (P3HT:PLA) katkı oranına sahip biyosensörlerin antibiyotikleri kararlı ve hassas bir şekilde tespit ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Biyosensör, P3HT:PLA, Nanomalzeme, Antibiyotik Tespiti, Karakterizasyon yöntemleri



ABSTRACT

DESIGN AND APPLICATIONS OF NANOMATERIAL BASED BIOSENSORS USED IN DETECTION OF BIOMOLECULES

Muratcan ÇAM

Department of Electrical and Electronics

Engineering

İzmir Bakırçay University, Graduate Education Institute, January 2026

Supervisor: Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Interdisciplinary work and interaction between different branches of science in terms of human development allow the emergence of new technologies in the field of health. One of these innovations, biosensors, are remarkable as devices that are composed of a biological recognition element and a physical transducer and can detect target analytes rapidly, sensitively and specifically. Biosensor research has gained great momentum in recent years due to advantages such as low cost, portability, real-time measurement and ease of use compared to traditional analysis methods. Developments in the field of nanotechnology in particular have made significant contributions to increasing biosensor performance, and more sensitive and selective sensor systems have been developed thanks to nanomaterials that improve properties such as surface area, conductivity and biocompatibility. These developments enable the use of biosensors in critical applications that directly affect public health, such as antibiotic detection.

In this study, Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT), which is in the organic material class, and Polylactic Acid (PLA), which is widely used in scientific studies as a biomaterial, and trace amounts of nanomaterials were preferred. Biosensors produced with these materials were divided into device, pure water, Diafuryl (1st antibiotic) and Enfexia (2nd antibiotic) categories and the experimental study was carried out using electrical and optical characterization methods. When the obtained data were analyzed graphically, it was observed that the biomaterial had a negative effect on the organic material in biosensors with 1:2 (P3HT:PLA) contribution rate and weakened the

sensitivity of the biosensor. It was concluded that biosensors with 2:1 (P3HT:PLA) contribution rate detected antibiotics stably and sensitively.

Keywords: Biosensor, Nanomaterial, P3HT:PLA, Antibiotic Detection, Characterization methods



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca sürekli destek olan ve tez çalışmam sırasında karşılaştığım her zorlukta tecrübesi ve bilgi birikimi ile her daim yanımda olup yardımlarını benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tez yazımı ve deneylerin yapılması aşamalarında yanımda olan saygıdeğer Arş. Gör. Burak TAŞ'a sabır ve desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tezimde gerekli olan nanomalzemelerin tedarikinin sağlanmasında sayın Prof. Dr. Ümit Hüseyin KAYNAR'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans çalışmalarım ve tüm eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen, bugünkü değerlerime ulaşmamda her zaman yanımda olan annem, babam ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, İzmir Bakırçay Üniversitesi BAP-TEZ.2024.002 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

Muratcan ÇAM

İzmir-2026

16/01/2026

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın İzmir Bakırçay Üniversitesi tarafından kullanılan Turnitin bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Muratcan ÇAM

STATEMENT OF COMPLIANCE WITH ETHICAL PRINCIPLES AND RULES

I hereby truthfully declare that this thesis is an original work prepared by me; that I have behaved in accordance with the scientific ethical principles and rules throughout the stages of preparation, data collection, analysis and presentation of my work; that I have cited the sources of all the data and information that could be obtained within the scope of this study, and included these sources in the references section; and that this study has been scanned for plagiarism with Turnitin scientific plagiarism detection program used by İzmir Bakırçay University, and that “it does not have any plagiarism” whatsoever. I also declare that, if a case contrary to my declaration is detected in my work at any time, I hereby express my consent to all the ethical and legal consequences that are involved.

Muratcan ÇAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
JURY AND INSTITUTE APPROVAL	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	ix
STATEMENT OF COMPLIANCE WITH ETHICAL PRENCIPLES AND RULES	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nanoteknoloji.....	4
1.2. Nanomalzeme	7
1.3. Biyomoleküller	9
2. BİYOSENSÖRLER.....	12
2.1. Nanoteknolojinin Biyosensörlerde Kullanılma Nedenleri	14
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Biyosensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler	15
3.2. Alttaşların Temizliği	15
3.3. Kaplama Çözeltilisinin Hazırlanması	17
3.4. Alttaşların Kaplama İşlemi.....	18
3.5. Gümüş Pasta İle Kontakların Yapılması	19
3.6. Elektriksel Karakterizasyon Testleri İçin Kullanılan Ölçüm Cihazı.....	20
3.7. Optiksel Karakterizasyon Testleri İçin Kullanılan Ölçüm Cihazı.....	20
4. BULGULAR	22
4.1. Üretilen Biyosensörlerin Elektriksel Karakterizasyonu	22
4.1.1. 1:2 oranında P3HT:PLA içeren biyosensörlerin elektriksel karakterizasyonu.....	23
4.1.2. 2:1 oranında P3HT:PLA içeren biyosensörlerin elektriksel karakterizasyonu.....	28
4.2. Üretilen Biyosensörlerin Optiksel Karakterizasyonu	34
4.2.1. 1:2 oranında P3HT:PLA içeren biyosensörlerin optiksel karakterizasyonu.....	34
4.2.2. 2:1 oranında P3HT:PLA içeren biyosensörlerin optiksel karakterizasyonu.....	39

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKÇA	46
ÖZGEÇMİŞ	48



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Giyilebilir biyosensörler ile ilgili örnek tablo.....	3
Tablo 1.2. Nano boyut ile ilgili örnek tablo.....	5
Tablo 1.3. Nano malzemeler ile ilgili örnek tablo.....	8
Tablo 1.4. Biyomoleküller ile ilgili örnek tablo.....	11
Tablo 4.1. Saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensöre ait akım-gerilim değerleri.....	24
Tablo 4.2. Saf su damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri.....	25
Tablo 4.3. Diafuryl antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığına alınan akım değerleri	26
Tablo 4.4. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığına alınan akım değerleri	27
Tablo 4.5. Saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensöre ait akım-gerilim değerleri.....	29
Tablo 4.6. Saf su damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri.....	31
Tablo 4.7. Diafuryl damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığına alınan akım değerleri	32
Tablo 4.8. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığına alınan akım değerleri	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Biyosensörün temel çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi	2
Şekil 1.2. Nano boyut ile ilgili örnek görsel.....	7
Şekil 2.2. Biyosensörün temel algılama prensibi.....	13
Şekil 3.1. Alttaş lamaların eşit olarak kesilme sürecinin görüntüsü	15
Şekil 3.2. Lamaların saf su doldurulmuş beherlere yerleştirilmesi.....	16
Şekil 3.3. Beherlerin ultrasonik temizleme cihazına yerleştirilmesi	16
Şekil 3.4. Organik malzeme ve biyomalzemelerin vial tüplere kloroform ile birlikte eklenmesi.....	17
Şekil 3.5. Isı tablası üzerine (a) P3HT ve PLA malzemelerinin manyetik karıştırılma işlemi ve (b) P3HT:PLA karışımının 1:2 ve 2:1 oranlarında manyetik olarak karıştırılma işlemi.....	18
Şekil 3.6. Cam lam üzerine yapılan spin kaplamanın şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.7. Spin kaplama işlemi için kullanılan cihaz.....	19
Şekil 3.8. Gümüş pasta ile kontak yapılmış biyosensörler.....	19
Şekil 3.9. Elektriksel karakterizasyon testinde kullanılan (a). Keithley 2450 model cihaz ve (b) ölçümler için özel prob sistemi	20
Şekil 3.10. Biyosensör optiksel karakterizasyon testlerinde kullanılan UV-Vis spektrofotometre N4S model ölçüm cihazı	21
Şekil 3.11. UV-Vis spektrofotometre N4S model ölçüm cihazında ölçümlerin gerçekleştirilmesi için lamaların yerleştirildiği bölüm.....	21
Şekil 4.1. Elektriksel karakterizasyon testleri görseli	22
Şekil 4.2. 1:2 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.....	23
Şekil 4.3. Saf su damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.....	24
Şekil 4.4. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.....	25
Şekil 4.5. Enfexia damlatılmış biyosensörün elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.....	26
Şekil 4.6. Biyosensörlere farklı analit uygulamalarının elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği kıyaslaması	27

Şekil 4.7. 2:1 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.....	28
Şekil 4.8. Üzerine saf su damlatılan biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.....	30
Şekil 4.9. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.....	31
Şekil 4.10. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.....	32
Şekil 4.11. Farklı analitler kullanılarak test edilen biyosensörlere ait akım-gerilim grafiklerinin karşılaştırmalı analizi.....	33
Şekil 4.12. 1:2 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.....	35
Şekil 4.13. Saf su damlatıldıktan sonra test edilen biyosensöre ait UV-Vis ölçüm grafiği..	36
Şekil 4.14. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.....	37
Şekil 4.15. Enfexia antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.....	38
Şekil 4.16. Biyosensörlere uygulanan farklı analitler sonucu ölçülen soğurma-dalga boyu grafikleri ve bunların karşılaştırılması.....	39
Şekil 4.17. 2:1 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.....	40
Şekil 4.18. Saf su damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği.....	41
Şekil 4.19. Diafuryl damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği	42
Şekil 4.20. Enfexia damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği	43
Şekil 4.21. Farklı analitler kullanılarak test edilen biyosensörlere ait soğurma-dalga boyu grafikleri ve bunların karşılaştırılması.....	44

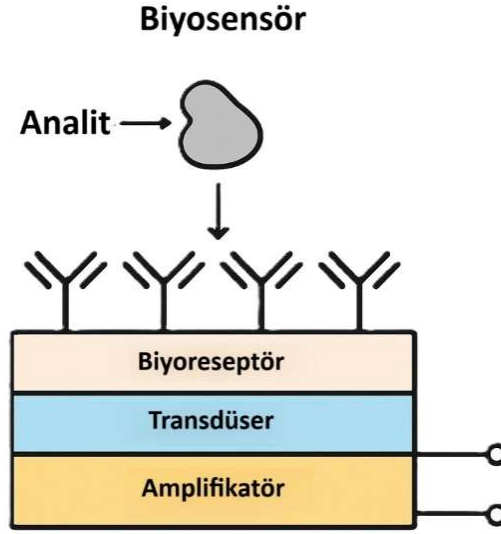
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

PLA	: Polilaktik Asit
P3HT	: Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl)
AC	:Doğru akım
DC	: Alternatif akım
I	: Akım
I-V	: Akım-gerilim
V	:Voltaj
UV	:Ultraviyole

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye paralel olarak, biyomedikal teknolojisi alanında da son 30 yılda ciddi ilerlemeler kaydedilmiş olup biyosensörlerin bu ilerlemeye katkısı büyüktür. 1962 yılında tanıtılan ilk biyosensör kandaki glikoz seviyelerini ölçmek için kullanıldı. Clark ve Lyons tarafından tanıtılan bu buluş, glikoz konsantrasyonunu doğrudan ölçmeye olanak sağlayan amperometrik bir oksijen elektrotu yüzeyine oksidaz enzimi eklenerek gerçekleştirildi. Clark ve Lyons, elektrokimyasal sensörlerin (pH, polarografik, potansiyometrik ya da kondüktometrik) daha akıllı hale nasıl getirilebileceğini açıklamış ve bu sensörlerin işlevini arttırmak için membranla kaplanmış dönüştürücülerden bahsetmişlerdir [1].

Biyosensör, biyolojik bir tanıma unsuru kullanarak belirli bir niceliksel veya yarı niceliksel bilgi sağlama kapasitesine sahip, kendi kendine entegre bir sistemdir. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) biyosensörleri şöyle tanımlamıştır: Biyosensörler kimyasal bir maddeye verilen biyolojik cevabı optik, termal veya elektrik sinyallerine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Bir biyosensör temelde kompakt bir analitik sistemdir. Bu sistem bir tanıma elemanı ve bir dönüştürücüye sahiptir. Tam fonksiyonel bir biyosensör, biyolojik tanıma elemanlarını, biyo-etkileşimleri ölçülebilir bir sinyale dönüştüren bir dönüştürücü ve bu sinyali okunabilir verilere dönüştürmek için bir sinyal işleme sistemi içerir. Bu yapıda, prob ve analit arasındaki reaksiyon, kimyasal değişiklikler (yeni bir kimyasalın üretimi, yük akışı, ısının serbest bırakılması, kütle ve pH değişimi) ile tetiklenir. Sinyal işleme sistemi çıkışı güçlendirir ve doğru formatta görüntülenmesini sağlar [1].



Şekil 1.1. Biyosensörün temel çalışma prensibinin şematik olarak gösterimi.
Analit: Tespit edilmek istenen maddeyi temsil eden gri şekildir.

Biyoreseptör: Analiti tanıyan ve ona özgül olarak bağlanan biyolojik bir bileşeni temsil eden bej renkli katmandır.

Transdüser: Biyoreseptör ile analit arasındaki etkileşimden doğan kimyasal veya biyolojik sinyalleri ölçülebilir elektriksel bir sinyale dönüştüren mavi renkli katmandır.

Amplifikatör: Transdüserden gelen zayıf elektriksel sinyali güçlendiren ve işlenmeye uygun hale getiren sarı renkli katmandır.

Biyosensörler, biyolojik ve kimyasal analizler yapmak için kullanılan cihazlardır ve genellikle biyolojik materyalleri (enzimler, antikorlar, DNA, vb.) ve fiziksel sensörleri birleştirerek ölçüm yaparlar. Biyosensörler, birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. En çok öne çıkan kullanım alanları şunlardır:

Tıbbi uygulamalarda; hastalık teşhisi ve izleme, patojen tespiti, genetik analizler yapılırken kullanılmaktadır.

Gıda güvenliği ve kalite kontrolünde; bakteri ve toksin tespiti, taze ürünlerin takibi aşamalarında kullanılır.

Çevre izlemede; hava ve suyun çevresel atıklar yönünden takibinde, toprak sağlığı için yapılan uygulamalarda kullanılır.

Kozmetik ve ilaç sektöründe; kozmetik ürünlerin üretiminde ve güvenliğinde, ilaç üretimi ve uygulanmasında, sürecin denetlenmesinde tercih edilmektedir.

Biyoteknoloji ve araştırmalarında kullanılır.

Giyilebilir teknolojilerde; sağlık izleme cihazlarında aktif olarak kullanılmaktadır.

Genel olarak biyosensörler; sağlık, gıda, çevre ve birçok endüstride ve çeşitli alanlarda daha da gelişerek kendine özgü bir yer edinmektedir.

Tablo 1.1. Giyilebilir biyosensörler ile ilgili örnek tablo.

Sensör Türü	Ölçtüğü Parametre	Kullanım Alanı
Elektrokimyasal Sensör	Glikoz, laktat, potasyum	Diyabet takibi, spor performansı
Optik Sensör	Nabız ve Satürasyon	Fitness, kardiyovasküler sağlık
Elektromekanik Sensör	Hareket, ivme, düşme	Rehabilitasyon, yaşlı bakımı
Termal Sensör	Vücut sıcaklığı	Ateş takibi, enfeksiyon tespiti
Elektrofizyolojik Sensör	EEG, EMG, EKG	Nörolojik ve kalp sağlığı
Kimyasal Sensör	Ter analizi (pH, elektrolitler)	Dehidrasyon, metabolik analiz

Biyomalzemeler bir canlı yapısını veya biyomedikal bir cihazın görevlerini kısmen ya da tamamen yapabilirler. Bu malzemeler doğal veya sentetik olabilirler. Moleküler sensörlerin kritik bileşenlerinden biri, reaktif katmanlardır. Bu katmanların tasarlanabilmesi için, algılama sürecinin etkin olabilmesi adına tanıma elemanlarının yüzeye sabitlenmesi gereklidir. Bu tanıma elemanları genellikle biyomoleküller olarak bilinir. Biyosensör üretiminde kullanılan bu sabitleme yöntemleri laboratuvar ortamında çeşitli seçeneklere sahip olsa da her birinin her zaman ideal sonuçlar vermeyebileceği unutulmamalıdır.

Biyosensör teknolojilerinde organik maddeler özellikle iletken polimerler biyosensörün performansını artırma konusunda temel içeriklerden biri olmuştur. Bu maddeler esneklikleri, biyouyumlulukları ve kimyasal olarak kolay işlenebilir olmaları sayesinde sensör tasarımında önemli avantajlar sunar.

Biyosensörler, enzimler, antikorlar ve mikroorganizmalar gibi biyomolekülleri içerir. Biyomoleküllerin yüzeylere sabitlenmesi için çeşitli teknikler bulunmaktadır. Ancak her bir yöntem her koşulda biyosensör üretimi için uygun olmayabilir. Spesifik sensörlerin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan biyomalzeme immobilizasyon teknikleri arasında fiziksel adsorpsiyon, tuzaklama, moleküller arası çapraz ve kovalent bağlanma yöntemleri bulunmaktadır [2].

Biyosensörler oldukça geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bu kullanım alanları arasında özellikle dikkat çekenler tanı, tıbbi ve klinik uygulamalar, biyoreaktörler, proses kontrolü, tarım ve veterinerlik tıbbı, kalite kontrolü, patojen tanı, ilaç üretimi, madencilik, endüstriyel atık su izleme ve savunma endüstrileri yer almaktadır. Biyosensörler, farklı biyomolekül türlerini tespit etmek amacıyla özel olarak tasarlanmış sensörlerdir.

1.1. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, maddelerin 1 ila 100 nanometre arasında yapılandırılması ve bu ölçekte geliştirilen teknolojilerin gerçek yaşam uygulamalarına dönüşmesini sağlayan bir bilim alanıdır. Bu teknoloji, atom ve molekül düzeyinde maddeye müdahale edilmesini mümkün kılmaktadır. Bir malzeme boyut olarak küçüldüğünde, ilk başta özellikleri benzer kalır, ancak zamanla küçük değişiklikler gözlemlenir. Boyut 100 nm'nin altına indiğinde ise özelliklerde belirgin değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişimlerin başlıca nedeni, yüzey-hacim oranının artması ve kuantum etkilerin baskın hâle gelmesidir. Bu durum, optik, elektriksel, manyetik ve mekanik özelliklerin farklılaşmasına yol açar. Örneğin, malzeme daha reaktif hâle gelebilir, ışığı farklı şekilde soğurabilir ya da elektriksel

iletkenliği boyuta bağlı olarak deđiřebilir.

Ayrıca bazı nanoparçacıklar süperparamanyetik davranış gösterebilirken, mekanik dayanımları da artış gösterebilir. Bu tür özgün özellikler, nanoteknolojiyi ileri düzey uygulamalarda cazip kılar.

Nanomateriyallerin başka hiçbir metaryalde bulunmayan fiziksel ve kimyasal özellikleri ticari uygulamalarda ve topluma fayda sağlayacak yeni performanslar yaratmak için kullanılabilir. Nano ölçekteki yeni malzemeler, süreçler ve olaylar üzerine yapılan keşifler ve 20. yüzyılın sonlarında geliştirilen deneysel ve teorik teknikler, yenilikçi nanosistemlerin ve nanomateriyallerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu alan, bilim ve teknolojiye yeni bir yön kazandırmaktadır.

Nanoteknoloji uygulamaları, geniş bir yelpazeye yayılmakta olup, insan yaşamı için önemli olan çevre uygulamaları ve tıbbi uygulamalar gibi birçok alanda etkili olmaktadır. Örneğin, sağlık alanında nanoteknolojinin kullanımı, hastalıkların önlenmesi, teşhis ve tedavi süreçlerine yönelik yapılan araştırmaların ilerlemesine olanak tanıdığı için yeni alternatifler oluşmuştur [3].

Tablo 1.2. Nano boyut ile ilgili örnek tablo.

Malzeme Türü	Boyut (Nanometre)	Karşılaştırma
Su Molekölü	~0.3	Çok küçük, nano ölçeğin başlangıcı
Glikoz	~1	Su molekülünden biraz daha büyük
Antikor	~10	Nano ölçekte biyolojik molekül
Virüs	~100	Hücrelerden daha küçük, nano ölçekte
Bakteri	~1000	Mikron ölçeğinde, nano ölçeđin sonu
Kanser Hücresi	~10000	Mikron ölçeğinde, nano ölçeđin çok ötesinde
Nokta	Mikron ölçeğinde	Nano ölçeđin çok ötesinde
Tenis Topu	Milimetre ölçeğinde	Nano ölçeđin çok ötesinde

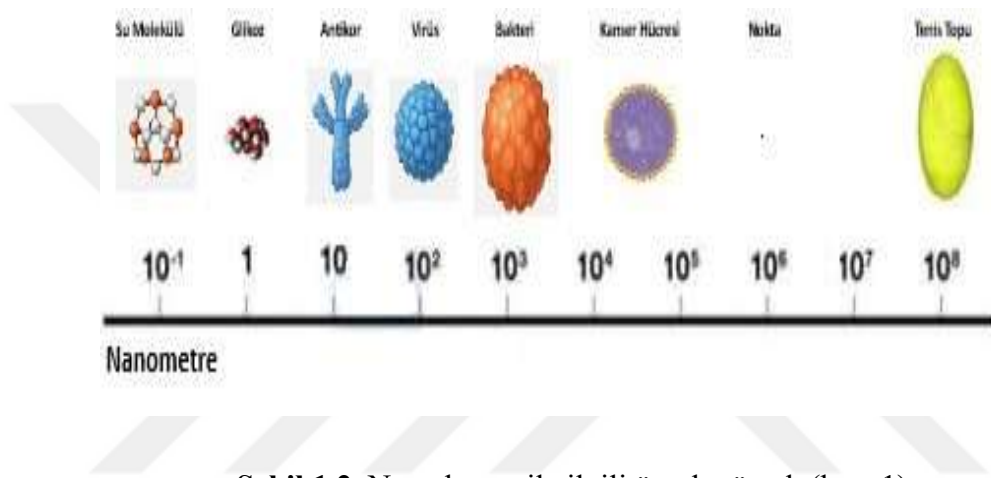
Nanoteknoloji; fizik, kimya ve mühendislik gibi farklı bilim alanlarının bir araya geldiği çok disiplinli bir alandır. 21. yüzyılda toplumsal ve ekonomik yapılar üzerindeki etkisi geçmiş yüzyılda bilgi teknolojileri, yarı iletkenler ve biyolojide yaşanan gelişmelerin etkisiyle karşılaştırılabilir. Nanoteknolojinin diğer sistemlerle kombinasyonu; akıllı malzemeler, nano imalat, elektronik, ilaç üretim ve dağıtımı, enerji ve su yönetimi, güvenlik gibi birçok farklı alandaki soruna yenilikçi çözümler sunmuştur. Nanoteknolojinin getirdiği yenilikler toplum ve ekonomi üzerinde etkiler bırakır. Bu da modern bir sanayi devrimi olarak değerlendirilebilir. Nanoteknoloji, büyük ve etkili değişimlere neden olarak çeşitli endüstriyel sektörlerde uygulanabilen çok yönlü bir teknoloji haline gelmiştir [4].

Nanoteknoloji; tıbbi çalışmalar, tekstil, mimari, havacılık ve uzay çalışmaları, ilaç ve kozmetik sektörleri, enerji depolama ve aktarımı gibi birçok alanda önemi gittikçe artan uygulamalara sahiptir. Nanoteknoloji sayesinde yeni üretim yöntemleri geliştirilmekte, düşük enerji tüketimi sağlayan sistemler oluşturulmakta ve mevcut üretim yöntemlerinin zararları azaltılmaktadır. Bu alandaki araştırmalar, insanlık için yenilikçi çözümler sunarken, aynı zamanda zararsız bir şekilde kullanım imkânı sunacak ve diğer teknolojilere kıyasla önemli bir avantaj sağlayacaktır [5].

Nanoteknoloji sayesinde, insan sağlığının iyileştirilmesi ve korunması, moleküler düzeydeki sistemlerin izlenmesi, onarılması ve yapılandırılmasıyla mümkün olabilmektedir. Bu sayede hasta bakım kalitesinin artması beklenmektedir. Mevcut tıbbi yöntemlerle çözilemeyen sağlık sorunlarına nanoteknoloji ile çözümler sunabilmenin mümkün olduğu düşünülmektedir. Günümüzde nanoteknoloji, sağlık alanında da önemli ilerlemeler kaydetmekte ve bazı hastalıkların erken teşhis ve tedavisinde umut verici olabileceği düşünülmektedir [6].

1.2. Nanomalzeme

Nanomalzemeler günümüzde kullandığımız çoğu malzemeden daha üstün özelliklere sahiptir. Bu nano yapılar, günümüzdeki malzemelerin büyük boyutlu yapılarıyla karşılaştırıldığında farklılıkları ve üstünlükleri oldukça belirgindir. Nanomalzemelerin elde edilmesi için, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı teknikler kullanılmaktadır [7].



Şekil 1.2. Nano boyut ile ilgili örnek görsel. (http-1)

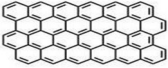
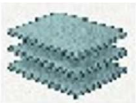
Nanoteknoloji, maddelerin atom ve molekül ölçeğinde tasarlanmasını ve kontrol edilmesini esas alan bir bilim dalıdır. Bu alanda geliştirilen nanomalzemeler, çevresel koşullara uyum sağlayabilen ve belirli görevleri kendiliğinden yerine getirebilen üstün özellikler gösterebilmektedir. Tekstil, mimarlık, sağlık, kozmetik, gıda ve enerji gibi pek çok alanda önemli dönüşümlere yol açan nanoteknoloji, özellikle 20. yüzyılda nanomalzemelerin uygulamalarda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte büyük bir gelişim sürecine girmiştir.

Son yıllarda araştırma kapsamı hızla artan nanomalzemelerle ilgili yapılan çalışmalar hızla ilerlemektedir. Bu çalışmalar sayesinde daha dayanıklı, kaliteli, maliyeti düşük, uzun ömürlü, hafif ve kompakt ürünlerin üretimi mümkün hale gelmiştir. Nanomalzemelerin üretimiyle ilgili çalışmalarda, nano boyutlarda işlem yapabilmeyi mümkün kılmak için geliştirilen ve hâlâ geliştirilmeye devam eden yeni görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır.

Bu alandaki yeniliklere pek çok örnek verilebilir. Kolay temizlenebilen yüzeyler, hava kalitesini artıran malzemeler, kendini onaran betonlar gibi uygulamalar bu örneklerden bazılarıdır. Ayrıca nanoteknoloji sayesinde pek çok yapısal yenilik de mümkün olmuştur. Buna örnek olarak ultraviyole ve kızılötesi ışıklardan ısı yalıtımı sağlayan malzemeler gösterilebilir.

Nano ölçekte kullanılan malzemelerdeki belirgin bir avantaj, malzemenin sertliğinde görülmektedir. Nano film kaplamalarla yapılan malzemeler, yüzey alanı açısından oldukça geniştir. Geleneksel malzemelerde, nano malzemelere göre yüzeyde çok daha az atom bulunur. Nano parçacıkların yüzeyindeki atomlar, malzemelerin davranışlarını değiştirebilir.

Tablo 1.3. Nano malzemeler ile ilgili örnek tablo.

Malzeme	Görsel	Özellikler
Grafen		Tek atom kalınlığında, yüksek iletkenlik, inanılmaz mekanik dayanım
Karbon Nanotüp		Silindirik yapı, güçlü, hafif, elektrik ve ısı iletkenliği yüksek
Kuantum Noktaları		Nanometre boyutunda yarı iletken kristaller, optik ve elektronik uygulamalarda kullanılır
Nano-Selüloz		Biyobozunur, hafif, yüksek mukavemetli doğal nanomalzeme
Fulleren (C60)		Küresel karbon molekülü, ilaç taşıma ve elektronik uygulamalarda kullanılır
Metal Nanoparçacıklar		Antibakteriyel özellikler, katalizör ve optik uygulamalar için ideal
MXeneler		İki boyutlu metal-karbür bileşikleri, enerji depolama ve süper kapasitörlerde kullanılır
Nano Kil		Polimer kompozitlerde güçlendirme, gaz bariyeri özellikleri

Nanometaller, nanometaloksitler, nano yapılar ve nanomineraller kullanılarak farklı yapılarda malzemeler üretilebilir. Bu üretilen malzemeler sert, esnek ve hafif olabilir. Saydam, iletken ya da yarı iletken özellik taşıyan nano ölçekli biyolojik yapılar ve metaller, bozunabilir moleküllerle birleşerek akıllı ve aktif malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Nanomalzemeleri geleneksel malzemelerden ayıran temel unsurlardan bazıları yüksek bağl yüzey alanı ve kuantum etkileridir. Bu faktörler dayanıklılık, reaktivite ve elektriksel özellikler gibi bazı nitelikleri değiştirebilir ya da artırabilir. Nanomalzemeler, geleneksel malzemelere yeni işlevler kazandırılmasına ya da farklı özelliklerin tek bir malzeme içinde bir araya getirilmesine olanak tanır. Ayrıca, bu malzemeler ekonomik olarak daha verimli olabilir ve mevcut kaynakların daha iyi korunmasına olanak tanır.

1.3. Biyomoleküller

Biyomoleküller, canlı organizmaların temel yapı taşlarıdır. Bunlar dört ana gruba ayrılırlar ve bu gruplar: proteinler, karbonhidratlar, lipitler ve nükleik asitlerdir. Bu moleküller, hücrelerin yapısında ve işlevlerinde önemli rol oynar. Biyomoleküller arasındaki etkileşimler, organizmalardaki yaşamsal süreçler açısından oldukça fazla bir öneme sahiptir. Herhangi bir problem sonrasında oluşan tutarsızlık, canlı sistemdeki biyomoleküller arasındaki etkileşimi bozabilir. Doku ve organlardaki yapısal bozulmalar ya da hasar, birçok insanın sakatlanmasına ve hastalanmasına yol açabilir. En büyük zorluk ise, insan vücudunun olumsuz fizyolojik koşullar altında organlarının çoğunun kendisini, kendiliğinden yenileyememesidir. Bu bağlamda, etkilenen doku ve organlar için kalıcı implantlar ya da doku yenilenmesini destekleyen alternatif yapılarda biyomoleküllerden elde edilen malzemeler kullanılmaktadır.

Biyomoleküllerin en dikkat çekici özelliklerinden biri hem sert hem de esnek biyolojik yapı ve malzemelerin oluşumunu mümkün kılan hiyerarşik organizasyon yetenekleridir. Örneğin; kolajen, keratin ve elastin

gibi biyomakromoleküller, işlevsel yapılara dönüşebilirken; jelatin, dayanıklı ve aynı zamanda yenilebilir jellerin oluşumuna olanak tanır. İpek proteini ise yüksek dayanımlı liflerin yanı sıra işlevsel amiloid yapıların oluşumunda rol oynar. Öte yandan bazı peptit ve proteinler, toksik amiloid yapılar oluşturarak çeşitli hastalıkların gelişimine neden olabilir [8].

Biyomoleküller arasındaki ve kendi içlerindeki etkileşimler, biyolojik yapıların oluşum sürecinde temel bir öneme sahiptir. Biyomoleküllerin dikkat çekici kimyasal, biyolojik ve mekanik özellikleri, doğrudan işleme yöntemleriyle veya sentetik malzemelerle kombinasyon halinde yeni biyomalzemelerin üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [9].

Doğal biyolojik yapıları sayesinde biyomoleküllerden türetilen malzeme sistemleri, biyoyumluluk, biyomoleküler tanıma, biyolojik uyarılara yanıt verme ve karmaşık-heterojen biyokimyasal ortamlarda uyum sağlama gibi birçok avantaj sunmaktadır [9].

Son birkaç on yılda, biyomedikal araştırmalardaki gelişmeler, biyomoleküllerden türetilmiş biyomalzemelerin tasarımını ve üretimini mümkün kılmıştır. Biyomoleküllerin çözelti işlenmesi, modifikasyonu veya diğer sentetik ve doğal malzemelerle entegrasyonu, klinik olarak duyarlı biyomalzeme sistemleri ve cihazlarının üretimi için çeşitli fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyomimetik özelliklerin entegre edilmesine olanak tanımıştır [10].

Biyomoleküller, çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olup çevresel etkilere farklı tepkiler gösterebilirler. Bu nedenle çözeltideki, katı haldeki ve arayüzdeki biyomoleküllerin yapısını ve kimyasını anlamak oldukça önemlidir [11].

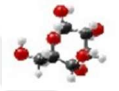
Biyosensörler, biyomolekülleri algılamak için kullanılan cihazlardır. Biyosensörler, biyolojik bir bileşen (enzimler, antikorlar, hücre reseptörleri gibi) ve fizikokimyasal bir dönüştürücü içererek, belirli bir analitin konsantrasyonuna orantılı elektronik sinyaller üretir.

Biyomoleküllerin biyosensörlerde kullanımı enzimler, mikroorganizmalar ve dokular gibi katalitik bileşenler veya reseptörler, antikorlar ve nükleik asitler gibi katalitik olmayan bileşenler aracılığıyla gerçekleşir.

Bu moleküller, biyosensörlerde immobilizasyon teknikleri ile stabilize edilir ve çeşitli transdüserlerle (elektrokimyasal, optik vb.) tespit edilir [12].

Biyomoleküllerin kullanıldığı biyosensörler birçok farklı alanda büyük önem taşırlar. Bu alanlardan bazıları tıbbi teşhis ve tedavi, çevre analizleri, gıda güvenliği ve biyoteknoloji gibi alanlardır. Enzim bazlı sensörlerden, mikrobiyal biyosensörlere ve immünosensörlere kadar birçok türü bulunmaktadır. Özellikle elektrokimyasal biyosensörler, biyomoleküllerin hassas algılanmasını sağlayarak sağlık ve çevre alanlarında geniş uygulama alanı sunmaktadır.

Tablo 1.4. Biyomoleküller ile ilgili örnek tablo

Biyomolekül	Yapı	Görevleri	Örnekler	Görsel
Karbonhidratlar	Şekerler, nişastalar, selüloz	Enerji kaynağı, yapısal destek	Glikoz, sükroz, kitin	
Lipitler	Yağlar, fosfolipitler, steroidler	Enerji depolama, hücre zarı yapısı, hormon üretimi	Trigliseritler, kolesterol, testosteron	
Proteinler	Amino asit zincirleri	Yapısal destek, enzimler, antikorlar, kas lifleri	Kolajen, keratin, hemoglobin	
Nükleik Asitler	Nükleotit zincirleri	Genetik bilgi taşıma, protein sentezi	DNA, RNA	

Son dönemlerde, biyomoleküllerin tespiti amacıyla kuantum parçacıkları gibi nanoteknolojik yaklaşımlar ön plana çıkmıştır. Bu teknolojik ilerlemeler; özellikle sağlıkta tanı koyma, gıda güvenliğinin sağlanması ve çevresel analizlerde, yüksek duyarlılık ve güvenilirlikte ölçümler yapılmasına olanak tanımaktadır [2].

2. BİYOSENSÖRLER

Canlı organizmalar, yaşadıkları çevrede meydana gelen değişiklikleri algılayarak hızlıca adapte olmak zorundadır. Bu adaptasyon süreçleri, dış tehditlere karşı koruyucu işlev gören mekanizmaların oluşmasına olanak tanır ve genellikle enzimler, dokular ile mikroorganizmalar gibi doğal algılayıcı elemanlar kullanılır. Canlılardaki bu algılama sistemleri, birçok araştırmacıya ilham vererek biyosensör teknolojilerinin geliştirilmesinde temel bir kaynak olmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda, enzim elektrotları elde edilmiştir. Bu elektrotlar, glukoz ve oksijen içeren biyolojik bir çözelti ile temas ettiklerinde, her iki bileşik de enzimatik membranı geçer. Elektrot, çözeltide bulunan oksijenden yararlanarak glukozu glukonik aside çevirir. Bu süreçle, enzim elektrotu oksijenin kısmi basıncındaki azalma miktarını ölçer. Biyosensörler, bu değişiklikleri kullanarak fiziksel veriler elde ederler. Analit adı verilen maddeler (biyolojik ya da biyolojik olmayan), biyolojik tanıyıcı elemanlar (örneğin enzimler, antikorlar, DNA, hücreler, dokular veya sentetik biyosensörler) ile fiziksel ya da kimyasal dönüştürücüler (örneğin elektrotlar, transistörler, optik fiberler, piezoelektrik kristaller) bir araya getirilerek fiziksel bir sinyal oluşturur. Bu fiziksel sinyal, elektriksel sinyale dönüştürülerek ölçülebilir hale getirilir. Bu prensiple çalışan cihazlara biyosensör adı verilir. [13].

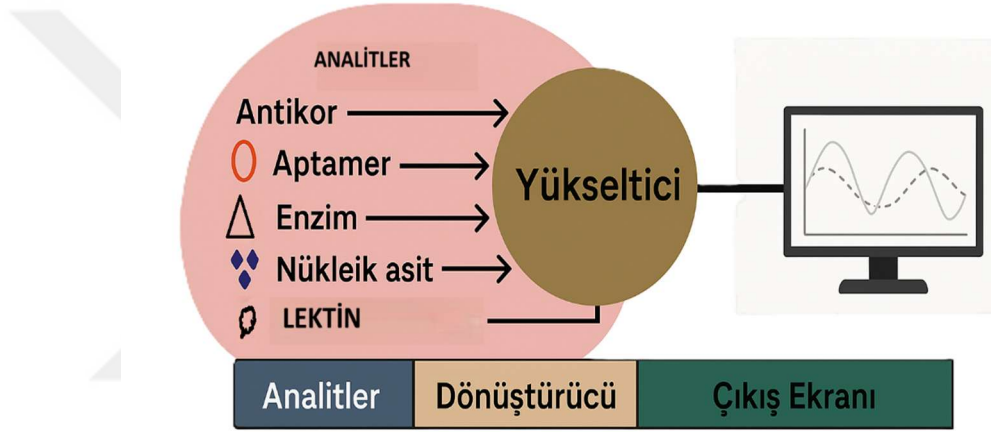
Biyosensör, bir dönüştürücü aracılığıyla biyolojik bir süreç hakkında bilgi sağlayan analitik bir cihazdır. Bu bilgiler hem yarı ölçülebilir hem de ölçülebilir olabilir. Biyokimyasal reseptörler, biyolojik olaylardan veri toplayıp bu bilgiyi dönüştürücüye aktarmak amacıyla kullanılır. İdeal bir biyosensör yüksek özgülüğe sahiptir. Tekrarlanabilir ve çevresel koşullardan etkilenmez [14].

Biyosensörler, biyoreseptörler, dönüştürücüler ve amplifikatörlerin dikkate değer bir birleşimi olup, ağır metal iyonları, karbonhidratlar, amino asitler, gazlar ve hastalıkla ilişkili maddeler gibi geniş bir analit yelpazesinde tespit yapabilen çok yönlü analitik araçlar olarak öne çıkmaktadır [15].

Biyosensörler, biyolojik bileşenlerle gelişmiş elektronik sistemlerin

karmaşık bir etkileşimi üzerine çalışır, biyolojik süreçlerin karmaşıklıklarını çözer ve bunları algılanabilir elektriksel sinyallere dönüştürür. Biyosensörlerin çalışma prensibi, biyolojik bir tanıma birimi ile bu birimden gelen sinyali ölçülebilir bir çıktıya dönüştüren bir dönüştürücünün uyum içinde çalışmasına dayanır [16].

Biyosensörler gıda, sağlık, havacılık, denizcilik gibi birçok alanda kullanılmıştır ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi stabilite ve hassasiyet sağlarlar. Şekil 1.2'de biyosensörlerin temel algılama prensibi şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Biyosensörün temel algılama prensibi.

Biyosensörler hedef moleküller olan analitlerin (antikor, aptamer, enzim, nükleik asit ve lektin gibi biyolojik tanıma elemanları aracılığıyla) tanınması ile başlar. Bu tanıma süreç analitlerin özgül bağlanma yeteneklerine dayalı olarak seçiciliği yüksek bir şekilde gerçekleşir. Tanıma elemanları tarafından algılanan biyolojik sinyal bir dönüştürücü aracılığıyla elektriksel ya da optiksel bir sinyale çevrilir. Daha sonra bu sinyal bir yükseltici birim tarafından güçlendirilerek okunabilir hale getirilir ve son olarak bir çıkış ekranında grafiksel olarak izlenebilir. Bu yapı sayesinde biyosensörler hedef maddeleri yüksek seçicilik ve kararlılık ile tespit edebilir.

Nanoteknoloji ile geliştirilen biyosensörler; MEMS, NEMS ve BioNEMS gibi mikro ve nano ölçekli elektromekanik sistemlerle birlikte,

nanoteknoloji ve biyoteknolojideki gelişmelere bağlı olarak daha gelişmiş işlevler kazanma potansiyeline sahiptir. Yeni nesil biyosensörler, nanoteknoloji ile entegre edilen çip tabanlı sistemlerin bir ürünü olarak, daha hızlı ve etkin veri takibi ile analiz imkânı sağlamaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, bireylerin sağlık durumlarının, hastaneye başvurmaksızın taşınabilir biyoçip sistemleri aracılığıyla izlenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, moleküler düzeyde yapıların çoğaltılması ve görüntülenmesine yönelik tekniklerdeki hızlı ilerlemeler, nanoteknoloji ile bütünleştirilerek nükleotit temelli biyosensörlerin uygulama alanlarının genişletilmesine katkı sunmaktadır [17].

2.1. Nanoteknolojinin Biyosensörlerde Kullanılma Nedenleri

- Doğal biyolojik sistemlerin makro boyuttaki yapılarından ziyade, nano ölçekli sistemlerle çalışma fırsatı sunar. Bu sayede moleküler ve atomik düzeydeki yapılar incelenebilir.
- Nano yapıli malzemelerin kullanımı, biyosensörlerin analizlerde daha yüksek duyarlılık göstermesini mümkün kılar.
- Biyosensörlere nanoyapıların entegrasyonu, elektronik bileşenlerin hem bellek kapasitesini hem de işlem gücünü önemli ölçüde artırarak sistemin genel verimliliğinde kayda değer bir yükseliş sağlar.
- Nanoyapılı elektronik parçacıklarla desteklendiğinde biyosensörlerin işlem yetenekleri artar.
- Karmaşık yapıya sahip nano moleküllerin daha hızlı ve etkili şekilde analiz edilmesini kolaylaştırır.
- Yüksek yüzey/hacim oranına sahip nanoyapılar sayesinde biyosensörlerde yüksek seçicilik elde edilir.
- Nanoteknolojik ürünler çalışırken daha az enerji kullanırlar.
- Nanoteknoloji ile üretilen biyosensörlerde difüzyon problemi gözlenmez.
- Biyosensörlerin daha uzun ömürlü olmaları sağlanır.
- Araştırmacılara canlı hücrelere zarar vermeden çalışma imkânı sunar[18].

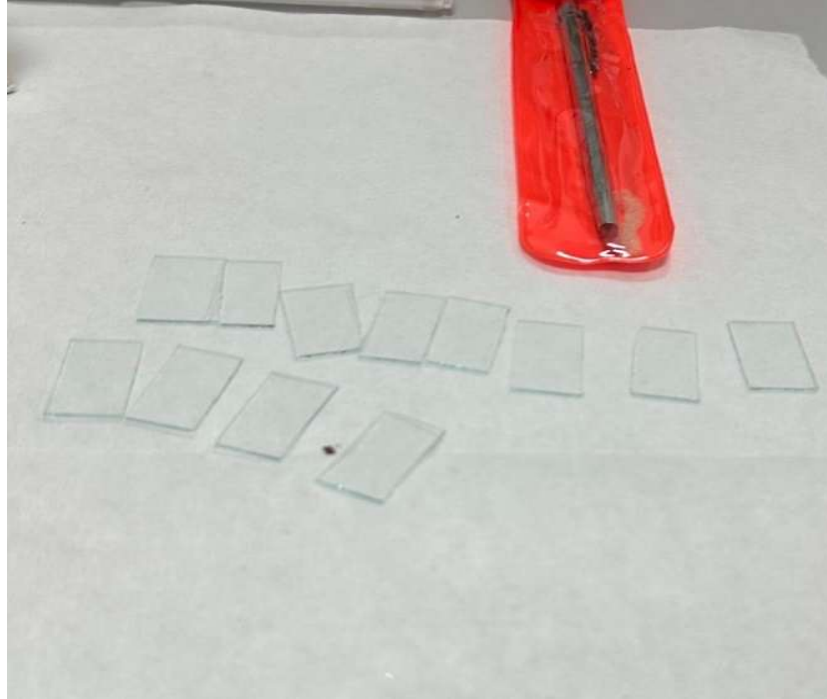
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Biyosensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler

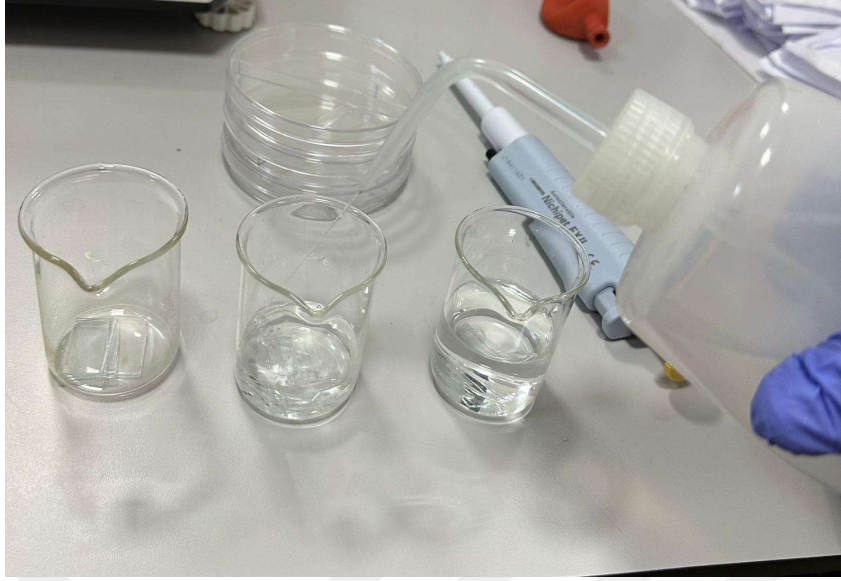
Biyomalzeme olarak organik malzeme sınıfında yer alan Poly (3-hexylthiophene-2, 5-diyl) (P3HT) ve bilimsel çalışmalarda sıkça tercih edilen Polilaktik Asit (PLA), iz miktarda CAO + %7 SM nanomalzeme bu çalışmada üretim sırasında tercih edilmiştir. Biyosensörlerin üretiminde alt taban olarak cam lam kullanılmış ve yüzey kaplama işlemleri bu zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama analite uygun olarak seçilen biyouyumlu ve iletken organik/biyomalzemeler kullanılarak hazırlanmıştır.

3.2. Alttaşların Temizliği

Kaplama işlemine geçilmeden önce lam alttaşlar Şekil 3.1’de gösterildiği gibi eşit boyutlarda olacak şekilde kesildi. Yüzeylerindeki organik ve inorganik kirlere arındırmak amacıyla temizleme işlemine tabi tutuldu. Bu işlem kapsamında alttaşlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi saf suyla doldurulmuş beherlerin içerisine yerleştirildi.



Şekil 3.1. Alttaş lamların eşit olarak kesilme sürecinin görüntüsü.



Şekil 3.2. Lamların saf su doldurulmuş beherlere yerleştirilmesi.

Lamlar Şekil 3.3'te gösterilen ultrasonik temizleyicide 10 dakika bekletildi. Ardından saf su ile durulanan alttaşlar kurutma işleminden geçirildikten sonra kaplama aşamasına hazır hale getirildi.

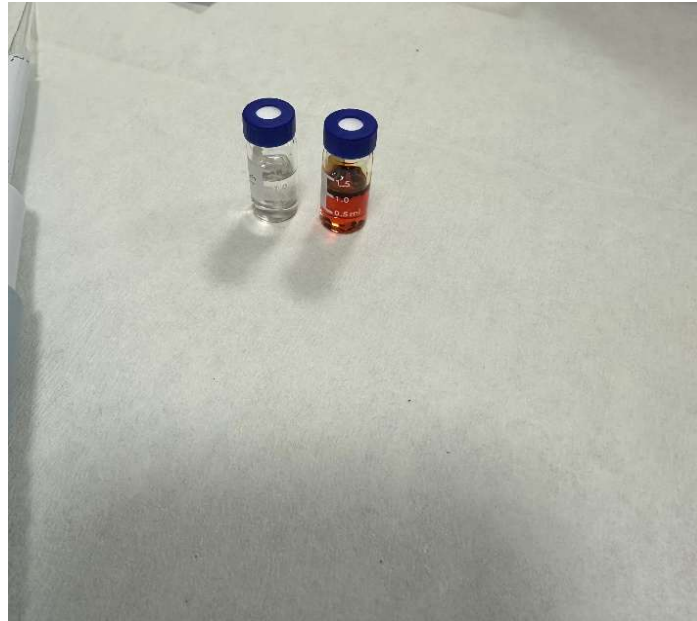


Şekil 3.3. Beherlerin ultrasonik temizleme cihazına yerleştirilmesi.

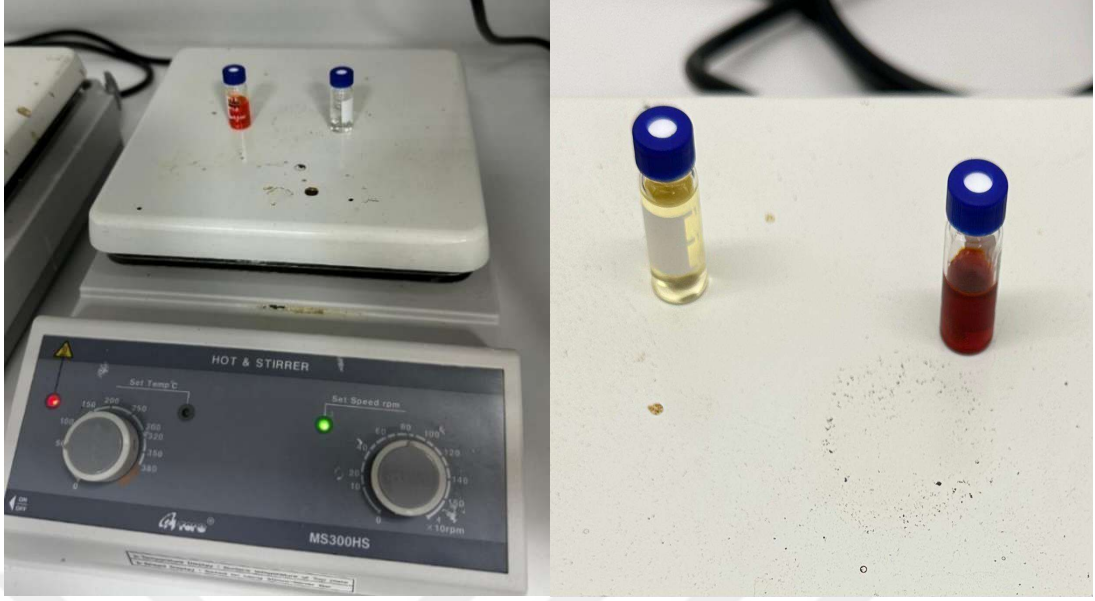
3.3. Kaplama Çözeltisinin Hazırlanması

Organik malzemeler ile biyomalzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşan karmaşık zincirli yapılar, biyosensörlerde kaplama işlevi görebilir. Bu nedenle bu çalışmada kaplama organik malzemesi olarak P3HT ve biyomalzeme olarak da bilimsel çalışmalarda sıkça tercih edilen PLA kullanıldı.

P3HT ve PLA malzemelerinin ortak çözücüsü kloroformdur. Şekil 3.4'te gözüken vial tülere 20 mg P3HT + 1 mL kloroform ve 20 mg PLA + 1 mL kloroform olacak şekilde malzemeler eklendi. Ayrıca daha önceki çalışmalarda iz miktar nanomalzeme ilave edilen biyosensörlerin ilave edilmeyen biyosensörlere göre daha kararlı ve seçici bir performansı olduğu gözlemlenmiş olup üretilecek olan biyosensöre iz miktarda CAO + %7 SM nanomalzemesi hazırlanan vial tüplere ilave edilmiştir. Çözeltilerin homojen bir şekilde karışması için vial tüplere manyetik balıklar eklenerek ısı tablası üzerinde 45 °C ve 800 rpm devirde 3 saat karışması için bırakıldı. Homojen şekilde 1:2 ve 2:1 oranında karıştırılan P3HT:PLA malzemesi vial tüplere eklendi ve 12 saat ısı tablası üzerinde homojen bir şekilde karışması için bırakıldı. Manyetik karıştırıcı üzerinde homojen karışması için beklenen çözeltiler Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Organik malzeme (açık renkli vial tüp) ve biyomalzemelerin (koyu renkli vial tüp) vial tüplere kloroform ile birlikte eklenmesi.



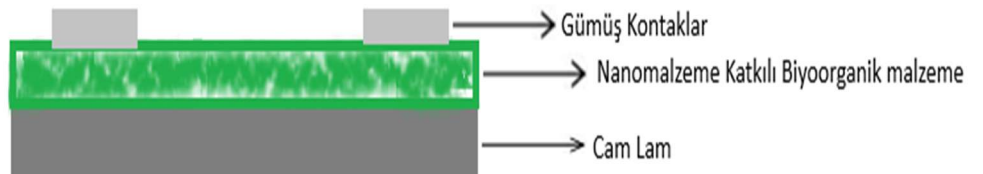
(a)

(b)

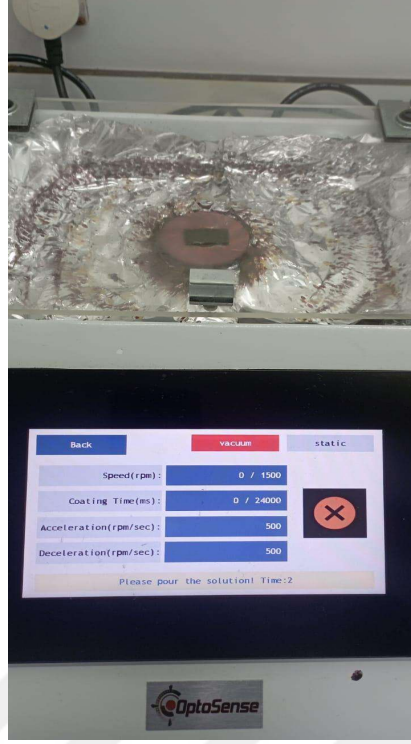
Şekil 3.5. Isı tablası üzerinde (a) P3HT ve PLA malzemelerin manyetik karıştırılma işlemi ve (b) bu malzemelerin farklı oranlarda (1:2 açık renkli vial tüp ve 2:1 koyu renkli vial tüp) manyetik olarak karıştırılma işlemi.

3.4. Alttaşların Kaplama İşlemi

Bu tez kapsamında, 1:2 ve 2:1 (P3TH:PLA) oranlarında hazırlanan çözeltiler manyetik bir karıştırıcıda homojenize karıştırıldıktan sonra, daha önce kimyasal ve ultrasonik işlemlerle temizlenmiş lam altlıklarının üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlem için spin kaplama yöntemi kullanıldı. Cihaz parametreleri 1500 devir ve 30 saniye olarak ayarlandı. Kaplama oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



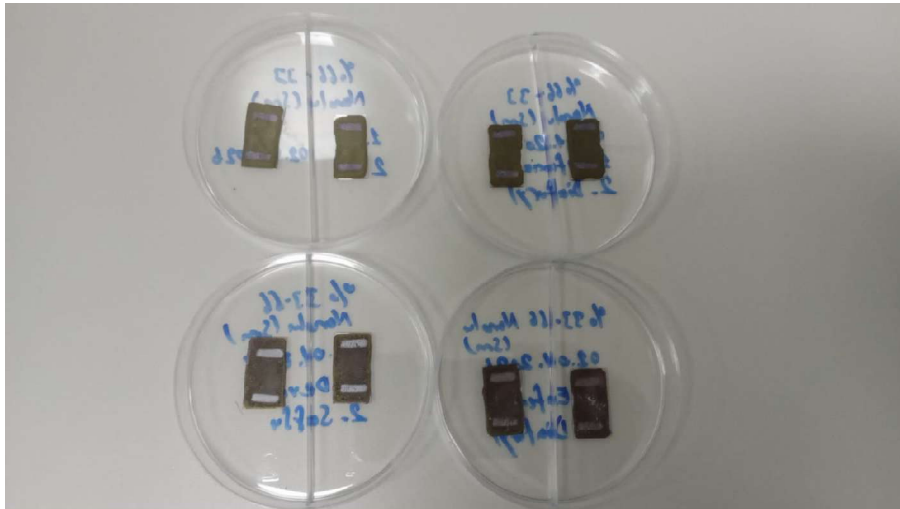
Şekil 3.6. Cam lam üzerine yapılan spin kaplamanın şematik gösterimi.



Şekil 3.7. Spin kaplama işlemi için kullanılan cihaz.

3.5. Gümüş Pasta İle Kontakların Yapılması

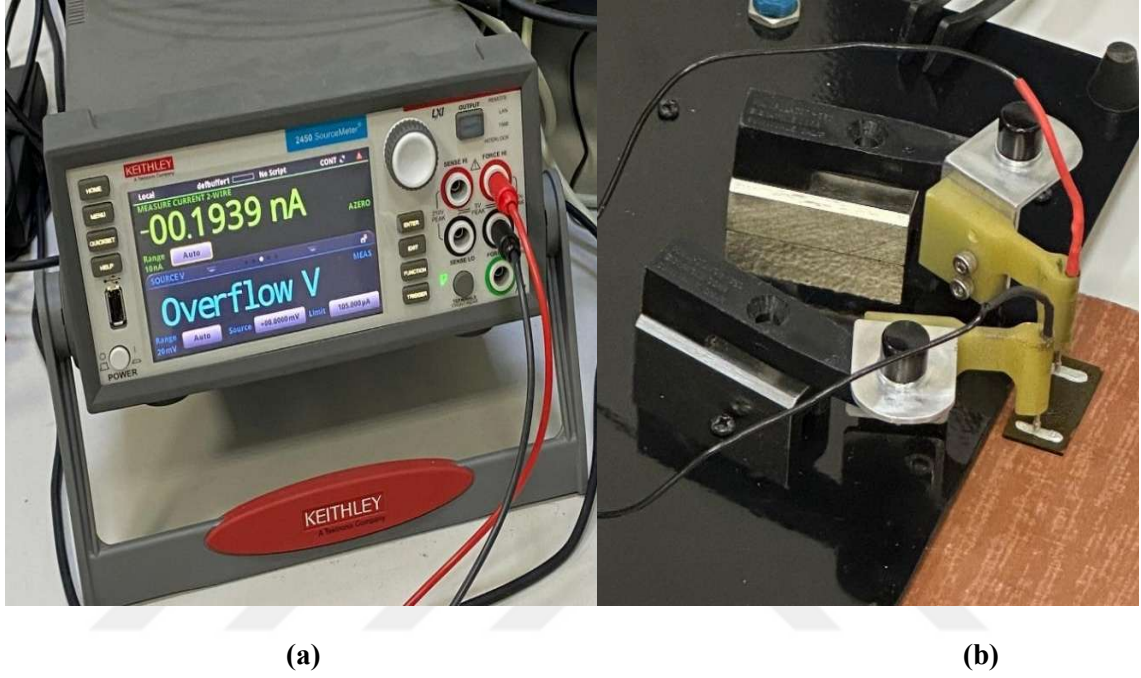
Yüzey kaplama işlemleri tamamlanan lamlar elektriksel karakterizasyon testlerine hazır hale gelmesi için Şekil 3.8’de gözüktüğü şekilde iki ucuna gümüş pasta ile kontaklar yapılmıştır. Kontaklar uygulandıktan sonra 50 santigrat derecede tavlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.8. Gümüş pasta ile kontak yapılmış biyosensörler.

3.6. Elektriksel Karakterizasyon Testleri İçin Kullanılan Ölçüm Cihazı

Üretilen biyosensörlerin elektriksel karakterizasyonu, Şekil 3.9.a’da gösterilen Keithley 2450 model hassas akım-gerilim ölçüm cihazı ve Şekil 3.9.b’de gösterilen özel prob sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Elektriksel karakterizasyon testlerinde kullanılan (a) Keithley 2450 model cihaz ve (b) ölçümler için özel prob sistemi.

3.7. Optiksel Karakterizasyon Testleri İçin Kullanılan Ölçüm Cihazı

Üretilen biyosensörlerin optiksel karakterizasyonu, Şekil 3.10’de gösterilen UV-VIS spektrofotometre N4S model ölçüm cihazı ile ve Şekil 3.11’de gösterildiği şekilde yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Biyosensör optiksel karakterizasyon testlerinde kullanılan UV-VIS spektrofotometre N4S model ölçüm cihazı.



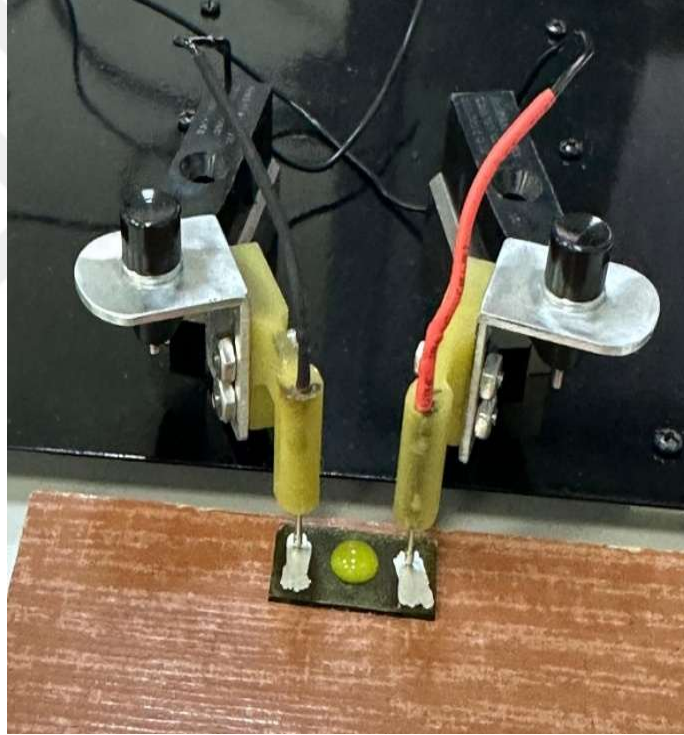
Şekil 3.11. UV-VIS spektrofotometre N4S model ölçüm cihazında ölçümlerin gerçekleştirilmesi için lamaların yerleştirildiği bölüm.

4. BULGULAR

4.1. Üretilen Biyosensörlerin Elektriksel Karakterizasyonu

Elektriksel karakterizasyon, bir malzemenin elektriksel direncini tespit etmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. Bu yöntemde malzemeye uygulanan gerilimle ortaya çıkan akım ölçülerek malzemenin iletkenlik özellikleri değerlendirilir.

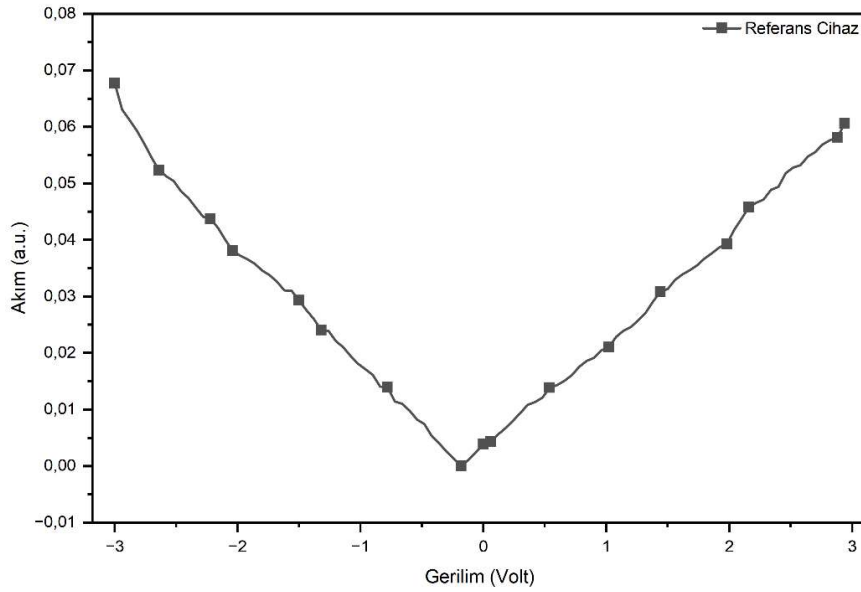
Elektriksel karakterizasyon analizleri sırasında, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, her bir analitten 40 μ l damlatıldı ve 2 dakikalık bekleme süresinin ardından grafikler kaydedildi.



Şekil 4.1. Elektriksel karakterizasyon testleri görseli.

4.1.1. 1:2 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensörlerin elektriksel karakterizasyonu

Üretilmiş olan 1:2 (P3HT:PLA) oranlarına sahip biyosensörlere ait elektriksel karakterizasyon testleri Saf haldeki (analit damlatılmayan), Saf su damlatılan biyosensör, Diafuryl (1. antibiyotik) damlatılan biyosensör ve Enfexia (2. antibiyotik) damlatılan biyosensör olarak sınıflandırılıp sırası ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.2-6 ve Tablo 4.1-4’de verilmiştir.

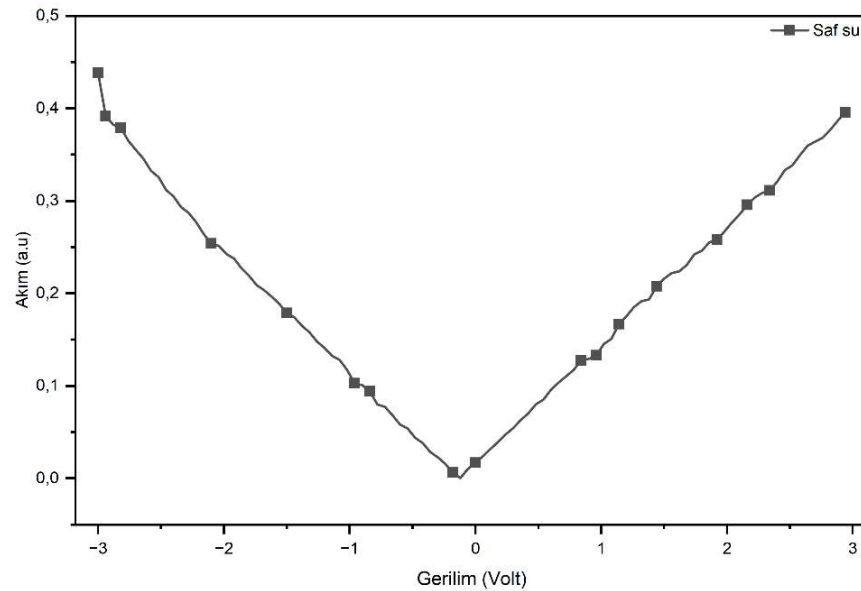


Şekil 4.2. 1:2 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.2’de biyosensör referans halinde olup üzerine herhangi bir analit damlatılmadan alınan referans değerleri akım-gerilim grafiğinde görülmektedir. Tablo 4.1’de -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan referans akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında akımın sıfıra çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 0.07(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Grafiğin pozitif ve negatif gerilimlerde akım artışının yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. Saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensöre ait akım-gerilim değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3,0	$1,29 \cdot 10^{-08}$
-2,5	$1,09 \cdot 10^{-08}$
-2,0	$7,79 \cdot 10^{-09}$
-1,5	$5,87 \cdot 10^{-09}$
-1,0	$4,04 \cdot 10^{-09}$
-0,5	$1,93 \cdot 10^{-09}$
0	$2,83 \cdot 10^{-12}$
0,5	$2,07 \cdot 10^{-09}$
1,0	$4,06 \cdot 10^{-09}$
1,5	$6,45 \cdot 10^{-09}$
2,0	$7,77 \cdot 10^{-09}$
2,5	$1,08 \cdot 10^{-08}$
3,0	$1,29 \cdot 10^{-08}$



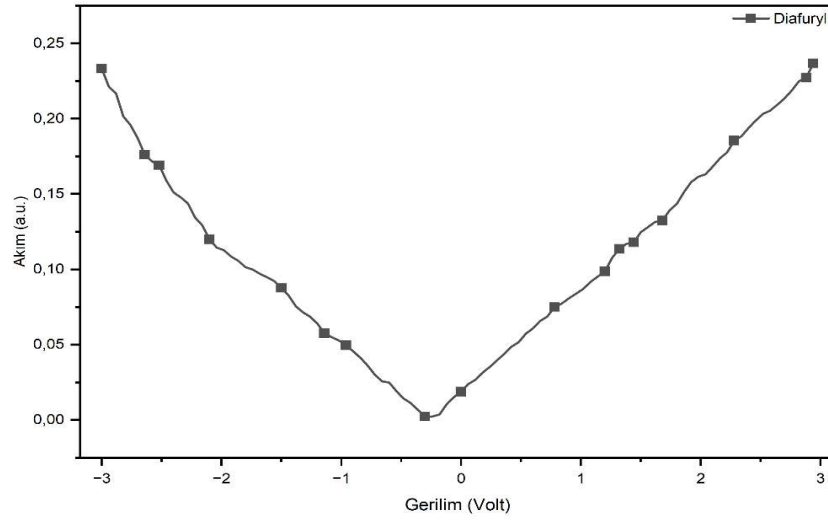
Şekil 4.3. Saf su damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.3'te biyosensör üzerine saf su damlatılıp alınan akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.2'de -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan referans akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında akımın sifıra çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 0,44(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Grafiğin pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde bölgelerinde akım artışının yakın olduğu görülmüş

olup saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensöre göre daha kuvvetli tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.2. Saf su damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3,0	$1,04 \cdot 10^{-08}$
-2,5	$8,38 \cdot 10^{-09}$
-2,0	$5,94 \cdot 10^{-09}$
-1,5	$4,28 \cdot 10^{-09}$
-1,0	$3,15 \cdot 10^{-09}$
-0,5	$1,38 \cdot 10^{-09}$
0	$1,93 \cdot 10^{-10}$
0,5	$1,59 \cdot 10^{-09}$
1,0	$3,55 \cdot 10^{-09}$
1,5	$4,61 \cdot 10^{-09}$
2,0	$6,16 \cdot 10^{-09}$
2,5	$8,53 \cdot 10^{-09}$
3,0	$1,01 \cdot 10^{-08}$



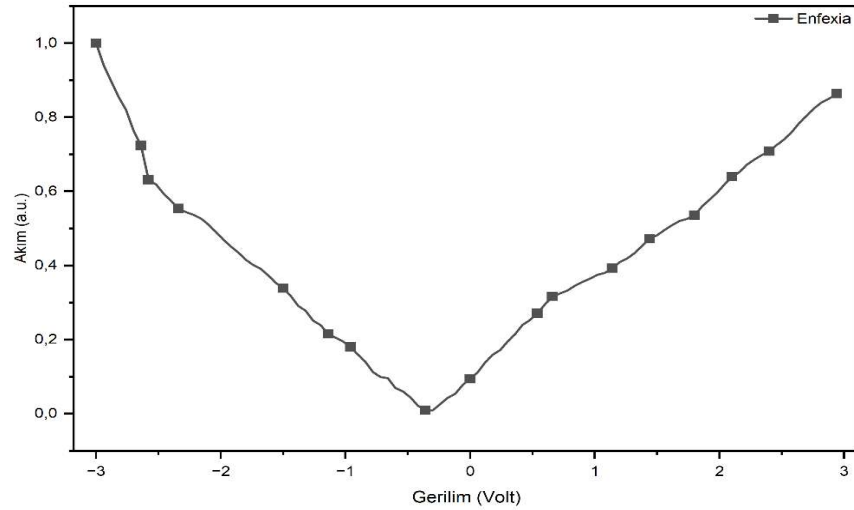
Şekil 4.4. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.4'te biyosensör üzerine Diafuryl damlatılıp alınan akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.3'te -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında akımın sıfıra çok yakın

değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 0.26(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Biyosensörün saf su damlatılan biyosensör grafiğine göre daha zayıf tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.3. Diafuryl antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3,0	$2,44 \cdot 10^{-8}$
-2,5	$1,9 \cdot 10^{-8}$
-2,0	$1,49 \cdot 10^{-8}$
-1,5	$1,07 \cdot 10^{-8}$
-1	$7,14 \cdot 10^{-9}$
-0,5	$3,13 \cdot 10^{-9}$
0	$4,15 \cdot 10^{-10}$
0,5	$3,96 \cdot 10^{-9}$
1,0	$8,03 \cdot 10^{-9}$
1,5	$1,15 \cdot 10^{-8}$
2,0	$1,54 \cdot 10^{-8}$
2,5	$1,9 \cdot 10^{-8}$
3,0	$2,24 \cdot 10^{-8}$



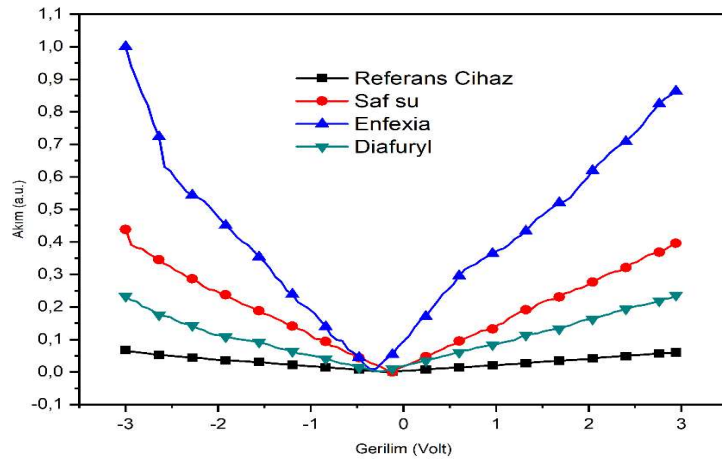
Şekil 4.5. Enfexia damlatılmış biyosensörün elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.5'de biyosensör üzerine enfexia damlatılıp alınan akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.4'te -3V ile +3V gerilim değer

aralığında alınan akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında akımın sıfıra çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 1(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde akım artışlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve enfexia damlatılan biyosensörün analit damlatılmayan, saf su ve diafuryl damlatılan biyosensörlere göre daha kuvvetli tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.4. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3	$4,12 \cdot 10^{-08}$
-2,5	$2,94 \cdot 10^{-08}$
-2,0	$2,26 \cdot 10^{-08}$
-1,5	$1,57 \cdot 10^{-08}$
-1,0	$6,99 \cdot 10^{-09}$
-0,5	$2,66 \cdot 10^{-09}$
0	$1,77 \cdot 10^{-09}$
0,5	$7,05 \cdot 10^{-09}$
1,0	$1,29 \cdot 10^{-08}$
1,5	$1,8 \cdot 10^{-08}$
2,0	$2,4 \cdot 10^{-08}$
2,5	$2,96 \cdot 10^{-08}$
3	$3,53 \cdot 10^{-08}$

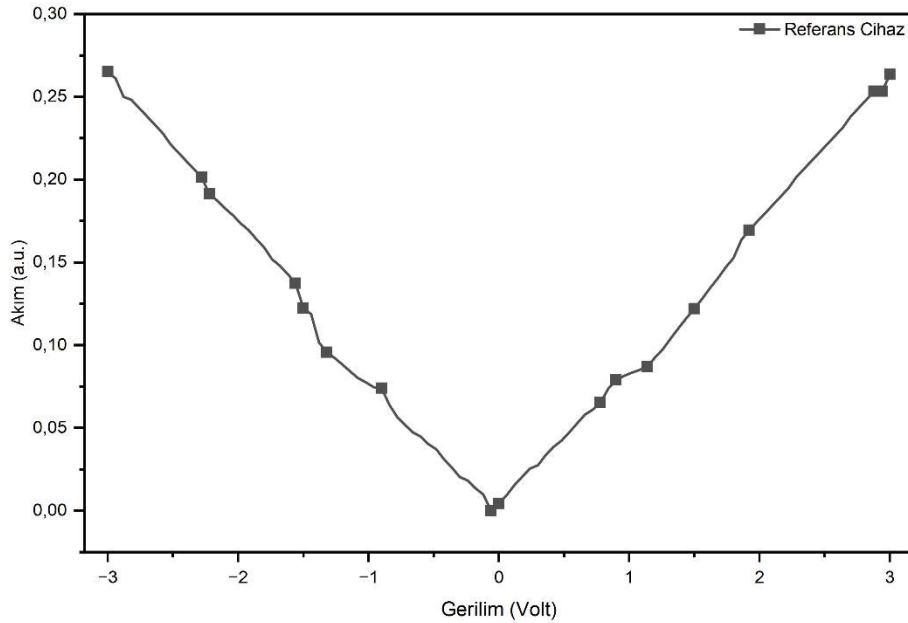


Şekil 4.6. Biyosensörlere farklı analit uygulamalarının elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği kıyaslaması.

Şekil 4.6'daki grafik incelendiğinde biyosensörün tüm analitlere tepki verdiği görülmüştür. Tüm grafiklerde pozitif ve negatif gerilimlerde akım artışının yakın olduğu gözlemlenmiştir. -3V ile +3V gerilim değerleri arasında yapılan deneyler incelendiğinde, daha geniş spektruma sahip olması sebebi ile daha güçlü olan 2.antibiyotik 1(a.u) değerinde en fazla çıkış akımı vermiştir. Üretilen biyosensör 1.antibiyotiğe 0.26(a.u) ve saf suya 0.44(a.u) değerinde çıkış akımı verdiği görülmüştür. Yaptığımız çalışmada 1:2 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensör incelendiğinde 1.antibiyotiğe saf sudan daha az tepki verdiği gözlemlenmiştir.

4.1.2. 2:1 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensörlerin elektriksel karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında üretilmiş olan 2:1 oranlarına sahip biyosensörlere ait elektriksel karakterizasyon testleri Saf haldeki (analit damlatılmayan), Saf su damlatılan, Diafuryl antibiyotiği damlatılan, Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensör olarak sınıflandırılıp sırası ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7-11 ve ve Tablo 4.5-8 de verilmiştir.

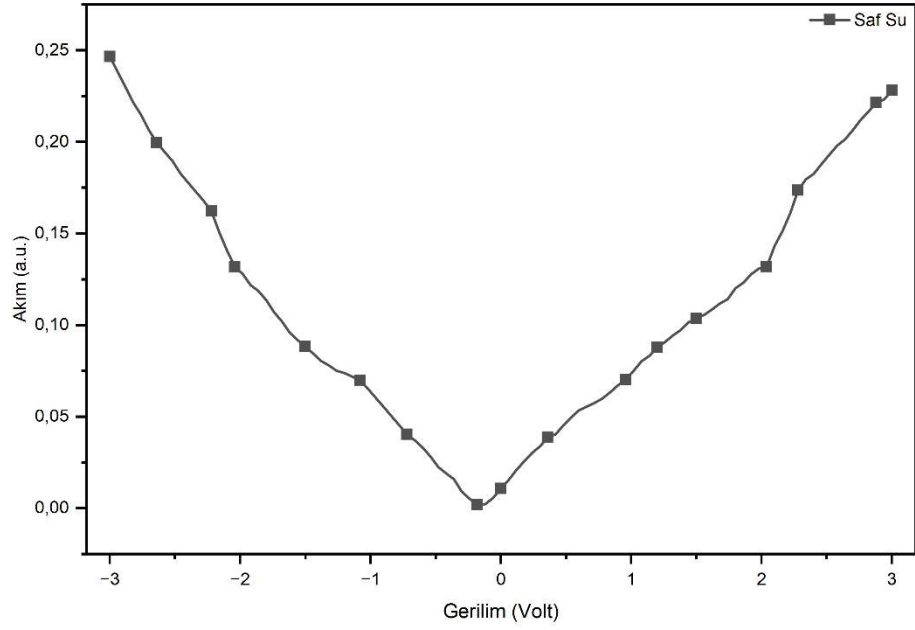


Şekil 4.7. 2:1 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.7’de biyosensör üzerine herhangi bir analit uygulanmadan önce referans değerleri elde edilen biyosensörün akım-gerilim grafiği gösterilmektedir. Tablo 4.5’te belirli -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan referans akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre -3V ile +3V gerilim uygulandığında çıkış akımının 0.27(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde akım artışlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Biyosensörün analit damlatılmadan alınan referans değerlerinin elektriksel tepkisinin beklenildiği gibi oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5. Saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensöre ait akım-gerilim değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3	$8,29 \cdot 10^{-10}$
-2,5	$5,68 \cdot 10^{-10}$
-2,0	$4,47 \cdot 10^{-10}$
-1,5	$3,44 \cdot 10^{-10}$
-1,0	$2,13 \cdot 10^{-10}$
-0,5	$9,77 \cdot 10^{-11}$
0	$4,66 \cdot 10^{-11}$
0,5	$1,52 \cdot 10^{-10}$
1,0	$2,59 \cdot 10^{-10}$
1,5	$3,68 \cdot 10^{-10}$
2,0	$4,9 \cdot 10^{-10}$
2,5	$5,84 \cdot 10^{-10}$
3	$7,1 \cdot 10^{-10}$

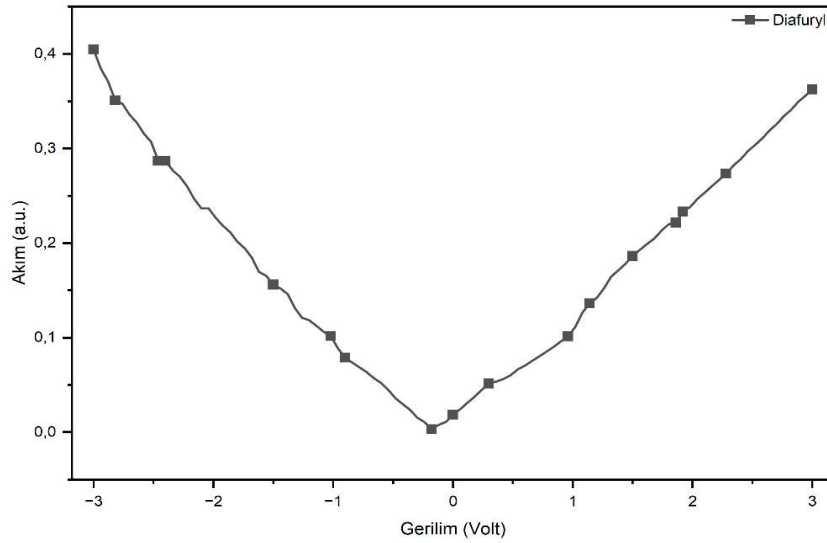


Şekil 4.8. Üzerine saf su damlatılan biyosensöre ait akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.8’de biyosensör üzerine saf su damlatılıp elde edilen akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.6’da saf su damlatılan biyosensörün -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan referans akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre -3V ile +3V gerilim uygulandığında çıkış akımının 0.25(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Grafiğin pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde bölgelerinde akım artışının yakın olduğu görülmüş olup saf haldeki (analit damlatılmayan) biyosensör ile çok yakın tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.6. Saf su damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3	$5,13 \cdot 10^{-9}$
-2,5	$3,61 \cdot 10^{-9}$
-2	$2,94 \cdot 10^{-9}$
-1,5	$2,15 \cdot 10^{-9}$
-1	$1,37 \cdot 10^{-9}$
-0,5	$6,31 \cdot 10^{-10}$
0	$1,96 \cdot 10^{-10}$
0,5	$9,96 \cdot 10^{-10}$
1	$1,7 \cdot 10^{-9}$
1,5	$2,41 \cdot 10^{-9}$
2	$3,19 \cdot 10^{-9}$
2,5	$4,09 \cdot 10^{-9}$
3	$4,46 \cdot 10^{-9}$



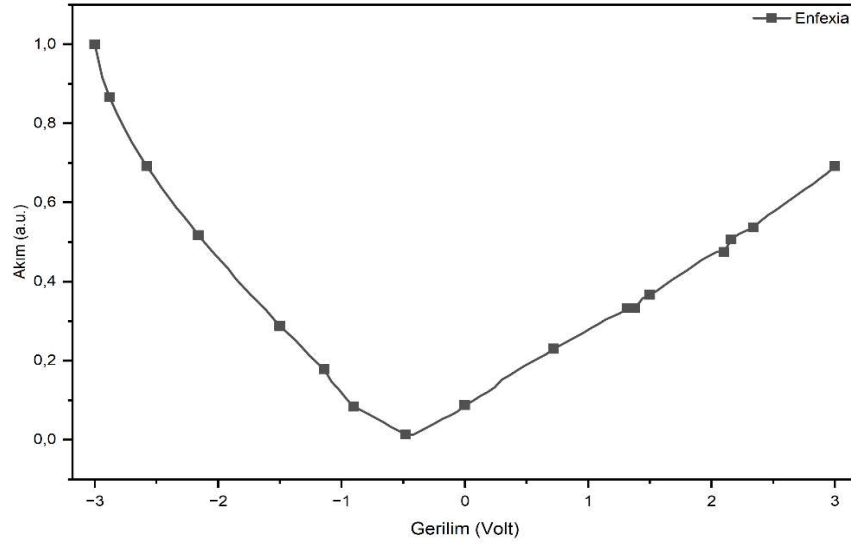
Şekil 4.9. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.9’da biyosensör üzerine Diafuryl damlatılıp elde edilen akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.7’de diafuryl damlatılan biyosensörün -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında akımın sıfıra çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 0.40(a.u) olduğu

gözlemlenmiştir. Biyosensörün saf su ve analit damlatılmayan durumlarına göre daha kuvvetli çıkış akımı verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.7. Diafuryl damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3	$2,73 \cdot 10^{-09}$
-2,5	$1,98 \cdot 10^{-09}$
-2	$1,51 \cdot 10^{-09}$
-1,5	$9,7 \cdot 10^{-10}$
-1	$6,19 \cdot 10^{-10}$
-0,5	$2,25 \cdot 10^{-10}$
0	$2,2 \cdot 10^{-10}$
0,5	$6,71 \cdot 10^{-10}$
1	$1,09 \cdot 10^{-09}$
1,5	$1,46 \cdot 10^{-09}$
2	$1,91 \cdot 10^{-09}$
2,5	$2,38 \cdot 10^{-09}$
3	$2,77 \cdot 10^{-09}$



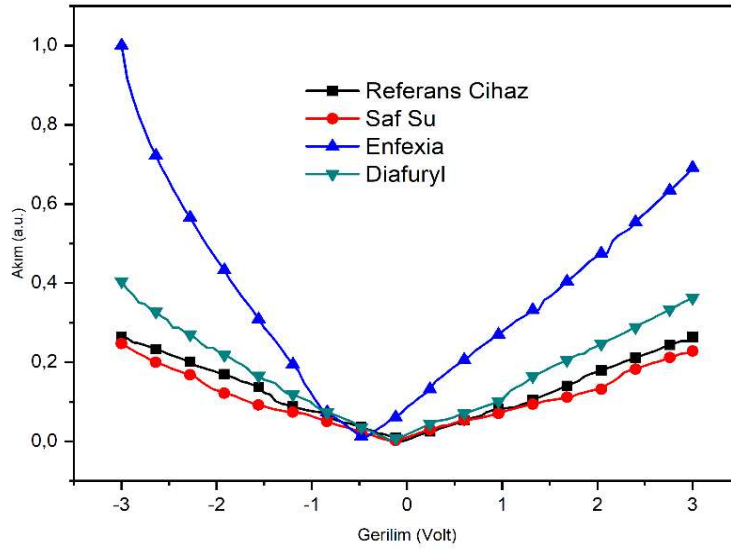
Şekil 4.10. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait elektriksel karakterizasyon akım-gerilim grafiği.

Şekil 4.10'da biyosensör üzerine Enfexia damlatılıp elde edilen akım-gerilim grafiği görülmektedir. Tablo 4.8'de enfexia damlatılan biyosensörün -3V ile +3V gerilim değer aralığında alınan akım değerleri verilmiştir. Yapılan karakterizasyon testlerinde biyosensöre 0V gerilim uygulandığında

akımın sıfıra çok yakın değerde olduğu gözlemlenmiş olup -3V ile +3V gerilim değerlerinde ise çıkış akımının 1(a.u) olduğu gözlemlenmiştir. Enfexia damlatılan biyosensörün analit damlatılmayan, saf su ve diafuryl damlatılan biyosensörlere göre daha kuvvetli çıkış akım değeri verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.8. Enfexia antibiyotiği damlatılan biyosensöre ait belirli gerilim değer aralığında alınan akım değerleri

Voltaj(Volt)	Akım(Amper)
-3	$1,17 \cdot 10^{-08}$
-2,5	$7,24 \cdot 10^{-09}$
-2	$5,4 \cdot 10^{-09}$
-1,5	$3,63 \cdot 10^{-09}$
-1	$2,4 \cdot 10^{-09}$
-0,5	$7,03 \cdot 10^{-10}$
0	$9,89 \cdot 10^{-10}$
0,5	$2,49 \cdot 10^{-09}$
1	$3,7 \cdot 10^{-09}$
1,5	$5,52 \cdot 10^{-09}$
2	$6,15 \cdot 10^{-09}$
2,5	$7,45 \cdot 10^{-09}$
3	$1,01 \cdot 10^{-08}$



Şekil 4.11. Farklı analitler kullanılarak test edilen biyosensörlere ait akım-gerilim grafiklerinin karşılaştırmalı analizi.

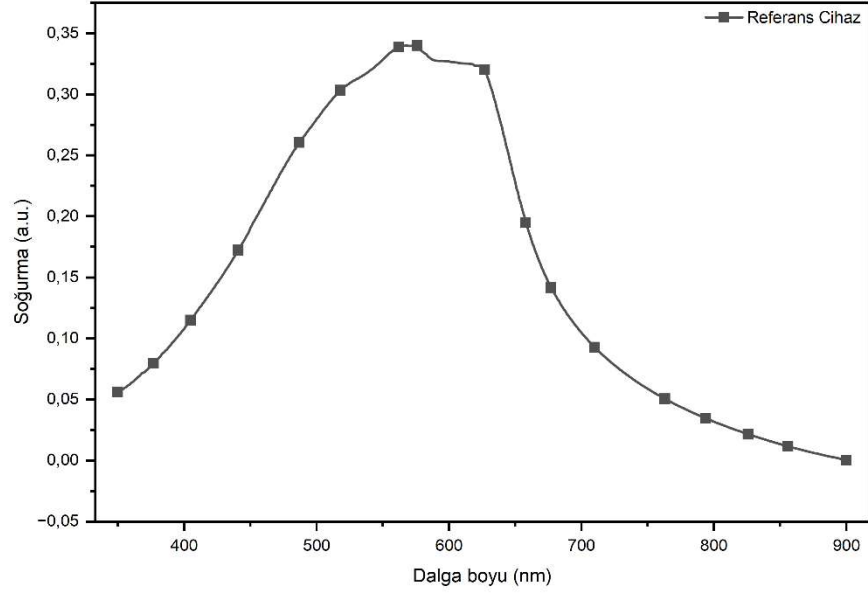
Şekil 4.11'deki tüm grafikler incelenip karşılaştırıldığında biyosensörün tüm analitlere kararlı ve seçici tepki verdiği görülmüştür. Tüm grafiklerde pozitif ve negatif gerilimlerde akım artışının yakın olduğu gözlemlenmiştir. -3V ile +3V gerilim değerleri arasında yapılan deneyler incelendiğinde, daha geniş spektruma sahip olması sebebi ile daha güçlü olan 2.antibiyotik 1(a.u) değerinde en fazla çıkış akımı vermiştir. Üretilen biyosensör 1.antibiyotiğe 0.40(a.u) ve saf suya 0.25(a.u) değerinde çıkış akımı verdiği görülmüştür. Yaptığımız çalışmada 2:1 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensör incelendiğinde bir önceki biyosensörün aksine güçlü olan enfexia antibiyotiğine en çok ve daha az güçlü olan diafuryl antibiyotiğine ise ikinci en çok elektriksel tepkiyi verdiği gözlemlenmiştir.

4.2. Üretilen Biyosensörlerin Optiksel Karakterizasyonu

Optiksel karakterizasyon testleri, malzemenin ultraviyole ışık ile etkileşim davranışını analiz ederek yapısal ve yüzeysel özellikleri hakkında bilgi sağlar. Optiksel karakterizasyon aracılığıyla biyosensör yapılarının geçirgenlik ve soğurma aralığı gibi temel optiksel parametreleri belirlenebilir. Bu sayede üretilen biyosensörlerde kullanılan aktif katmanların performansını etkileyen faktörler ile bu katmanların analitlerle etkileşim sonucu gösterdiği tepkiler daha detaylı şekilde analiz edilebilir.

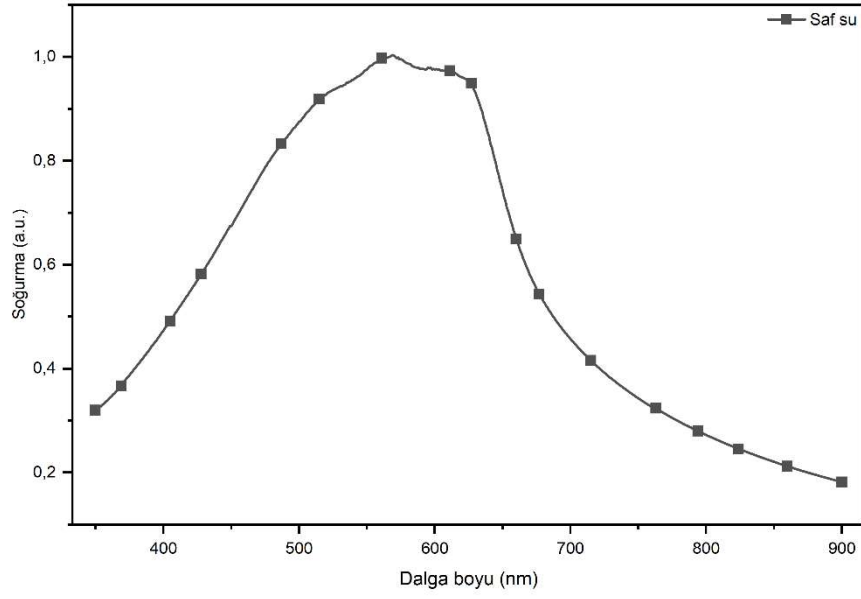
4.2.1. 1:2 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensörlerin optiksel karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında üretilmiş olan 1:2 (P3HT:PLA) oranlarına sahip biyosensörlere ait optiksel karakterizasyon testleri Saf haldeki (analit damlatılmayan), Saf su damlatılan biyosensör, Diafuryl damlatılan biyosensör ve Enfexia damlatılan biyosensör olarak sınıflandırılıp sırası ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12-16 arasında verilmiştir.



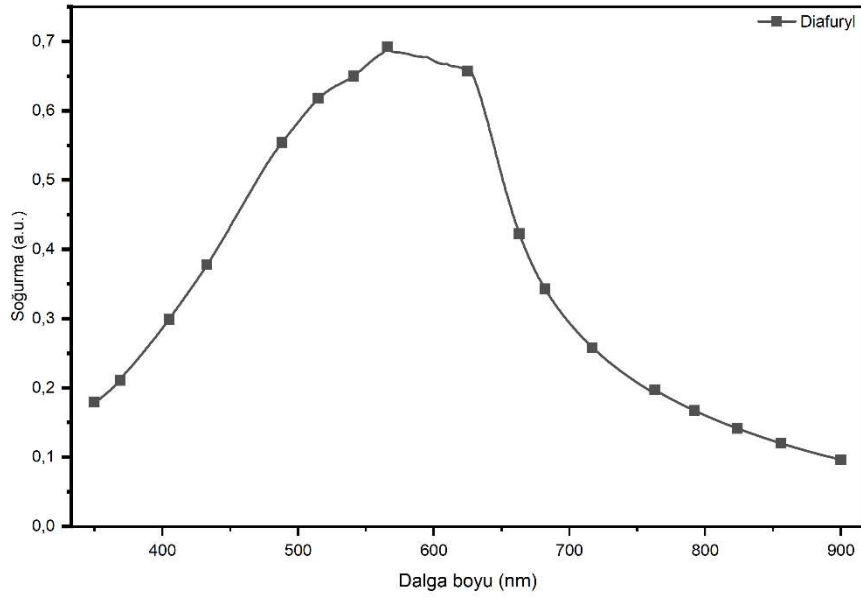
Şekil 4.12. 1:2 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.12’de biyosensör referans halinde olup üzerine herhangi bir analit damlatılmadan 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,35(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir.



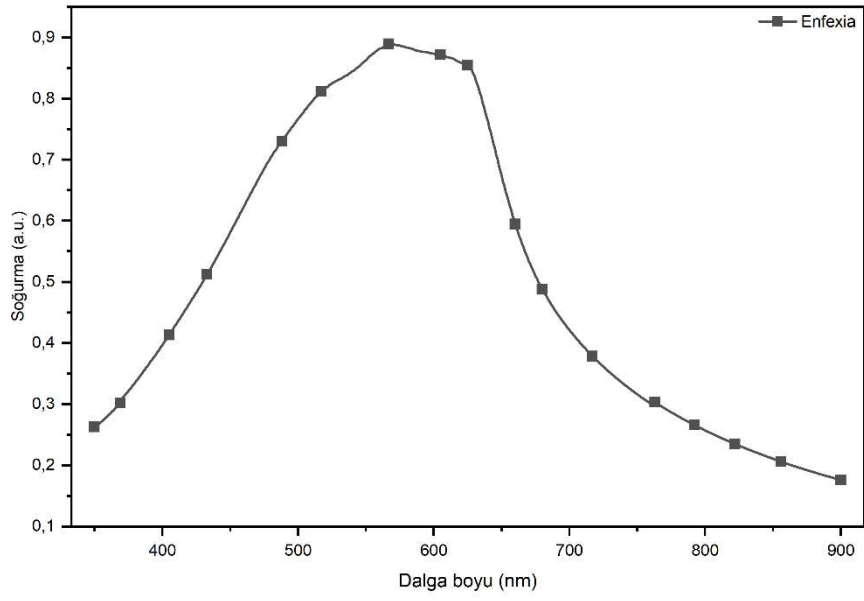
Şekil 4.13. Saf su damlatıldıktan sonra test edilen biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.13’de biyosensör üzerine saf su damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 1(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Grafik incelendiğinde biyosensörün analit damlatılmayan biyosensör grafiğine göre ışığı daha kuvvetli soğurduğu gözlemlenmiştir.



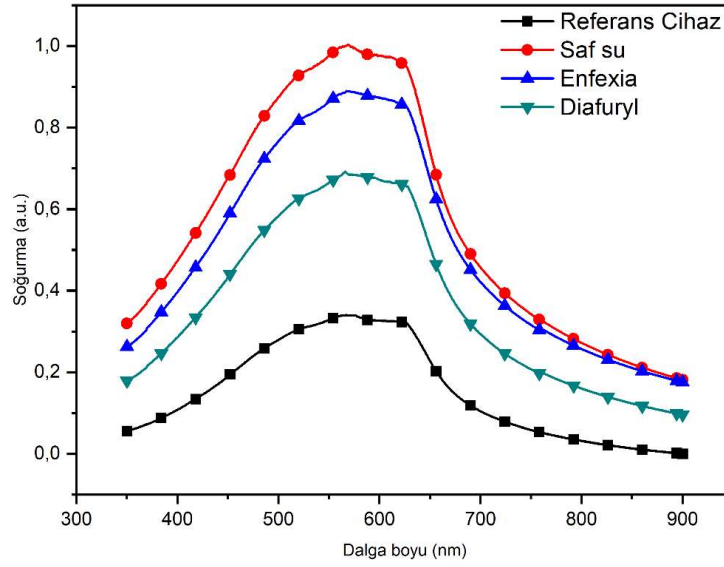
Şekil 4.14. Diafuryl antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.14’de biyosensör üzerine Diafuryl antibiyotiği damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,7(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Grafik incelendiğinde biyosensörün analit damlatılmayan biyosensör grafiğine göre ışığı daha kuvvetli soğurduğu ancak saf su damlatılan biyosensöre göre daha az soğurduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Enfexia antibiyotiği damlatılmış biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.15’de biyosensör üzerine Enfexia damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,9(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Grafik incelendiğinde biyosensörün analit damlatılmayan ve diafuryl damlatılan biyosensör grafiklerine göre daha kuvvetli soğurduğu ancak saf su damlatılan biyosensöre göre ışığı daha az soğurduğu gözlemlenmiştir.

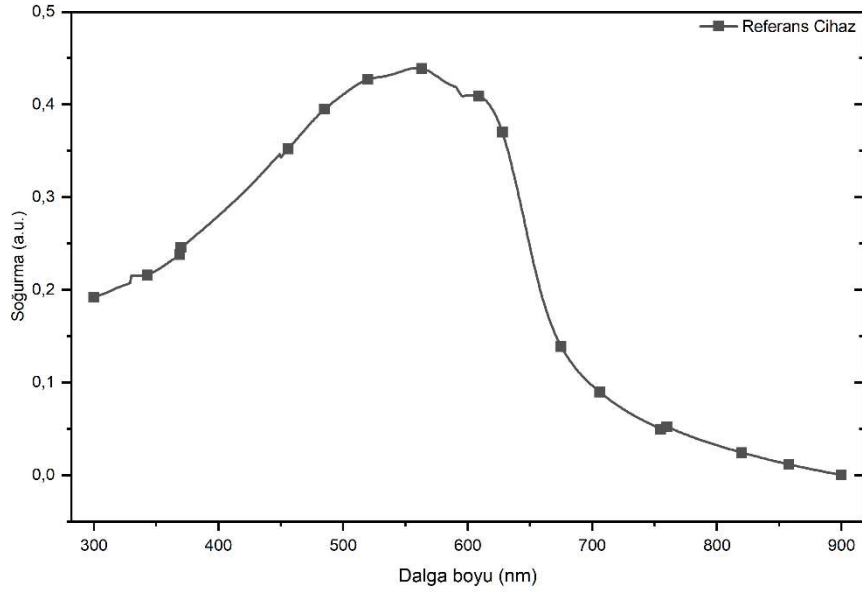


Şekil 4.16. Biyosensörlere uygulanan farklı analitler sonucu ölçülen soğurma-dalga boyu grafikleri ve bunların karşılaştırılması.

Şekil 4.16'daki grafik incelendiğinde biyosensörün tüm analitlere tepki verdiği görülmüştür. 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafikleri incelendiğinde saf su damlatılan biyosensör analit damlatılmayan, 1.antibiyotik (diafuryl) ve 2.antibiyotik(enfexia) biyosensörlerine göre ışığı daha fazla ışığı soğurduğu gözlemlenmiştir. Yaptığımız çalışmada 1:2 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensör incelendiğinde 1.antibiyotiğe saf sudan daha az tepki verdiği gözlemlenmiştir.

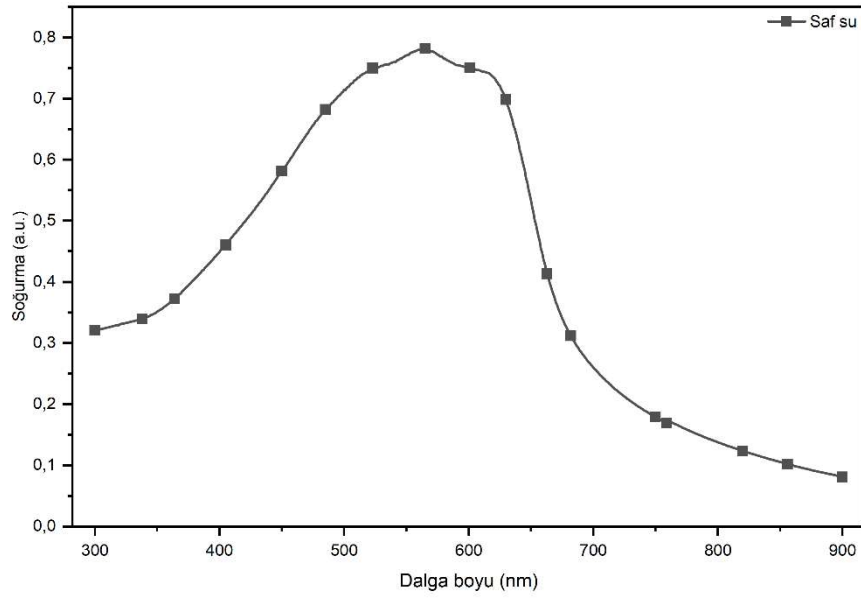
4.2.2. 2:1 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensörlerin optiksel karakterizasyonu

2:1 oranında P3HT:PLA üretilen biyosensörlere ait optiksel karakterizasyon testleri Saf haldeki (analit damlatılmayan), Saf su damlatılan biyosensör, Diafuryl damlatılan biyosensör ve Enfexia damlatılan biyosensör olarak sınıflandırılıp sırası ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.17-21'de verilmiştir.



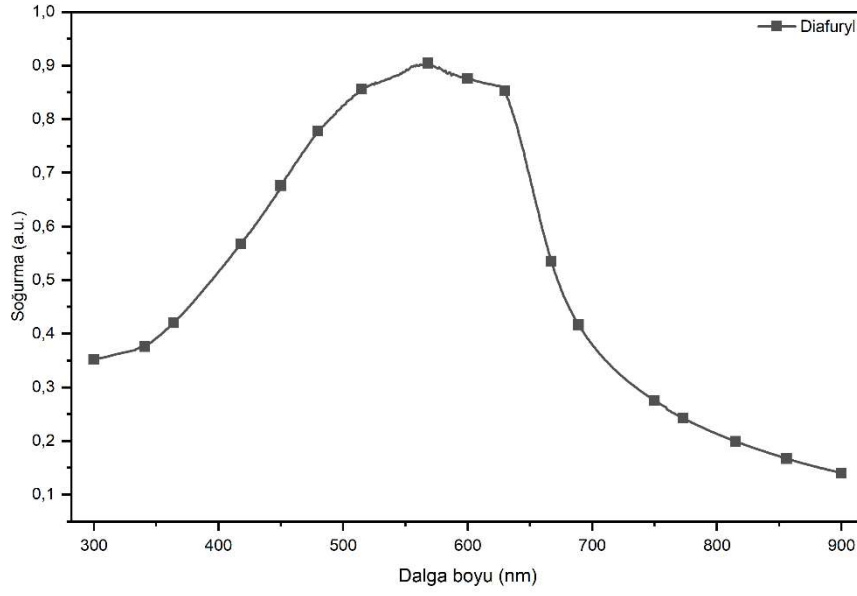
Şekil 4.17. 2:1 oranında nanomalzeme katkılı P3HT-PLA kaplı biyosensöre ait optiksel karakterizasyon soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.17’de biyosensör üzerine herhangi bir analit uygulanmadan önce referans değerleri elde edilen biyosensörün 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,45(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir.



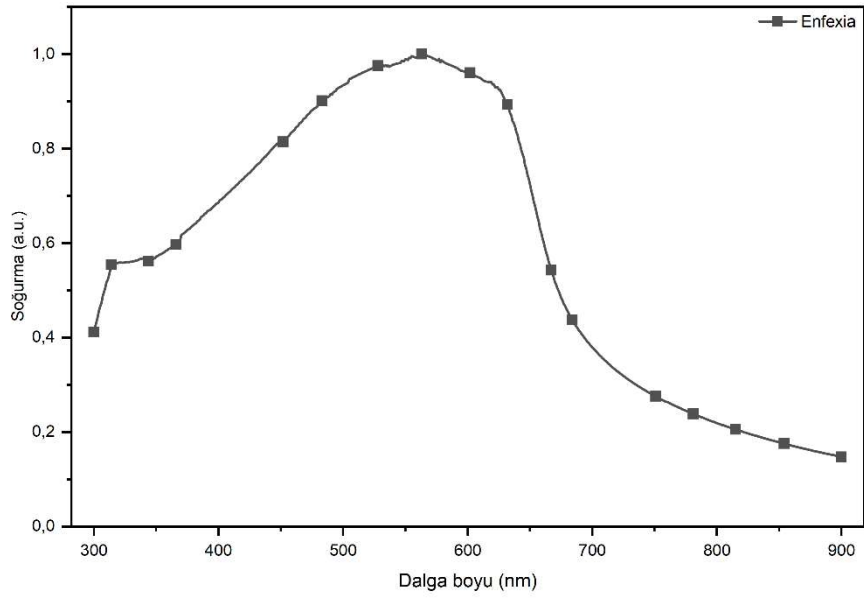
Şekil 4.18. Saf su damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.18’de biyosensör üzerine saf su damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,8(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan optik karakterizasyon testinde biyosensörün analit damlatılmayan cihaz grafiğine göre ışığı daha kuvvetli soğurduğu gözlemlenmiştir.



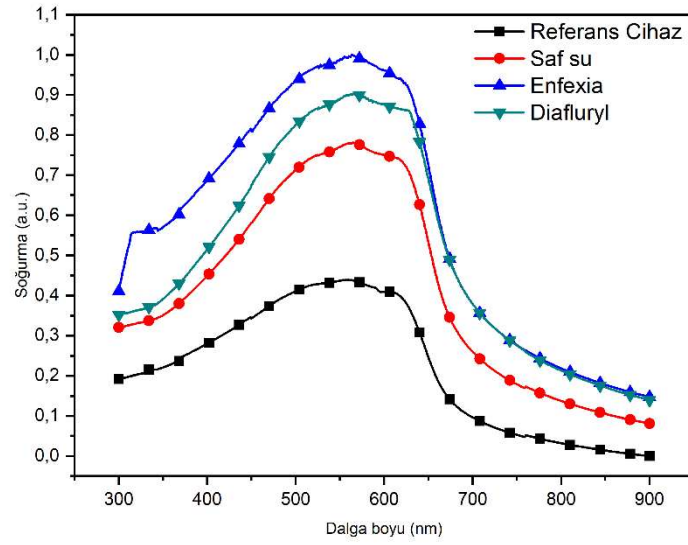
Şekil 4.19. Diafuryl damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.19’da biyosensör üzerine diafuryl damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 0,9(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Bu biyosensörün analit damlatılmayan ve saf su damlatılan biyosensör grafiklerine göre ışığı daha kuvvetli soğurduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. Enfexia damlatılmış biyosensöre ait soğurma-dalga boyu grafiği.

Şekil 4.20’de biyosensör üzerine enfexia antibiyotiği damlatılıp 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafiği görülmektedir. Yapılan optiksel karakterizasyon testlerinde biyosensörün soğurma şiddetinin 1(a.u.) değerinde olduğu ve bu değere 550nm dalga boyunda çıktığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde biyosensörün analit damlatılmayan, saf su ve diafuryl damlatılan biyosensör grafiklerine göre ışığı daha kuvvetli soğurduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21. Farklı analitler kullanılarak test edilen biyosensörlere ait soğurma-dalga boyu grafikleri ve bunların karşılaştırılması.

Şekil 4.21’de bulunan grafikler incelendiğinde biyosensörün tüm analitlere tepki verdiği görülmüştür. 350nm ile 900nm arasında alınan soğurma-dalga boyu grafikleri incelendiğinde biyosensörün optiksel karakterizasyon işlemine tepkisi, daha geniş spektruma sahip olması sebebi ile daha güçlü olan olan Enfexia’da en yüksek iken, Diafuryl’a olan tepkisi ise daha düşük olmuştur. Ayrıca saf su damlatılan ve analit damlatılmayan biyosensörlerin soğurma şiddeti antibiyotik damlatılan biyosensörlerden az olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırma ve deney çalışmaları kapsamında P3HT tabanlı organik malzeme ile PLA biyomalzemesi ve iz miktarda nanomalzeme kullanılarak geliştirilen biyosensörlerin antibiyotik tespiti üzerindeki performansları değerlendirilmiştir. Aynı biyosensörler farklı zamanlarda üretilmiş olup elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında benzer grafiklerin gözlemlenmesi bu biyosensörlerin kararlı olduğunu ortaya koymuştur. Sensör tepkisinin P3HT ve PLA konsantrasyonuna göre değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Saf suya aynı oranda karıştırılan antibiyotik örneklerinin (Diafuryl ve Enfexia) tespitine yönelik yapılan elektriksel ve optiksel karakterizasyonlar sonucunda biyosensörlerin katkı oranlarına bağlı olarak değişen seçicilik ve kararlılık seviyeleri ortaya konmuştur. Özellikle tez çalışmasında elde edilen sonuçlar kıyaslandığında 2:1 oranında P3HT:PLA içeren biyosensörlerde yüksek hassasiyet, kararlılık ve seçicilik performansı gözlemlenirken, 1:2 oranında P3HT:PLA içeren örneklerde biyomalzemenin organik yapıyı olumsuz etkileyerek sensör performansını düşürdüğü belirlenmiştir. P3HT oranı fazla olan sensörün saf su ile etkileşimi sensörün malzeme direncini arttırırken, düşük oranda P3HT içeriğine sahip sensörün saf su ile etkileşimi malzeme direncinin azalması ile sonuçlanmıştır. Bu bulgular biyomalzeme ve organik malzeme oranlarının biyosensör performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Antibiyotik uygulanan her iki sensörde de dirençte benzer bir azalma ve buna karşılık akım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, antibiyotiklerin kimyasal yapısının biyokimyasal PLA matrisinde yapısal değişimlere yol açtığını ve P3HT ağını güçlendirerek sistemin elektriksel iletkenliğini artırdığını düşündürmektedir. Sonuç olarak disiplinlerarası yaklaşımlar ve nanoteknolojiye dayalı malzeme geliştirme stratejileri, biyosensörlerin antibiyotik tespiti gibi halk sağlığı için kritik öneme sahip alanlarda etkili bir biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen veriler organik ve biyomalzeme tabanlı nanomalzemelerin katkısıyla geliştirilen biyosensörlerin hem kararlılık hem de seçicilik açısından üstün performans sergileyebileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Lakshmipriya, T. (2019). An introduction to biosensors and biomolecules. (Ed.:Gopinath, S. C.), **Nanobiosensors for Biomolecular Targeting**, Amsterdam: Elsevier Yayıncılık s.1-21.
- [2] Sharma, S. K., Sehgal, N. ve Kumar, A. (2003). "Biomolecules for development of biosensors and their applications". **Current Applied Physics**, Cilt:3, Sayı:2, s.307-316.
- [3] Roco, MC. (2005) "International perspective on government nanotechnology funding in". **Journal of Nanoparticle Research**, Cilt:12, Sayı:3, s.700-707.
- [4] Winkelmann, K. ve Bhushan, B. (2016). **Global perspectives of nanoscience and engineering education**, ABD: Springer yayıncılık.
- [5] Kuzma, J. Priest S. (2010). "Nanotechnology, Risk and Oversight:Learning Lessons From Related Emerging Technologies". **Risk Analysis: An International Journal**, Cilt:30, Sayı:11, s.1688-1698.
- [6] Aluya, J. (2015). "Nanotechnology Implications and Global Leadership Perspectives". **Energy Sources**, Cilt:10, Sayı:1, s.31-37.
- [7] Tüylek, Z. (2016). "Küçük şeylerin hikâyesi: Nanomalzeme". **Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi**, Cilt:5, Sayı:2, s.130-141.
- [8] Chen, F-M. ve Liu X. (2016). "Advancing biomaterials of human origin for tissue engineering". **Progress in Polymer Science**, Cilt:53, s.86-168.
- [9] Cobo I., Li M., Sumerlin BS. ve Perrier S. (2015). "Smart hybrid materials by conjugation of responsive polymers to biomacromolecules". **Nature Materials**, Cilt:14, Sayı:2, s.143-159.
- [10] Komiyama M., Yoshimoto K., Sisido M. ve Ariga K. (2017). "Chemistry Can Make Strict and Fuzzy Controls for Bio-Systems: DNA Nanoarchitectonics and Cell-Macromolecular Nanoarchitectonics". **Bulletin Chemical Society Japon**, Cilt:90, Sayı:9, s.967-1004.
- [11] Elaissari A. (2003). **Colloidal biomolecules, biomaterials, and biomedical applications**. (116) ABD: CRC yayıncılık.
- [12] Tüylek, Z. (2021). "Biyolojik sistemlerde gelecekteki nano/biyosensör ürünlerine hazırlık". **Uluslararası Biyosistem Mühendisliği Dergisi**, Cilt:2, Sayı:1, s.17-39.
- [13] Tüylek, Z. (2017). "Biyosensörler ve nanoteknolojik etkileşim". **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt:6, Sayı:2, s.71-80.
- [14] Thevenot, D.R., Toth, K., Durst, R.A. ve Wilson, G.S. (2001). "Electrochemical biosensors: Recommended definitions and classification". **Analytical Letters**, Cilt:34, Sayı:5, s.635-659.
- [15] Naresh, V. ve Lee, N. (2021). "A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors". **Sensors**, Cilt:21, Sayı:4, s.1109.
- [16] Bhatia, D., Paul, S., Acharjee, T. ve Ramachairy, S. S. (2024). "Biosensors and their widespread impact on human health". **Sensors International**, Cilt:5.

- [17] Pan, Y., Sonn, G. A., Sin, M. L., Mach, K. E., Shih, M. C., Gau, V. ve Liao, J. C. (2010). “Electrochemical immunosensor detection of urinary lactoferrin in clinical samples for urinary tract infection diagnosis”. **Biosensors and Bioelectronics**, Cilt:26, Sayı:2, s.649-654.
- [18] Keskin, M. ve Arslan, F. (2020). “Biyosensörler”. **Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi**, Cilt:1, Sayı:1-2, s.51-60.

İnternet Kaynakça

http-1:<https://tr.wikipedia.org/wiki/Nanoteknoloji>
(Erişim tarihi:16.01.2026)



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Muratcan ÇAM
Yabancı Dil	İngilizce

Eğitim

Lisans	2020, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2026, İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yayın Listesi

Bildiri	Çam M. Taş B. Kaynar Ü. H. Tüzün Özmen Ö. (2025), 9.Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımları Kongresi, Biyomoleküllerin Tespitinde Kullanılan Nanomalzeme Tabanlı Biyosensör Tasarımı ve Uygulamaları, İstanbul
---------	---