

T.C.
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MOLEKÜLER BİYOTEKNOLOJİ
DİSİPLİNLERARASI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

TiS₂/GO NANOKOMPOZİT TEMELLİ NANOSENSÖRLER
İLE PARATHION TAYİNİ

Adem YAĞIZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Murat UYGUN

Bu tez Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FEN-24005 proje numarası ile desteklenmiştir.

AYDIN-2025

KABUL VE ONAY

T.C. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Moleküler Biyoteknoloji Disiplinlerarası Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Adem YAĞIZ tarafından hazırlanan “TiS₂/GONanokompozit Temelli Biyosensörler ile Parathion Tayini” başlıklı tez, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 06/08/2025

Üye (T.D.) : (ünvan, adı soyadı) (üniversite) (imza) ...

Üye : (ünvan, adı soyadı) (üniversite) (imza) ...

Üye : (ünvan, adı soyadı) (üniversite) (imza) ...

ONAY:

Bu tez Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri tarafından uygun görülmüş ve Sağlık Bilimleri Enstitüsünün tarih ve sayılı oturumunda alınan nolu Yönetim Kurulu kararıyla kabul edilmiştir.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamda ilgi, yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen kıymetli danışmanım Prof. Dr. Murat UYGUN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca bana her konuda yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen Dr. Baha ÖNDEŞ'e Prof. Dr. Deniz AKTAŞ UYGUN'a ve çalışma arkadaşım olmakla beraber bana her zaman dostluk olan çok kıymetli Özgün US ve ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince gösterdiği sabır, özveri ve destekleri için eşim Tuğba YAĞIZ'a ve sevgili aileme ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Pestisitler	3
2.1.1. Pestisitlerin Ekosistem Üzerindeki Etkileri	3
2.1.2 Pestisit Türleri	4
2.1.3. Pestisitlerin Kimyasal Yapıları.....	5
2.2. Pestisitlerin Analiz Şekilleri	7
2.3. Elektrokimyasal Analiz Yöntemleri	8
2.4. Pestisitlerde Pestisitlerin Miktar Tayini ve Kontrolünün Önemi	9
2.5. Pestisit Analiz Yöntemleri.....	11
2.5.1.KromatografikYöntemler	11
2.5.2. Elektrokimyasal Analizler	12
2.6. Elektrokimyasal Sensörler.....	15
2.7. Nanopartiküller.....	17
2.8. Pestisitler ve Elektrokimyasal Analizleri	18
2.8.1. Döngüsel Voltametri (CV) ve Pestisit Analizlerinde Kullanımı	19
2.8.2. Diferansiyel Puls Voltametrisi (DPV) ve Pestisit Analizlerindeki Kullanımı	19
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	22

3.1. Gereç.....	22
3.1.1. Cihazlar.....	22
3.1.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler.....	22
3.2. Yöntem	23
3.2.1. TiS_2/GO Nanokompozit Temelli Nanosensörler ile Parathion Tayini	23
3.2.2. Parathion Tayini için Biyosensörlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu.....	24
4. BULGULAR	25
4.1. TiS_2/GO Kompozitlerin Karakterizasyonu ve Elektrokimyasal Davranışı	25
4.1.1. TiS_2/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Karakterizasyonu.....	26
4.2. Parathion Tayini için Elektrotların Nanokompozit Kaplanması	26
4.2.1. Parathion Tayini İçin Optimum pH Belirlenmesi.....	28
4.2.2. TiS_2/GO Temelli SPE Perde Baskılı Elektrotlar İçin Optimum Parathion Derişiminin Belirlenmesi	28
4.2.3. TiS_2/GO ile Kaplı Biyosensörlerin Parathion Tayininde Tekrar Üretilebilirliğinin Belirlenmesi	30
5. TARTIŞMA.....	31
5.1. TiS_2/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Karakterizasyonu.....	31
5.1.2. TiS_2/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Elektrokimyasal Davranışı	32
5.1.3. Parathion Tayini İçin Optimum pH Belirlenmesi.....	33
5.1.4. TiS_2/GO ile Kaplı Biyosensörlerin Parathion Tayininde Tekrar Üretilebilirliğinin Belirlenmesi	34
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	36
KAYNAKLAR.....	38
BİLİMSEL ETİK BEYANI.....	52
ÖZ GEÇMİŞ.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AgNWs	: Gümüş Nanoteller (Silver Nanowires)
AuE	: Altın Elektrot (Gold Electrode)
AuNPs	: Altın Nanopartiküller (Gold Nanoparticles)
BDD	: Bor Katkılı Elmas (Boron-Doped Diamond)
CdS QDs	: Kadmiyum Sülfür Kuantum Noktaları (Cadmium Sulfide Quantum Dots)
CE	: Glassy Carbon Elektrot (Glassy Carbon Electrode)
Chit	: Kitosan (Chitosan)
CNT	: Karbon Nanotüp (Carbon Nanotube)
CoPc	: Kobalt Ftalosiyenin (Cobalt Phthalocyanine)
CPE	: Karbon Pastası Elektrot (Carbon Paste Electrode)
CV	: Döngüsel Voltametri (Cyclic Voltammetry)
DPV	: Diferansiyel Puls Voltametri (Differential Pulse Voltammetry)
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (Electrochemical Impedance Spectroscopy)
Fe₃O₄	: Manyetit (Magnetite)
GO	: Grafen Oksit (Graphene Oxide)
GO	: Grafen Oksit (Graphene Oxide)
GR	: Grafen (Graphene)
ITO	: İndiyum Kalay Oksit (Indium Tin Oxide)
KCl	: Potasyum Klorür (Potassium Chloride)
LOD	: Tespit Sınırı (Limit of Detection)
LOQ	: Ölçüm Sınırı (Limit of Quantification)
MIP	: Moleküler Baskılanmış Polimer (Molecularly Imprinted Polymer)
MnO₂	: Manganez Dioksit (Manganese Dioxide)
MoS₂	: Molibden Disülfür (Molybdenum Disulfide)
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi-Walled Carbon Nanotube)
NafionTM	: Sülfonatlanmış Tetrafloroetilen Bazlı Polimer (İletken kaplama malzemesi)

NiO	: Nikel Oksit (Nickel Oxide)
PBS	: Fosfat Tamponlu Saline (Phosphate Buffered Saline)
PBS	: Fosfat Tamponlu Saline (Phosphate Buffered Saline)
PEDOT:PSS	: Poli(3,4-etilendioksitiyofen):Polistiren sülfonat
rGO	: İndirgenmiş Grafen Oksit (Reduced Graphene Oxide)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
SPCE	: Ekran Baskılı Karbon Elektrot (Screen-Printed Carbon Electrode)
SPE	: Perde Baskılı Elektrot (Screen-Printed Electrode)
SPE	: Perde Baskılı Elektrot (Screen-Printed Electrode)
TiS₂	: Titanyum Disülfür (Titanium Disulfide)
TiS₂	: Titanyum Disülfür (Titanium Disulfide)
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (X-ray Photoelectron Spectroscopy)
ZnO-NRs	: Çinko Oksit Nanorodlar (Zinc Oxide Nanorods)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Elektrokimyasal analiz yöntemleri şeması.....	8
Şekil 2. Sentezlenen nanosensörün SEM görüntüsü	25
Şekil 3. Sentezlenen biyosensörün EDX görüntüsü ve tarama sonuçları.....	26
Şekil 4. TiS ₂ /GO nanokompozit içeren nanosensörün elektrokimyasal davranışları a) CV b) EIS.....	27
Şekil 5. Farklı pH tamponlarının parathion DPV sinyal etkisi ölçüm grafiği.....	28
Şekil 6. Farklı derişimlerdeki parathion'un DPV sinyaline Etkisi a) DPV b) deneme grafiği (log)	29
Şekil 7. DPV Yöntemiyle parathion analizi için hazırlanan elektrotların tekrar kullanılabilirlik sonuçlarının grafiği	30

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kullanılan kimyasal maddeler tablosu	22
Tablo 2. Parathion tayini için hazırlanmış nanosensörün literatürde bulunan nanosensörlerle karşılaştırılması.....	34

ÖZET

TiS₂/GO NANOKOMPOZİT TEMELLİ NANOSENSÖRLER İLE PARATHİON TAYİNİ

Adem Y. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoteknoloji Disiplinlerası Yüksek Lisans Tezi, Aydın, 2025.

Amaç: Parathion pestisitini TiS₂/GO Nanokompozit Temelli Nanosensörler Tayin etmek amacı ile yapıldı.

Gereç ve Yöntem: Bu çalışmada, TiS₂/GO nanokompozit modifiye elektrot kullanılarak elektrokimyasal yöntemle parathion tayini gerçekleştirilmiş ve optimizasyon, karakterizasyon ile analitik performans değerlendirilmiştir.

Bulgular: Sentezlenen TiS₂/GO kaplı biyosensörlerin SEM ve EDX analizleriyle morfolojik karakterizasyonu yapılmış ve elektrokimyasal davranışları DPV ve EIS ölçümleriyle incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan Parathion pestisitinin tayini için SPE elektrotları TiS₂/GO + %5 Nafion™ karışımıyla modifiye edilmiş olup, optimum pH çalışmaları sonucunda en yüksek sinyalin pH 7.0'da (153.425 µA) ve kabul edilebilir tekrarlanabilirliğin (RSD %6.864) sağlandığı belirlenmiştir. Farklı derişimlerde (10⁻⁹ – 10⁻⁴ M) yapılan ölçümlerle konsantrasyon-akım ilişkisi grafiği oluşturulmuş, ayrıca 10⁻⁵ M Parathion ile yapılan tekrarlanabilirlik testlerinde düşük RSD (%1.46) değeriyle yüksek tekrarlanabilirlik gösterilmiştir

Sonuç: Bu tez çalışmasında TiS₂/GO nanokompoziti ile SPE perde baskılı elektrotlar kullanılarak Elektrokimyasal yöntemlerle Parathion tayini yapılmıştır. Bu sayede geleneksel analiz yöntemlerine ek olabilecek elektrokimyasal yöntem geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Amperometri, Grafen oksit, Nano-kompozit, Parathion, Pestisit, TiS₂, Sensör.

ABSTRACT

DETERMINATION OF PARATHION WITH TiS₂/GO NANOCOMPOSITE BASED NANOSENSORS

Adem Y. Aydın Adnan Menderes University, Institute of Health Sciences, Interdisciplinary Master's Thesis in Molecular Biotechnology, Aydın, 2025.

Objective: This study was conducted to determine the pesticide parathion using TiS₂/GO Nanocomposite-Based Nanosensors.

Material and Methods: In this study, parathion detection was performed via an electrochemical method using a TiS₂/GO nanocomposite-modified electrode, followed by optimization, characterization, and evaluation of analytical performance

Results: : The synthesized TiS₂/GO-coated biosensors were morphologically characterized using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), while their electrochemical behavior was evaluated through differential pulse voltammetry (DPV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements. For the detection of the widely used pesticide Parathion, screen-printed electrodes (SPEs) were modified with a composite of TiS₂/GO and 5% Nafion™. Optimization studies indicated that the maximum current response (153.425 µA) was obtained at pH 7.0, with acceptable reproducibility (relative standard deviation, RSD = 6.864%). A linear relationship between current response and Parathion concentration was established over a range of 10⁻⁹ to 10⁻⁴ M. Furthermore, repeatability tests conducted at 10⁻⁵ M Parathion demonstrated high precision, yielding a low RSD of 1.46%

Conclusion: This thesis study presents the electrochemical determination of parathion using TiS₂/GO nanocomposite-modified screen-printed electrodes (SPEs). The developed electrochemical method offers a viable alternative to conventional analytical techniques, demonstrating its potential as a complementary approach for parathion detection.

Key Words: Amperometry, Graphene oxide (GO), Nanocomposite, Parathion, Pesticide, Sensor, Titanium disulfide (TiS₂).

1. GİRİŞ

Tarımsal üretimde, zararlı organizmaları kontrol etmek ve verimi artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan pestisitler, modern tarımın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Kumar diğerleri, 2020). Ancak bu kimyasal maddeler, hem ekosistemler hem de insan sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır (Singh ve Patel, 2019). Pestisitlerin tarımsal ürünlerde, su kaynaklarında ve çevresel ortamlarda kalıntıları, çevre ve gıda güvenliği açısından ciddi endişelere neden olmaktadır (Lee ve diğerleri, 2021). Pestisitlerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin önlenmesi için, bu kimyasalların hassas analiz yöntemleriyle tespit edilmesi ve miktarlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Wang ve Chen, 2018)

Geleneksel pestisit analiz yöntemleri, yüksek maliyetler, uzun analiz süreleri ve bazı durumlarda zararlı kimyasalların kullanımı gibi sınırlamalarla karşı karşıyadır (Zhao ve diğerleri, 2017). Bu sınırlamaların üstesinden gelmek ve daha çevre dostu, hızlı ve duyarlı bir analiz yöntemi geliştirmek için, enzim içermeyen elektrokimyasal analizler son yıllarda büyük ilgi çekmiştir (Garcia ve Lopez, 2020). Elektrokimyasal analizler, elektrik akımının ölçülmesi yoluyla analitlerin tespitini ve ölçümünü sağlayan bir yöntemdir ve çevre ve gıda güvenliği açısından önemli bir potansiyele sahiptir (Martinez ve diğerleri, 2019).

Pestisitlerin enzim içermeyen elektrokimyasal analizlerle tespiti ve ölçümü üzerine odaklanmaktadır. Amperometrik yöntemler ve elektrokimyasal algılayıcılar, pestisitlerin elektroaktif özelliklerinden yararlanarak eser miktardaki varlıklarını bile belirleyebilmekte ve konvansiyonel analiz tekniklerine kıyasla daha hızlı, uygun maliyetli çözümler sunabilmektedir (Kim ve diğerleri, 2022). Ayrıca, nano partiküllerin elektrokimyasal analizlerdeki rolü de bu çalışmanın önemli bir parçası olacaktır (Zhang ve diğerleri, 2023). Nanomalzeme tabanlı elektrot tasarımları, yüzey alan genişlemesi sayesinde analitik duyarlılığı önemli ölçüde artırarak, pestisit analizlerinde yüksek performanslı tespit platformları geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Singh ve diğerleri, 2021).

Bu tez çalışması, pestisitlerin enzim içermeyen elektrokimyasal analizlerle tespiti ve ölçümü konusunda önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Geliştirilen yeni analiz

yöntemleri, çevre ve gıda güvenliği açısından daha duyarlı ve verimli bir yaklaşım sunarak, pestisitlerin doğru ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesine katkıda bulunacaktır (Lopez ve Garcia, 2024). Bu çalışma, tarımsal ürünlerde ve çevrede pestisit kalıntılarının izlenmesi ve kontrol edilmesi konusunda önemli bir ilerleme sağlayacaktır (Wang ve diğerleri, 2022)

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Pestisitler

Pestisitler, tarımsal üretimden orman yönetimine, evsel uygulamalardan toplum sağlığına kadar geniş bir yelpazede zararlı canlılarla mücadelede kullanılan sentetik bileşiklerdir (Al-Salah, 1994). Genellikle böcekler, kemirgenler, mantarlar, bakteriler ve diğer hastalık taşıyan organizmalarla mücadelede kullanılırlar. Pestisitler, tarım ve gıda üretiminde verimliliği artırarak ürün kayıplarını önlemeye ve zararlı organizmaların neden olduğu hastalıkların yayılmasını engellemeye yardımcı olurlar. Ne var ki, pestisitlerin kontrolsüz şekilde yaygınlaşması, hem ekolojik dengeyi bozabilir hem de insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturabilir (Weiss ve Amler, 2004). Toprak ve su kirliliği, su ekosistemlerinde ve doğal yaşam alanlarında zarar görmesi, tarım ürünlerinde kalıntıların kalması gibi olumsuz etkileri olabilir. Ayrıca, pestisitlerin uzun süreli maruz kalma, insan sağlığı için potansiyel tehlikeleri içerebilir. Bazı tarım ilaçları, kanser yapıcı özellikler taşıyabilir, sinir sistemine zarar verebilir veya hormonal dengeyi bozabilir, bu da önemli sağlık riskleri doğurabilir (Weiss ve Amler, 2004). Bu nedenle, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve pestisit kullanımının azaltılması önemlidir (Sabzewari & Hofman, 2022). Organik tarım, entegre zararlı yönetimi ve biyolojik mücadele gibi alternatif yöntemler, pestisit kullanımının etkilerini azaltarak çevre ve insan sağlığına daha az zarar verme potansiyeline sahiptir (Kim ve diğerleri, 2017). Ayrıca, bilinçli tüketici davranışları ve düzenleyici önlemler de pestisitlerin kontrollü ve güvenli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayabilir (Kim ve diğerleri, 2017).

2.1.1. Pestisitlerin Ekosistem Üzerindeki Etkileri

Zararlı mücadele kimyasalları olarak bilinen pestisitler, tarımsal alanlardan orman ekosistemlerine, yerleşim birimlerinden toplum sağlığı uygulamalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Al-Salah, 1994). Genellikle böcekler, kemirgenler, mantarlar,

bakteriler ve diğ er hastalık taşıyan organizmalarla mücadelede kullanılırlar. Pestisitler, tarım ve gıda üretiminde verimliliğı artırarak ürün kayıplarını önlemeye ve zararlı organizmaların neden olduğı hastalıkların yayılmasını engellemeye yardımcı olurlar. Ancak, pestisitlerin yaygın kullanımı çevresel ve sağılık sorunlarına neden olabilir (Weiss ve Amler, 2004). Toprak ve su kirliliğı, su ekosistemlerinde ve doğıal yaşam alanlarında zarar görmesi, tarım ürünlerinde kalıntıların kalması gibi olumsuz etkileri olabilir. Ayrıca, pestisitlerin uzun süreli maruz kalma, insan sağılığı için potansiyel tehlikeleri içerebilir. Bazı pestisitler kanserojen, nörotoksik veya endokrin bozucu olabilir ve ciddi sağılık sorunlarına yol açabilir (Weiss ve Amler, 2004). Bu nedenle, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesi ve pestisit kullanımının azaltılması önemlidir (Sabzewari ve Hofman, 2022). Organik tarım, entegre zararlı yönetimi ve biyolojik mücadele gibi alternatif yöntemler, pestisit kullanımının etkilerini azaltarak  evre ve insan sağılığına daha az zarar verme potansiyeline sahiptir (Kim ve diğ erleri, 2017). Ayrıca, bilinçli tüketiciler ve düzenleyici önlemler de pestisitlerin kontrollü ve güvenli bir şekilde kullanılmasına katkı sağılayabilir (Kim ve diğ erleri, 2017).

2.1.2. Pestisit Türleri

Böcek populasyon kontrol ajanları olarak bilinen bu kimyasal maddeler, zararlı böcek türlerinin sayısal dengelerini kontrol altına almak üzere özel olarak geliştirilmiş tarım ilaçlarıdır (Günay ve Yılmaz, 2020). Organofosfat grubu insektisitler, sinir iletiminde kritik rol oynayan asetilkolinesteraz enziminin aktivitesini bloke ederek letal etki oluşturur - malathion, chlorpyrifos ve diazinon bu farmakolojik özellikteki önemli bileşenlerdendir (Atlı ve şahin, 2019). Nörolojik toksisiteleri nedeniyle insan sağılığı açısından risk oluşturan bu maddelerin aksine, karbamatlı insektisitler (carbaryl ve aldicarb örneklerinde olduğı gibi) benzer inhibitör mekanizmayla çalışmakla beraber çevresel persistansları daha düşüktür (Demir ve diğ erleri, 2021).

Piretroitler ise böcek sinir sistemindeki sodyum kanallarını etkileyerek yüksek öldürücü etki gösterir (deltamethrin, permethrin) ve memeliler için düşük toksisiteye sahiptir ( zt rk ve diğ erleri, 2018). İmidacloprid ve thiamethoxam gibi pestisitler, böcek

sinir sistemi bloke etme mekanizmasıyla çalışır; fakat arı ölümlerine yol açması sebebiyle birçok ülkede yasaklanmış veya kısıtlanmıştır (Kaya ve diğerleri, 2022).

Yabancı ot mücadelesinde kullanılan bitki koruma ürünleri olan herbisitler, tarımsal verimliliği artırmada önemli araçlardır (Aydın ve Özkan, 2020). Non-selektif herbisitler (glifosat içeren formülasyonlar) tüm bitki türlerini etkisiz hale getirirken, spesifik herbisitler (2,4-D gibi) sadece belirlenmiş hedef türler üzerinde etki gösterir (Tekin ve diğerleri, 2021). Toprak dekontaminasyon ajanları (diuron gibi) ise uygulandıkları alanlarda uzun süreli bitki gelişimini engelleyici özellik gösterir (Erdoğan ve Demirci, 2019).

Mantar hastalıklarını engelleyici kimyasallar olarak bilinen fungusitler, bitkilerde fungal enfeksiyonların kontrolünde etkin rol oynar. Sistemik etki gösteren fungusitler (triadimefon gibi) bitki dokularında yayılım gösterirken, kontakt etkili fungusitler (mancozeb bazlı formülasyonlar) yalnızca uygulandıkları yüzeyde koruyucu bir tabaka meydana getirir. (Çelik ve diğerleri, 2020). Diğer pestisit kategorileri arasında kemirgen popülasyon kontrol ajanları (warfarin gibi rodentisitler), kök zararlısı nematodlara karşı geliştirilen bileşikler (aldicarb gibi nematisitler) ve akar popülasyon yönetiminde kullanılan preparatlar (amitraz içeren akarisitler) yer almaktadır (Yıldız ve diğerleri, 2021).

2.1.3. Pestisitlerin Kimyasal Yapıları

Pestisitler, tarımsal üretimde verim kaybını önlemek, hastalık taşıyan vektörleri kontrol altına almak ve istenmeyen zararlı organizmaları yok etmek amacıyla kullanılan kimyasal bileşiklerdir (Yarpuz ve Bozdoğan, 2018). Pestisitler, temel kimyasal kompozisyonları dikkate alındığında organik ve inorganik bileşikler şeklinde iki ana gruba ayrılmakta olup, her bir grup hedef organizmalar üzerinde kendine özgü toksikolojik etki mekanizmaları ile etki göstermektedir.

Organofosfatlı pestisitler, fosforik asit türevleri olup sinir sisteminde asetilkolinesteraz enzimini inhibe ederek etki gösterirler (Bolognesi ve Merlo, 2011). Bu gruptaki bileşiklerin yapısında merkezi bir fosfor atomu bulunur ve bu atomun etrafında alkil, aril veya oksijen grupları yer alır. Parathion ve malathion, bu sınıfın yaygın örneklerindendir (Ünlü, 2020). Karbamatlı pestisitler ise karbamik asit türevleri olup benzer

şekilde asetilkolinesterazı inhibe ederler (Günay ve Şahin, 2019). Kimyasal yapılarında R1-NH-COO-R2 şeklinde bir fonksiyonel grup bulunan bu bileşiklerden aldikarb ve karbofuran, tarımda sıkça kullanılan örneklerdir (Demirci, 2021).

Piretroitler, doğal piretrinlerin sentetik türevleri olup sinir hücrelerinde sodyum kanallarını etkileyerek insektisit etki gösterirler (Aktar ve diğerleri, 2009). Bu bileşiklerin yapısında siklopropan halkası ve ester bağı bulunur. Deltametrin ve permetrin, bu grubun yaygın kullanılan temsilcileridir (Özkan, 2017). Neonikotinoidler ise nikotinik asetilkolin reseptör agonistleri olup özellikle böcekler üzerinde seçici toksisite gösterirler (Goulson, 2013). Kimyasal yapılarında nitro-guanidin veya nitrometilen grubu bulunan bu bileşiklerden imidakloprid ve tiametoksam, tarımda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kara ve Yılmaz, 2020).

Triazin herbisitleri, fotosentezi inhibe ederek yabancı otların büyümesini engeller (Solomon ve diğerleri, 2008). Bu bileşiklerin yapısında üç azot atomu içeren heterosiklik bir halka bulunur. Atrazin ve simazin, bu grubun bilinen örneklerindendir (Türkmen ve Büyük, 2019).

Pestisitlerin kimyasal yapıları, çevresel kalıcılıklarını ve biyoakümülyasyon potansiyellerini belirler. Özellikle klorlu organik bileşikler (örneğin DDT) uzun yarı ömürleri nedeniyle ekosistemde birikerek besin zincirine geçebilir (Karci ve Balcioğlu, 2016). Ayrıca, pestisitlerin su kaynaklarına karışması, akutik organizmalar üzerinde toksik etkilere yol açabilmektedir (Topuz ve Alkan, 2015).

Pestisitlerin kimyasal yapıları, etki mekanizmaları ve çevresel etkileri birbirleriyle yakından ilişkilidir. Organofosfatlar ve karbamatlar gibi bileşikler insan sağlığı üzerinde akut toksisite riski taşıırken, neonikotinoidler gibi yeni nesil pestisitlerin uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Şahin ve Demir, 2022). Bu nedenle, pestisit kullanımının sürdürülebilir tarım politikaları çerçevesinde düzenlenmesi ve alternatif mücadele yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

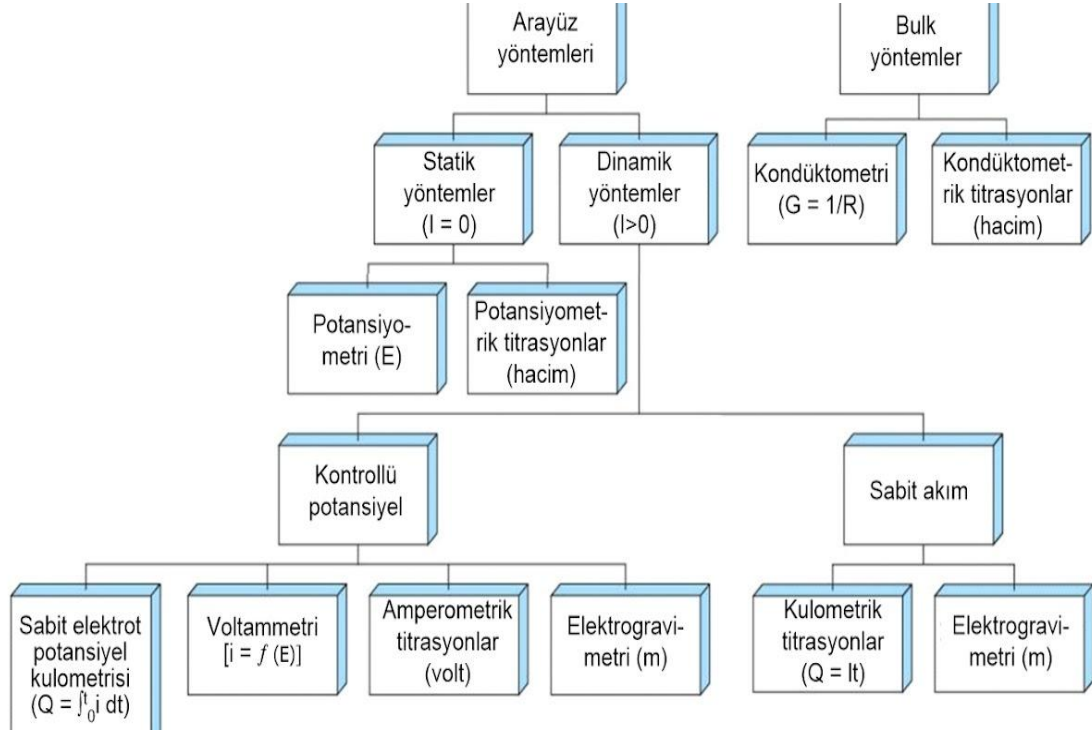
2.2. Pestisitlerin Analiz Şekilleri

Pestisit analizleri, çevre ve gıda güvenliği açısından önemli bir adımdır ve pestisit içeriğinin doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlar. Pestisit analizleri, tarım ürünlerinde, su kaynaklarında, toprakta, gıda ürünlerinde ve hatta insan ve hayvan dokularında yapılabilmektedir. Pestisit analizleri, yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektiren karmaşık laboratuvar tekniklerini içerir. Elektrokimyasal analizler ve genellikle gaz kromatografisi (GC) ve sıvı kromatografisi (LC) gibi analitik yöntemler, pestisit bileşiklerinin kimyasal yapılarını ve konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılır (Liao ve diğerleri, 2022). Kütle spektrometrisi gibi ek teknikler de pestisitlerin belirlenmesini daha kesin ve güvenilir hale getirebilir.

Pestisit kalıntı analizleri, tarım ürünlerinde kullanılan kimyasal maddelerin mevzuatla belirlenmiş maksimum kalıntı limitlerini (MRL) aşp aşmadığının belirlenmesinde kritik rol oynar.. Ayrıca, çevre kirliliğinin belirlenmesi ve kontrol altına alınması için de önemli bir rol oynar. Tarımsal ürünlerdeki pestisit kalıntılarının tespiti, tüketicilerin güvenli gıda tüketmesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Pestisit analizleri, tarımsal uygulamalardaki güvenli kullanım ve çevresel koruma çabalarına da katkıda bulunur. Ayrıca, yeni pestisit formülasyonlarının ve alternatif yöntemlerin geliştirilmesi için de temel veriler sağlayarak daha güvenli ve etkili ürünlerin piyasaya sürülmesine olanak tanır. Pestisit analizleri, çevre ve insan sağlığı açısından olumsuz etkilerin azaltılması ve pestisit kullanımının kontrollü ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için vazgeçilmez bir araçtır (Dutta ve diğerleri, 2020).

Regülasyon otoriteleri ve bilim insanları, pestisit analiz yöntemlerinin sürekli iyileştirilmesi ve modernize edilmesi yoluyla hem insan sağlığını koruyan hem de ekolojik dengeyi gözetten daha sürdürülebilir tarım uygulamalarının hayata geçirilmesine önemli katkılar sunabilmektedir.

2.3. Elektrokimyasal Analiz Yöntemleri



Şekil 1. Elektrokimyasal Analiz Yöntemleri Şeması (Yalçın, 2025).

Elektrokimyasal sensörler, kimyasal analizlerde yaygın olarak kullanılan cihazlardır ve farklı çalışma prensiplerine dayanır. Elektrokimyasal analiz yöntemlerinden amperometri, elektrot yüzeyinde meydana gelen yükseltgenme-indirgenme tepkimeleri sonucu oluşan elektrik akımının ölçüm prensibine dayanmaktadır (Wang, 2008). Bu yöntem, özellikle belirli bir molekülün konsantrasyonunun belirlenmesinde etkilidir (Bakker ve Qin, 2006). Potansiyometri ise bir elektrot ile referans elektrot arasındaki potansiyel farkını ölçerek iyon aktivitesini tespit eder; pH ölçümleri bu yönteme iyi bir örnektir (Bühlmann ve diğerleri 1998). İmpedans spektroskopisi ise elektrot yüzeyinde meydana gelen değişimleri alternatif akım kullanarak izler ve özellikle yüzey modifikasyonlarının veya biyomoleküllerin etkileşimlerinin incelenmesinde kullanılır (Lisdat ve Schäfer, 2008).

Bu yöntemler, saha analizleri, hızlı ön tarama testleri ve taşınabilir analiz sistemleri gibi çeşitli uygulama alanlarında tercih edilir. Örneğin, çevresel izlemede su kalitesinin anında değerlendirilmesi veya klinik tanıda hastalık belirteçlerinin tespiti için pratik

çözümler sunar (Ronkainen ve diğerleri, 2010). Mobil kullanıma uygun yapıları sayesinde, sahada hızlı ve doğru analiz sonuçları elde edilmesine olanak tanır (Grieshaber ve diğerleri, 2008).

Elektrokimyasal sistemlerin temel bileşenleri arasında çalışma elektrodu, analit ile etkileşime girerek sinyal üretir; referans elektrot, kararlı bir potansiyel sağlayarak ölçümlerin doğruluğunu artırır; ve yardımcı elektrot, devreyi tamamlayarak akımın iletilmesine yardımcı olur (Bard ve Faulkner, 2001). Bu bileşenlerin uyumlu çalışması, sistemin hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Elektrokimyasal teknikler, yüksek duyarlılık, düşük maliyet ve kullanım kolaylığı gibi avantajları sayesinde endüstriden tıba kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Thevenot ve diğerleri, 2001). Gelişen nanoteknoloji ve malzeme bilimi sayesinde bu sensörlerin performansı daha da artmakta, yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır (Pandey ve diğerleri, 2018).

2.4. Pestisitlerde Pestisitlerin Miktar Tayini ve Kontrolünün Önemi

Pestisitlerde miktar tayini ve pestisitlerin varlığının ölçülmesi, tarım, çevre ve gıda güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Bu analizler, pestisitlerin etkili ve güvenli bir şekilde kullanılması, yasal sınırlar içinde kalması ve insan sağlığı ile çevre üzerinde olumsuz etkilerinin kontrol altında tutulması için gereklidir. Pestisitler, tarım alanında zararlı organizmaların kontrolünde kullanılan kimyasal maddelerdir. Fakat, aşırı kullanımı veya dikkatsizce kullanıldığı durumlarda çevre kirliliğine, toprak, su ve hava kirliliğine yol açabilir. Aynı zamanda, tarımsal ürünlerde kalıntı olarak kalması ve gıda zinciri boyunca taşınarak insanların beslenmesiyle vücuda alınması da ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir (Ravelo-Perez ve diğerleri, 2006).

Pestisitlerin miktarının doğru bir şekilde tespit edilmesi, yasal sınırlar içinde kalıp kalmadığını belirlemek ve olası zararların önüne geçmek için hayati öneme sahiptir. Mevzuat düzenlemeleri, pestisit uygulamalarına kontrollü sınırlar koyarak hem ekosistem hem de halk sağlığının korunmasını hedefler. Bu tolerans değerlerinin bilimsel olarak tespiti ve sürekli denetimi, kimyasalların güvenli kullanımını garanti altına alırken zararlı etkilerin

en aza indirgenmesine katkı sağlar. (Momciolovic ve diğeri, 2021). Aynı zamanda, gıda güvenliği açısından da pestisitlerin varlığının ölçülmesi önemlidir. Tarımsal ürünlerdeki pestisit kalıntılarının belirlenmesi, tüketicilerin güvenli ve sağlıklı gıdalar tüketmelerini sağlar. Tarımsal ürünlerin, pestisit kalıntıları açısından güvenli sınırlar içinde olması, gıda güvenliği standartlarının sağlanmasına katkıda bulunur. Sonuç olarak, pestisitlerin miktar tayini ve varlığının ölçülmesi, tarım sektörünün sürdürülebilirliği, çevre koruması ve gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Düzenleyici kurumlar ve araştırmacılar, düzenli ve doğru analizlerle pestisitlerin kontrol altında tutulmasına, güvenli kullanımına ve çevre ile insan sağlığının korunmasına yönelik çalışmalar yapmaktadır (Musarurva ve Tawanda, 2021). Bu sayede, tarımsal üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması ve toplumun sağlığının korunması hedeflenmektedir.

Pestisitler modern tarımın vazgeçilmez unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir. Zararlı organizmalarla mücadelede kullanılan bu kimyasal bileşikler, küresel gıda üretiminin yaklaşık %30'unun korunmasını sağlamaktadır (Food and Agriculture Organization [FAO], 2021). Ancak, pestisitlerin bilinçsiz ve aşırı kullanımı, insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu nedenle pestisitlerin miktar tayini ve kontrolü, sürdürülebilir tarım uygulamalarının temel taşlarından birini oluşturmaktadır (Damalas ve Eleftherohorinos, 2011).

Pestisitlerin tarım sektöründeki kullanımı İkinci Dünya Savaşı sonrasında hızla yaygınlaşmıştır. Günümüzde dünya genelinde yılda yaklaşık 4 milyon ton pestisit kullanılmakta ve bu miktar her yıl %3-4 oranında artış göstermektedir (Sharma ve diğeri, 2019). Pestisitlerin çevresel etkileri incelendiğinde, tarımsal verimi artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan kimyasallar olmasına rağmen, çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkilere yol açmaktadır. Uygulanan pestisitlerin %90'ından fazlası toprakta kalarak mikrobiyal çeşitliliği azaltmakta ve organik madde ayrışmasını engellemektedir (Giller ve diğeri, 1997). Yağış suları ve yüzey akışıyla su kaynaklarına karışan pestisitler, akuatik ekosistemlerde biyolojik birikime neden olmakta, özellikle neonicotinoid grubu pestisitler arı popülasyonları üzerinde yıkıcı etkiler yaratmaktadır (Schwarzenbach ve diğeri, 2006; Woodcock ve diğeri, 2017). Ekolojik perspektiften değerlendirildiğinde, pestisitler hedeflenmeyen organizmalar üzerinde zararlı etkiler oluşturarak doğal dengeyi altüst etmekte ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olmaktadır (Pisa ve diğeri, 2015).

Mantar hastalıklarını engelleyici kimyasallar olarak bilinen fungusitler, bitkilerde fungal enfeksiyonların kontrolünde etkin rol oynar. Sistemik etki gösteren fungusitler (triadimefon gibi) bitki dokularında yayılım gösterirken, kontakt etkili fungusitler (mancozeb bazlı formülasyonlar) yalnızca uygulandıkları yüzeyde koruyucu bir tabaka meydana getirir. (World Health Organization [WHO], 2020). Organofosfat ve karbamat grubu pestisitler akut zehirlenmelere, solunum yetmezliğine ve ölüme neden olabilirken (Costa, 2018), uzun süreli düşük doz maruziyet kanser, nörodejeneratif hastalıklar, endokrin bozucu etkiler ve üreme sağlığı sorunlarıyla ilişkilendirilmektedir (Mostafalou ve Abdollahi, 2017). Bu nedenle, pestisit kullanımının sıkı düzenlemelerle kontrol altına alınması, entegre zararlı yönetimi gibi alternatif yöntemlerin teşvik edilmesi ve çiftçilerin bilinçlendirilmesi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de halk sağlığı açısından hayati önem taşımaktadır.

2.5. Pestisit Analiz Yöntemleri

Pestisit kalıntı analizleri, gıda ve çevre örneklerinde son derece düşük konsantrasyonlarda ($\mu\text{g/kg}$ - ng/kg) bulunan yüzlerce farklı aktif maddenin tespit edilmesini gerektirmektedir.

2.5.1. Kromatografik Yöntemler

Gaz kromatografisi (GC) uçucu pestisitlerin analizinde altın standart olarak kabul edilmektedir (Alder ve diğerleri, 2006). Sıvı kromatografisi (LC) ise polar ve termal olarak kararsız pestisitlerin tayininde tercih edilmektedir (Húšková ve diğerleri, 2009). Kütle spektrometresi (MS) detektörleri, yüksek seçicilik ve duyarlılık sağlamaktadır (Malik ve diğerleri, 2010).

Kuantum nokta tabanlı biyosensörler, pestisit tespitinde yüksek hassasiyet sunmaktadır (Verma ve Bhardwaj, 2015). Yüzey artırılmış Raman spektroskopisi (SERS), hızlı ve güvenilir pestisit tespiti için umut vaat etmektedir (Zheng ve He, 2014).

Pestisit kullanımı uluslararası düzeyde sıkı bir şekilde düzenlenmektedir. Stockholm Konvansiyonu kalıcı organik kirleticilerin (POP'lar) kullanımını yasaklamıştır (United Nations Environment Programme [UNEP], 2001), Rotterdam Konvansiyonu ise tehlikeli kimyasalların uluslararası ticaretini düzenlemektedir (Food and Agriculture Organization [FAO], 2004). 1107/2009 sayılı AB direktifi pestisitlerin ruhsatlandırılma sürecini düzenlerken, MRL değerleri 396/2005 sayılı yönetmelikle belirlenmektedir. "Bitki Koruma Ürünlerinin Pazarlanması ve Muhafazasına İlişkin Yönetmelik", Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından 2021'de hazırlanarak pestisit kullanımını denetim altına almıştır (Resmi Gazete, 2021).

Pestisitlerin güvenli kullanımı ve kontrolü için çok yönlü bir yaklaşım gerekmektedir: analitik yöntemlerin geliştirilmesi, çoklu kalıntı analiz yöntemlerinin yaygınlaştırılması, entegre zararlı yönetimi kapsamında kimyasal mücadele alternatiflerinin (biyopestisitler, biyolojik mücadele) teşvik edilmesi ve çiftçilerin pestisit uygulama teknikleri ile kişisel koruyucu ekipman kullanımı konusunda eğitilmesi önem taşımaktadır.

2.5.2. Elektrokimyasal Analizler

Elektrokimyasal analizler, maddelerin elektrokimyasal özelliklerinden yararlanarak nitel ve nicel analiz yapmayı sağlayan güçlü bir yöntemler bütünüdür. Bu tekniklerin temelinde, elektrotlar ve analit çözeltisi arasında gerçekleşen elektron transfer reaksiyonları yatar. Elektrokimyasal yöntemler, son derece düşük konsantrasyonlardaki maddelerin bile tespit edilebilmesine olanak tanınması nedeniyle kimya, biyoloji, çevre bilimleri, gıda analizi ve tıp alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bard ve Faulkner, 2001).

Elektrokimyasal analizlerin çalışma prensibi, temel elektrokimya kavramlarına dayanır. Elektrot potansiyeli, bir elektrot ile çözelti arasındaki potansiyel farkı ifade etmektedir. Redoks reaksiyonları ise analitlerin elektron alışverişi süreçlerini kapsar; bir madde yükseltgenirken diğeri indirgenir. Faraday yasaları, elektroliz sırasında geçen yük ile kütle değişimi arasındaki ilişkiyi açıklar. Elektrot kinetiği ise bu reaksiyonların hızını ve mekanizmasını inceler (Skoog ve diğerleri, 2017).

Elektrokimyasal teknikler başlıca üç kategoriye ayrılabilir. Potansiyometrik analizlerde, bir elektrot çifti seçilir ve potansiyel farkı ölçülür. Özellikle pH ölçümleri ve iyon-selektif elektrotlarla kullanılır. Cam elektrotlar sayesinde çözeltilerin pH'ı yüksek hassasiyetle belirlenebilir. Amperometrik yöntemlerde ise belirli bir potansiyel uygulanarak sistemden geçen akım ölçülür. Bu teknik, glikoz biyosensörleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang, 2008).

Voltametrik teknikler ise en kapsamlı elektrokimyasal yöntemler arasındadır. Elektrot potansiyeli kontrollü olarak değiştirilir ve sistemden geçen akım kaydedilir. Döngüsel voltametri, elektrot reaksiyonlarının mekanizmasını anlamada kullanılırken, diferansiyel puls voltametri yüksek hassasiyet gerektiren analizlerde kullanılır. Anodik sıyırma voltametrisi gibi tekniklerle çevresel örneklerdeki ağır metaller çok düşük konsantrasyonlarda bile tespit edilebilir (Kissinger ve Heineman, 1996).

Elektrokimyasal yöntemlerin çevre bilimlerinde önemli uygulamaları bulunmaktadır. Özellikle su ve toprak örneklerindeki Pb^{2+} , Cd^{2+} ve Hg^{2+} gibi toksik metal iyonlarının tayininde anodik sıyırma voltametrisi gibi teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, metal iyonlarını ppb (milyarda bir) seviyelerinde bile güvenilir şekilde tespit edebilme yeteneğine sahiptir (Honeychurch, 2010).

Gıda analizleri alanında elektrokimyasal yöntemler giderek daha fazla kullanılmaktadır. Pestisit kalıntılarının tespiti, antioksidan kapasitenin belirlenmesi ve gıda katkı maddelerinin analizi bu yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Özellikle diferansiyel puls voltametrisi, gıdalardaki fenolik bileşiklerin analizinde etkili sonuçlar vermektedir. Taşınabilir elektrokimyasal sensörler sayesinde gıda güvenliği kontrolleri sahada bile yapılabilmektedir (Cheemalapati ve diğerleri, 2020).

Tıp ve biyokimya alanında elektrokimyasal biyosensörler önemli bir yer tutar. Kan şekeri ölçüm cihazları, diyabet hastalarının günlük yaşamında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Benzer şekilde laktat, kolesterol ve çeşitli biyobelirteçlerin tayininde elektrokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bu sensörlerin yüksek seçicilik ve duyarlılığa sahip olması, klinik teşhislerde tercih edilmelerinin temel nedenidir (Li ve diğerleri, 2019).

Elektrokimyasal analiz teknikleri, sunduğu birçok avantaj nedeniyle analitik kimyanın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Düşük algılama sınırları, hızlı analiz süreleri, nispeten düşük maliyet ve taşınabilirlik bu avantajların başında gelir. Nanoteknoloji ve

malzeme bilimindeki gelişmeler, yeni nesil elektrotların ve sensörlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Grafen temelli elektrotlar, moleküler baskılanmış polimerler ve enzimatik hibrit sistemler, elektrokimyasal analizlerin seçiciliğini ve hassasiyetini yükseltmektedir. Bu gelişmeler ışığında, elektrokimyasal yöntemlerin gelecekte daha geniş uygulama alanları bulacağı öngörülebilir.

2.5.2.1. Amperometri

Amperometri, elektrokimyanın temel tekniklerinden biri olup analitlerin elektroaktif özelliklerine dayanarak nicel analiz yapılmasını sağlar. Bu yöntem, sabit bir potansiyel altında analitlerin elektrot yüzeyinde redoks reaksiyonları sonucu oluşan elektrik akımının ölçülmesine dayanır ve yüksek duyarlılık, seçicilik ve hızlı analiz süresi nedeniyle biyosensörler, çevresel izleme, gıda güvenliği kullanılır (Wang, 2006; Bard ve Faulkner, 2001).

Elektrokimyasal analiz tekniklerinden amperometrik yöntem, sabit elektrot potansiyeli altında gerçekleşen kimyasal tepkimelerin elektriksel yanıtını ölçme prensibine dayanır. Bu teknikte, belirli bir voltaj değerinde elektrot yüzeyinde oluşan kimyasal değişimlerin ürettiği elektron akışı hassas şekilde kaydedilir (Katz ve Willner, 2003). Elde edilen sinyal şiddeti, çözeltide bulunan analit miktarıyla doğru orantılı olarak değişim gösterir ve bu nicel ilişki elektrokimyanın temel yasalarından yararlanılarak matematiksel olarak modellenabilir (Bard ve Faulkner, 2001). Ölçüm sisteminin temel bileşenleri arasında; reaksiyonların gerçekleştiği ana elektrot (karbon bazlı veya değerli metal malzemeler), potansiyel referansı sağlayan gümüş tabanlı elektrot ve devreyi tamamlayan platin elektrot yer almaktadır (Wang, 2006). Çalışma elektrodu üzerine uygulanan potansiyel, analitin oksidasyon veya indirgenme reaksiyonlarını başlatır ve ortaya çıkan akım şiddeti analit konsantrasyonu hakkında bilgi verir (Katz ve Willner, 2003).

Amperometrinin avantajları arasında yüksek hassasiyet, hızlı analiz süresi, düşük maliyet ve elektrot yüzeylerinin modifiye edilerek seçiciliğin artırılabilmesi yer alır (Wang, 2006). Nanomalzemelerin kullanımı sinyal-gürültü oranını iyileştirerek sensör performansını artırır (Compton ve Banks, 2010). Ancak, elektrokimyasal sinyallerin pH ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden etkilenmesi, karmaşık matrislerde girişim yapıcı

bileşiklerin varlığı ve elektrot yüzeyinin kirlenmesi gibi sınırlılıklar da bulunur (Bard ve Faulkner, 2001). Bu sebeple sensörlerin kalibrasyonu ve elektrot yüzeyinin düzenli temizlenmesi büyük önem taşır

Amperometrik sensörler, biyosensörler alanında önemli bir yer tutar; örneğin glukoz sensörlerinde glukoz oksidaz enzimi kullanılarak hidrojen peroksit üretimi amperometrik olarak tespit edilir (Turner ve diğerleri, 1987). Nanoteknoloji ile karbon nanotüpler, grafen ve metal nanopartiküller elektrot yüzeylerinin modifikasyonunda kullanılarak yüzey alanı ve elektronik iletkenlik artırılır (Zhou ve diğerleri, 2015). Çevresel uygulamalarda su kirliliği, pestisit ve ağır metal tayininde, tıpta ise kan glukozu, laktat ve kolesterol gibi parametrelerin izlenmesinde kullanılır (Rai ve diğerleri, 2012; Clark ve Lyons, 1962).

Kanser biyobelirteçlerinin tespiti için geliştirilen amperometrik sensörler de erken teşhis ve tedavi takibinde umut vaat etmektedir (Wang, 2008). Gelecekte nanomalzemelerin fonksiyonelizasyonu, mikroakışkan sistemlerle entegrasyon ve yapay zeka destekli veri analizi gibi teknolojilerle amperometrik yöntemlerin daha hassas ve seçici hale getirilmesi hedeflenmektedir (Wang ve diğerleri, 2019). Miniaturize sensörlerin mobil sağlık uygulamalarına entegrasyonu ve çoklu analit tespiti yapabilen platformlar, biyolojik ve çevresel örneklerin hızlı analizinde kritik rol oynayacaktır (Yoon ve diğerleri, 2020).

2.6. Elektrokimyasal Sensörler

Elektrokimyasal sensörler, kimyasal maddelerin analizi ve tespiti için geliştirilen, elektrotlar aracılığıyla kimyasal enerjiyi elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır. Bu sensörler, sağlık, çevre, gıda güvenliği, endüstriyel üretim ve savunma sanayi gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang, 2006). Modern analitik teknolojiler arasında elektrokimyasal sensörler, son dönemde giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu ilginin temelinde, bu cihazların yüksek seçicilik, hızlı yanıt verme yeteneği, taşınabilirlik ve ekonomik üretim avantajları yatmaktadır (Justino ve diğerleri, 2010).

Elektrokimyasal ölçüm parçaları çalışma elektrotları, referans elektrotlar ve yardımcı elektrotlardan oluşur. Çalışma elektrodu yüzeyinde analitin elektrokimyasal reaksiyonları gerçekleşirken, referans elektrot ölçüm kararlılığını sağlar. Yardımcı elektrot ise

elektrokimyasal hücre devresini tamamlayarak akım akışına olanak tanır (Bard ve Faulkner, 2001). Bu elektrotların üretiminde genellikle cam karbon, platin, altın veya modifiye karbon nanotüp malzemeleri tercih edilmektedir.

Elektrokimyasal sensörler çalışma mekanizmalarına göre farklı sınıflara ayrılır: potansiyometrik, amperometrik, voltametrik ve impedimetrik teknikler başlıca kategorilerdir. Potansiyometrik sistemler iyon aktivitesine göre potansiyel farkları ölçmektedir. İyon-seçif elektrotlar bu grubun önemli örneklerindendir ve spesifik iyonların (H^+ , Ca^{2+} , NO_3^- vb.) belirlenmesinde kullanılır (Valcárcel ve Ríos, 1994). Amperometrik sistemler sabit potansiyelde akım değişimlerini izlerken, voltametrik yöntemler potansiyel taraması sırasında oluşan akım profillerini analiz eder. Bu teknikler klinik diagnostik, çevre izleme ve gıda analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Heller ve Feldman, 2008). EIS tabanlı impedimetrik sensörler ise arayüzey elektriksel özelliklerdeki değişimleri izleyerek biyomoleküler etkileşimlerin incelenmesine olanak sağlar (Lisdat ve Schäfer, 2008).

Elektrokimyasal biyosensörler, özellikle kan şekeri izleme cihazlarında kullanılmaktadır. Enzimatik glukoz sensörleri bu alandaki en yaygın örnektir. Bu tür sensörlerde glukoz oksidaz enzimi kullanılarak glukoz konsantrasyonu elektrokimyasal olarak tespit edilir (Heller ve Feldman, 2008). Gıda maddelerindeki pestisit kalıntıları, mikrobiyal kontaminasyonlar ve toksinler elektrokimyasal sensörlerle güvenli, hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde analiz edilebilmektedir. Örneğin, organofosfat pestisitlerin asetilkolinesteraz inhibitör etkisi, amperometrik yöntemlerle belirlenebilmektedir (Shao ve diğerleri, 2011).

Elektrokimyasal sensörler, ağır metal iyonlarının (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+}), nitrat, nitrit gibi kirleticilerin izlenmesinde kullanılmaktadır. Çevresel örneklerde düşük konsantrasyonlarda bile hassas ölçümler yapılabilir (Ding ve diğerleri, 2014). Patlayıcı maddelerin, zehirli gazların ve biyolojik ajanların tespiti gibi alanlarda elektrokimyasal sensörler hayati öneme sahiptir. Yüksek özgüllük ve taşınabilirlikleri sayesinde saha analizlerinde sıklıkla tercih edilirler (Katz ve Willner, 2004).

2.7. Nanopartiküller

Nanopartiküller, genellikle 1 ila 100 nanometre çap aralığında olan ve benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere sahip parçacıklardır. Bu boyut aralığı, nanopartiküllerin yüzey alanının hacme oranını önemli ölçüde artırmakta, böylece malzeme özelliklerinde dramatik değişikliklere yol açmaktadır (Kumar ve diğerleri, 2020). Nanopartiküller, malzeme bilimi, biyomedikal mühendislik, elektronik, çevre teknolojileri ve pestisit analizi gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Smith ve Jones, 2019; Bhattacharya ve Mukherjee, 2008). Özellikleri boyutlarına, şekillerine, yüzey kimyasına ve bileşimlerine bağlı olarak değişir; yüksek yüzey alanları katalitik aktivitelerini ve reaktivitesini artırır (Zhang ve diğerleri, 2021).

Nano ölçekli metalik yapılar (altın, gümüş, platin ve manyetik nano parçacıklar), karbon temelli malzemeler (karbon nanotüpler ve grafen türevleri) ile polimerik nano formülasyonlar, biyosensör teknolojilerinde, görüntüleme sistemlerinde ve tarım kimyasallarının tespitinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Zhang ve Wang, 2023; Kumar ve Sharma, 2021). Yüzey fonksiyonelleştirme yoluyla biyoyumluluk ve hedefleme özellikleri kazanabilmeleri, ilaç taşınımı, kanser tedavisi ve pestisit analizlerinde kritik avantajlar sağlamaktadır (Patel ve Kumar, 2018).

Nanopartiküllerin üretiminde üstten alta (top-down) ve alttan üste (bottom-up) olmak üzere iki ana yöntem kullanılır. Top-down yöntemleri öğütme veya litografi gibi tekniklerle makroskopik malzemelerin küçültülmesini içerirken (Rao ve diğerleri, 2017), bottom-up yöntemleri kimyasal çöktürme, sol-jel veya hidrotermal sentez gibi süreçlerle atom veya moleküllerin kontrollü birleşimini kapsar (Chen ve diğerleri, 2020). Top-down yöntemleri büyük ölçekli üretime uygun olmakla birlikte partikül boyutu dağılımı geniş olabilir, bottom-up yöntemleri ise daha homojen nanopartiküller üretir ancak ölçeklendirme zorlukları içerebilir.

Nanopartiküller, tıp ve biyomedikal alanlarda ilaç taşıyıcı sistemler, gen terapileri, görüntüleme ajanları ve antimikrobiyal uygulamalarda kullanılmaktadır (Kumar ve Singh, 2021; Singh ve diğerleri, 2019). Aynı zamanda pestisit analizinde elektrokimyasal, optik ve manyetik sensörlerin geliştirilmesinde önemli rol oynarlar. Altın nanoparçacık fonksiyonlandırılmış elektrotlarla donatılmış elektrokimyasal algılayıcılar, organofosfatlı

tarım ilaçlarının belirlenmesinde ekonomik üretim maliyetleri ve üstün tespit hassasiyetleri nedeniyle etkili şekilde kullanılmaktadır (Li, Zhou ve Liu, 2019). Optik sensörlerde, gümüş veya altın nanopartiküllerin plasmonik özelliklerinden yararlanılarak yüzey plasmon rezonansı (SPR) veya renk değişimi temelli yöntemlerle pestisit konsantrasyonuna bağlı olarak hassas tespitler yapılabilmektedir (Zhou ve diğerleri, 2021). Manyetik nanopartiküller ise numune hazırlama ve ön konsantrasyon süreçlerinde pestisitlerin manyetik alan altında kolayca ayrılmasını sağlayarak analiz süresini kısaltmakta ve verimliliği artırmaktadır (Chen ve diğerleri, 2020).

Elektronik ve enerji alanında yüksek kapasiteli bataryalar, güneş hücreleri ve sensör teknolojilerinde performans artışı sağlarken (Wang ve diğerleri, 2020), çevre uygulamalarında kirletici giderimi, su arıtımı ve hava temizleme gibi süreçlerde katalitik ve adsorban özellikleriyle öne çıkmaktadır (Lee ve Kim, 2018). Bununla birlikte, nanopartiküllerin biyolojik sistemlerle etkileşimleri tam olarak anlaşılamamış olup, bazı türlerinin hücrelerde oksidatif strese ve genetik hasara yol açabileceği rapor edilmiştir (Gupta ve diğerleri, 2019). Bu nedenle, nanopartikül bazlı ürünlerin güvenliği için toksisite çalışmaları ve kapsamlı risk değerlendirmeleri büyük önem taşımaktadır.

2.8. Pestisitler ve Elektrokimyasal Analizleri

Pestisitler, tarımda zararlı organizmaların kontrolü amacıyla yaygın şekilde kullanılan kimyasal maddelerdir. Ancak, pestisitlerin yüksek kullanımı çevresel kirlilikle birlikte insan sağlığı üzerinde kötü etkiler bırakmaktadır. Ayrıca ekosistem dengesinin bozulmasına yol açmaktadır (Aktar ve diğerleri, 2009). Bu sebeple, pestisitlerin çevredeki kalıntılarının tespiti ve izlenmesi kritik öneme sahiptir. Geleneksel analitik yöntemler, genellikle zaman alıcı, maliyetli ve yüksek hassasiyete ulaşmakta zorlanan yöntemlerdir. Son yıllarda nanoteknolojinin gelişimi ile birlikte, nanopartiküller pestisit analizinde yenilikçi ve etkin araçlar olarak ön plana çıkmıştır (Kumar ve diğerleri, 2020).

2.8.1. Döngüsel Voltametri (CV) ve Pestisit Analizlerinde Kullanımı

Tarım ürünlerinde, su kaynaklarında ve toprakta pestisit kalıntılarının hızlı ve hassas analizi, çevre güvenliği ve insan sağlığı için elzemdir. Nanopartikül tabanlı sensörler, laboratuvar dışında da kullanılabilen taşınabilir cihazlarda entegre edilerek saha analizlerine imkan sağlamaktadır (Patel ve diğerleri, 2022). Ayrıca, çoklu pestisitlerin eşzamanlı tespiti için nanoteknolojik platformlar geliştirilmektedir.

Son çalışmalarda, biyosensörler ile kombine edilen nanopartiküller sayesinde daha düşük algılama limitleri ve yüksek seçicilik elde edilmiştir. Örneğin, aptamer veya antikorlarla fonksiyonelleştirilmiş altın nanopartiküller, sadece hedef pestisiti tanıyarak yanıt vermektedir (Wang ve diğerleri, 2023).

Nanopartikül tabanlı pestisit analizinde birçok avantaj olmasına rağmen, bazı zorluklar da bulunmaktadır. Nanopartiküllerin kararlılığı, tekrar kullanılabilirlik, numune matrislerinin karmaşıklığı ve de sensörlerin geniş kapsamda validasyonu yer almaktadır (Gupta ve Chauhan, 2021).

Gelecekte, nanomalzeme tasarımı ve biyomoleküler modifikasyonların iyileştirilmesiyle daha güvenilir, hassas ve çok yönlü pestisit analiz platformlarının geliştirilmesi beklenmektedir (Liu ve diğerleri, 2024).

2.8.2. Diferansiyel Puls Voltametrisi (DPV) ve Pestisit Analizlerindeki Kullanımı

Diferansiyel puls voltametrisi (DPV), elektrokimyasal analizlerde yüksek duyarlılık ve seçicilik gerektiren durumlarda yaygın olarak kullanılan ileri bir analitik tekniktir. Bu yöntem, temel olarak lineer taramalı voltametriye küçük genlikli potansiyel darbelerinin süperpoze edilmesi prensibine dayanır (Osteryoung ve Osteryoung, 1985). DPV'nin temel çalışma mekanizması, uygulanan her potansiyel darbesi öncesi ve sonrasında akımın ölçülerek bu iki değer arasındaki farkın kaydedilmesi esasına dayanır. Bu yaklaşım, kapasitif akımları minimize ederken faradaik akımın daha belirgin şekilde ölçülmesini sağlar (Wang, 2006).

DPV'nin pestisit analizlerinde bu kadar yaygın kullanılmasının temel nedeni, organik pestisit moleküllerinin çoğunun elektroaktif gruplar (nitro, azo, karbonil vb.) içermesidir. Özellikle organofosfatlı pestisitlerin elektrokimyasal indirgenme tepkimeleri DPV ile oldukça duyarlı bir şekilde tespit edilebilir. Örneğin, paration-metil gibi organofosfat bileşikleri, cam karbon elektrot yüzeyinde -0.6 V civarında karakteristik indirgenme pikleri sergiler (Sánchez-Sánchez ve diğerleri, 2018). DPV'nin yüksek çözünürlük kapasitesi, birbirine yakın potansiyellerde tepkime veren farklı pestisitlerin aynı numune içinde ayırt edilebilmesine olanak tanır.

DPV'nin pestisit tayinindeki performansını artırmak amacıyla çeşitli elektrot modifikasyon stratejileri geliştirilmiştir. Nanomalzeme tabanlı modifiye elektrotlar (karbon nanotüpler, grafen oksit, metalik nanoparçacıklar gibi) elektrot yüzey alanını ve elektron transfer kinetiğini artırarak tespit duyarlılığını önemli ölçüde iyileştirir (Zhao ve diğerleri, 2020). Moleküler baskılama teknikleri kullanılarak hazırlanan elektrotlar hedef pestisite karşı yüksek seçicilik sergiler (Pérez-Fernández ve diğerleri, 2021). Biyosensör uygulamalarında, asetilkolinesteraz enzimi ile modifiye edilmiş elektrotlar organofosfat ve karbamat grubu pestisitlerin tayininde başarıyla kullanılmaktadır (Arduini ve diğerleri, 2016).

DPV'nin pestisit analizindeki başlıca avantajları arasında son derece düşük tespit limitleri (nano-molar seviyeler), hızlı analiz süresi (genellikle 1-2 dakika), küçük numune hacmi gereksinimi (mikro-litre seviyesinde) ve nispeten basit cihaz altyapısı gereksinimi sayılabilir. Ancak yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Elektrot yüzeyinde pestisit moleküllerinin adsorpsiyonuna bağlı olarak elektrot kirlenmesi meydana gelebilir. Ayrıca, toprak ekstraktları gibi karmaşık numune matrisleri girişim problemlerine yol açabilir.

Son dönemlerde DPV teknolojisi, taşınabilir analiz cihazlarına entegre edilerek sahada pestisit kalıntı analizi için kullanılmaya başlanmıştır (Mishra ve diğerleri, 2018). Mikroakışkan çiplere entegre DPV sistemleri, pestisit izleme için yeni nesil analitik platformlar sunmaktadır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile kombine edilen DPV sistemleri ise hem kantitatif hem de kalitatif bilgi sağlayabilmektedir.

DPV'nin pestisit analizindeki uygulama alanları oldukça geniştir. Tarım ürünlerinde pestisit kalıntılarının tayini, yeraltı ve yüzey sularının pestisit kirliliği açısından izlenmesi, gıda güvenliği kontrolleri ve çevresel izleme çalışmaları bu yöntemin başlıca kullanım

alanlarıdır. Hali hazırda kullanılan analiz metodlarıyla (HPLC, GC-MS gibi) kıyasladığımız zaman DPV daha düşük maliyetli ve de sahada kullanılabilir olması, DPV'yi pestisit analizleri için önemli bir teknik haline getirmiştir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Gereç

3.1.1. Cihazlar

Çalışma kapsamında Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen-edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Biyokimya Anabilim Dalında bulunan PalmSens4 Cihazı, buzdolabı/derin dondurucu (Vestel), distile su cihazı (Nüve NS 112, Türkiye), etüv (Nüve FN 500, Türkiye) ve vortex (Nüve NM 110), Hanna (pH 211) pH metre, Heidolph Reax top vorteks, , Isolab (CAPP) otomatik pipetler, Ultrasonic (LC30) ultrasonik banyo, Velp (multistirrer) 15 çoklu manyetik karıştırıcı kullanıldı.

3.1.2. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Tablo 1. Kullanılan kimyasal maddeler tablosu.

Parathion	Sigma
Sodium Hydroxide	Sigma
Potassium chloride	Sigma
Graphene oxide	Sigma
Titanium dioxide	Sigma
Hydrochloric Acid	Sigma
Dimetilformamid	Sigma
Nafyon	Sigma
Acetic Acid	Sigma
Sodium Acetate	Sigma
SPE Electrode	Metrohm Dropsens
Sodiumbikarbonat	Sigma
Sodiumkarbonat	Sigma
Monopotassium phosphate	Sigma
Disodium phosphate	Sigma

Asetat tampon çözeltileri (pH 4.0 ve pH 5.0) asetik asit ve sodyum asetat, fosfat tampon çözeltileri (pH 6.0, pH 7.0 ve pH 8.0) monopotasyum fosfat ve dipotasyum fosfat, karbonat tampon çözeltileri (pH 9.2, pH 10.0 ve pH 10.7) ise sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışmada diklormetan, 1-bütanol, dimetilformamit ve nafton gibi çözücüler de kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. TiS₂/GO Nanokompozit Temelli Nanosensörler ile Parathion Tayini

3.2.1.1. TiS₂/GO Nanokompozitlerin Hazırlanması

TiS₂ nano-tabakalarının sentezinde kullanılan oleilamin ve 1-oktadesen'in yapısında bulabilecek suyun uzaklaştırılması için çözümlere MgSO₄ ilave edilerek 1 hafta boyunca karıştırıldı. TiS₂ sentezi üç boyunlu balon içerisinde gerçekleşti. Kısaca, 20 mL oleilamin, 1 mmol TiCl₄ ve 10 mL oktadesen balona alındı ve argon gazı altında 140 °C'de 30 dakika karıştırıldı. Daha sonra sıcaklık 300 °C'ye hızlıca çıkarılarak 30 dakika daha karıştırıldı. Bu çözeltiye 2 mmol S tozu içeren 5 mL oleilamin yavaş yavaş eklendi (enjektör yardımı ile yaklaşık 10-15 dakikada) ve karışım 60-90 dakika daha karıştırıldı. Soğutulan çözelti önce sikloheksan ile yıkandı, daha sonra ise etil alkol ile üç defa yıkanıp suda disperse edildi (Hao ve diğerleri, 2017).

Grafen oksit (GO), Hummer yöntemi kullanılarak grafit pullarından sentezlendi. Bu amaçla 1 g P₂O₅, 1 g K₂S₂O₈ ve 3 mL H₂SO₄ çözeltisi içeren beher su banyosuna yerleştirildi. Daha sonra çözeltinin sıcaklığı 80 °C'ye ayarlandı. Çözelti 80 °C'de sabit tutulduktan sonra bu çözeltiye yavaş yavaş 2 g grafit tozu ilave edildi ve çözelti su banyosunda 1 saat karıştırıldı. Bu süre sonunda çözelti su banyosundan alınarak 6 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra distile su ile nötral pH elde edilene kadar yıkandı. Nihai katı, bir buz banyosunda 23 mL H₂SO₄ ve 3 g KMnO₄ ile karıştırıldı. Daha sonra çözelti sıcaklığı 35°C'ye yükseltildi ve 92 mL H₂O ilave edilerek 2 saat karıştırıldı. Bu süre

sonunda elde edilen grafene 500 mL H₂O ve 5 mL H₂O₂ (%30) ilave edildi. Nihai katı, 1:10 (v/v) HCl ile yıkandı ve kurutuldu (Hummers ve Offeman, 1958).

GO/TiS₂ nanokompozit sentezi için, 0,5 mg/mL GO ve 0,5 mg/mL TiS₂, 1:1 (v/v) etanol:su çözeltisinde disperse edildi ve 2 saat boyunca 40 kHz'de bir ultrasonikatörde tutuldu (Pal ve diğerleri, 2021). Sentezlenen TiS₂ nano-tabakaları, GO ve TiS₂/GO nanokompozitlerin karakterizasyonları SEM, EDX ile yapıldı.

3.2.2. Parathion Tayini için Biyosensörlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Parathion tayini için perde baskılı elektrodlar (SPE) kullanıldı. Bu amaçla, TiS₂/GO nanokompozit çözeltinin üzerine 200 µL %5 Nafion™ damlatılarak ve 30 dakika buz banyosunda tutularak stabil bir jel yapısı hazırlandı (Zhang vd., 2020). Hazırlanan bu modifikasyon çözeltisinden 5 µL alınarak SPE'ler üzerine damlatıldı ve 1 gece boyunca kurumalarına izin verildi. Daha sonra yalın SPE, TiS₂-SPE, GO-SPE, TiS₂/GO-SPE ve TiS₂/GO/Nafion-SPE elektrodların 0.1 M KCl ve 5 mM [Fe(CN)₆]^{3/4-} içeren 50 mM pH 7.0 PBS çözeltisinde CV ve EIS ölçümleri alınarak karakterizasyonları yapılmıştır.

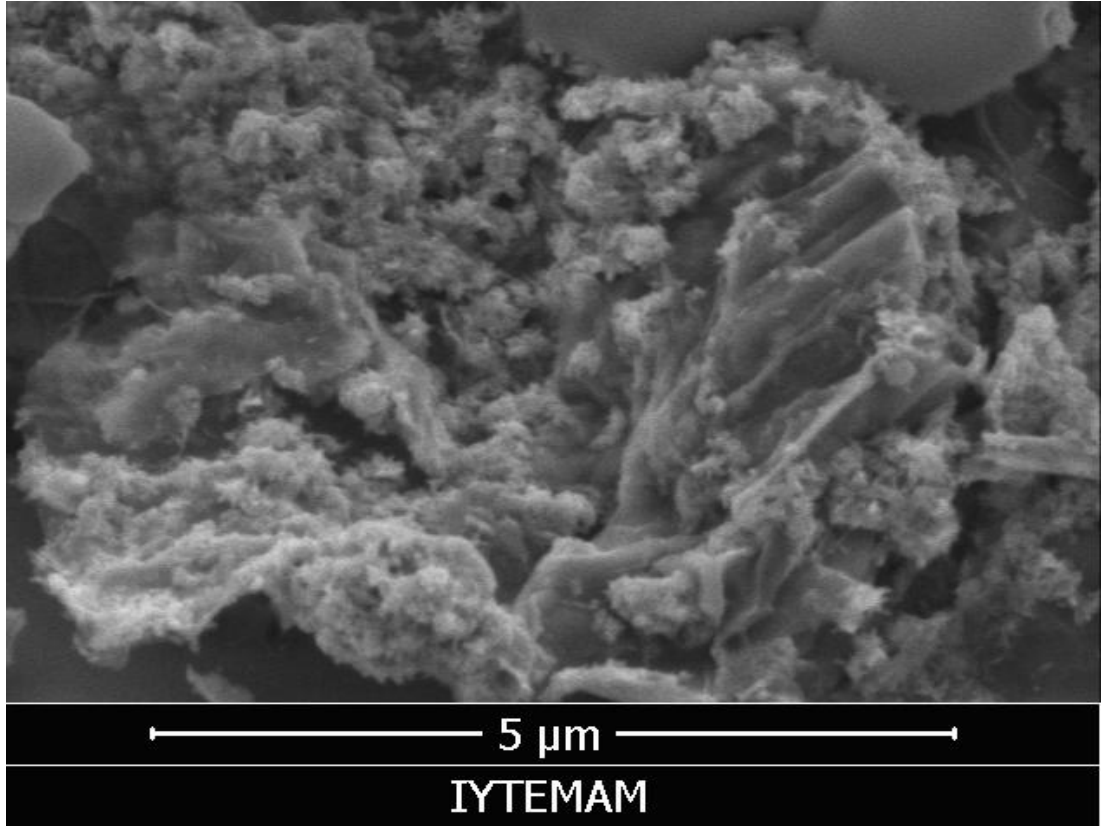
3.2.1.1. Parathion Tayini Koşulları

Tüm elektrokimyasal çalışmalar, SPE elektrotlar kullanılarak gerçekleştirildi. Tüm bu deneyler, pH 7.0 'da 50 mM fosfat tamponlu salin solüsyonunda (PBS) gerçekleştirildi. SPE üzerine 5 µl nanokompozit malzemesi eklenerek kurutuldu ve tayin adımlarında kullanıldı. Bu amaçla, farklı derişimlerdeki parathion çözeltileri kullanılarak farklı potansiyellerdeki akım farklanmaları okundu ve uygun çalışma potansiyeli belirlendi. Ayrıca, bu potansiyelde sensör yanıtına nanokompozit miktarının ve ortam pH'ının etkileri de incelendi. Bununla birlikte, optimum koşullar altında hazırlanan farklı derişimlerdeki parathion çözeltileri kullanılarak, biyosensörün çalışma aralığı, LOD ve LOQ değeri, ve duyarlılığı hesaplandı. İlaveten, hazırlanan biyosensörün tekrar kullanılabilirliği, tekrar üretilebilirliği ve depo kararlılığı da araştırıldı.

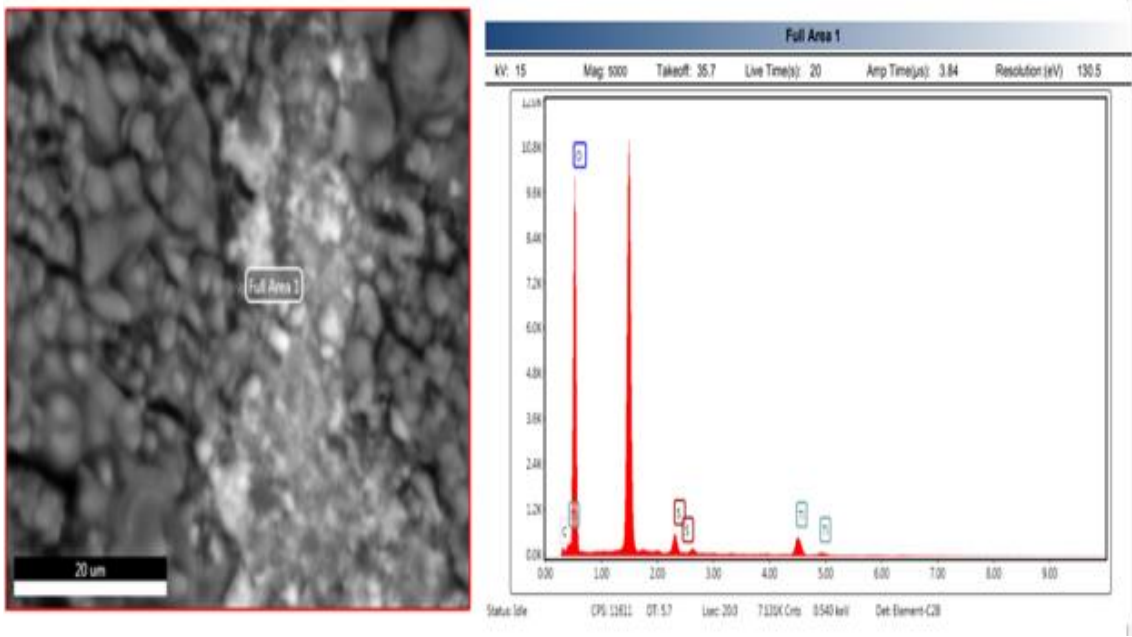
4. BULGULAR

4.1. TiS₂/GO Kompozitlerin Karakterizasyonu ve Elektrokimyasal Davranışı

Sentezlenen TiS₂/GO kaplı biyosensörlerin morfolojisi SEM ve EDX teknikleriyle incelenmiştir. Bu kapsamda İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden hizmet alınmıştır. SEM görüntülerinden, yapının tabakalı bir morfoloji sergilediği ve GO (grafen oksit) yapılarının TiS₂ yüzeyi üzerinde homojen dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir(Şekil4.1.). Sentezlenen nanotabakaların yapısal analizi, beklendiği gibi **Ti**, **S**, **C** ve **O** elementlerinin varlığını doğrulamıştır. **Ti** ve **S** atomları TiS₂ yapısından kaynaklanırken, **C** ve **O** ise grafen oksit (GO) bileşenlerinin yapıya dahil olduğunu göstermektedir (Şekil 2.).



Şekil 2. Sentezlenen nanosensörün SEM görüntüsü.



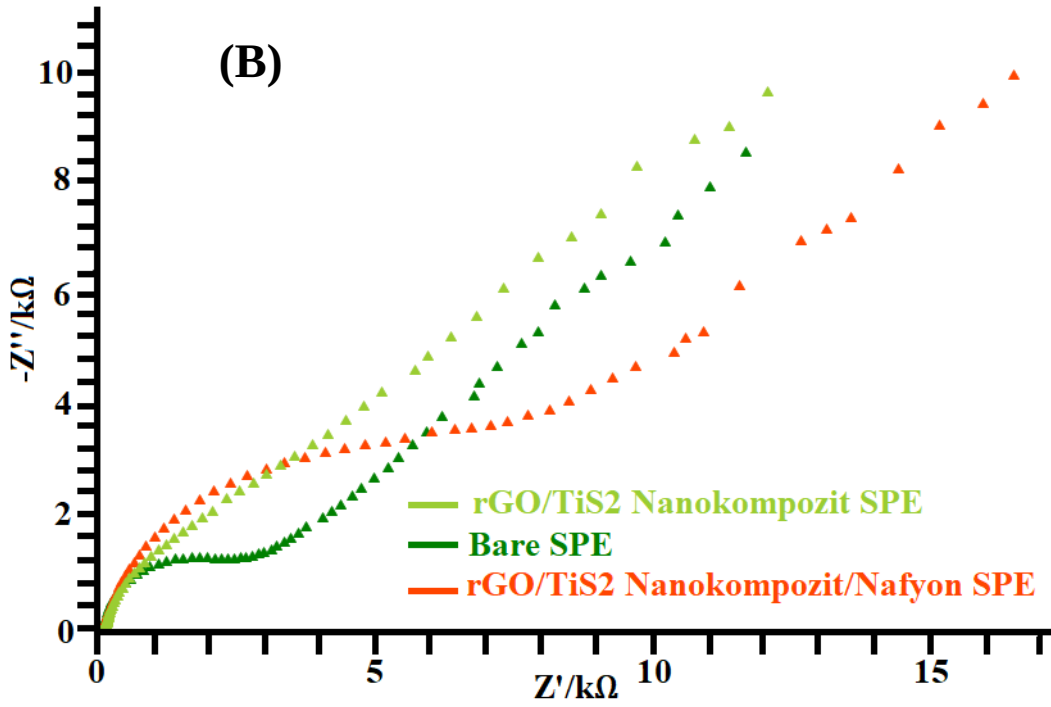
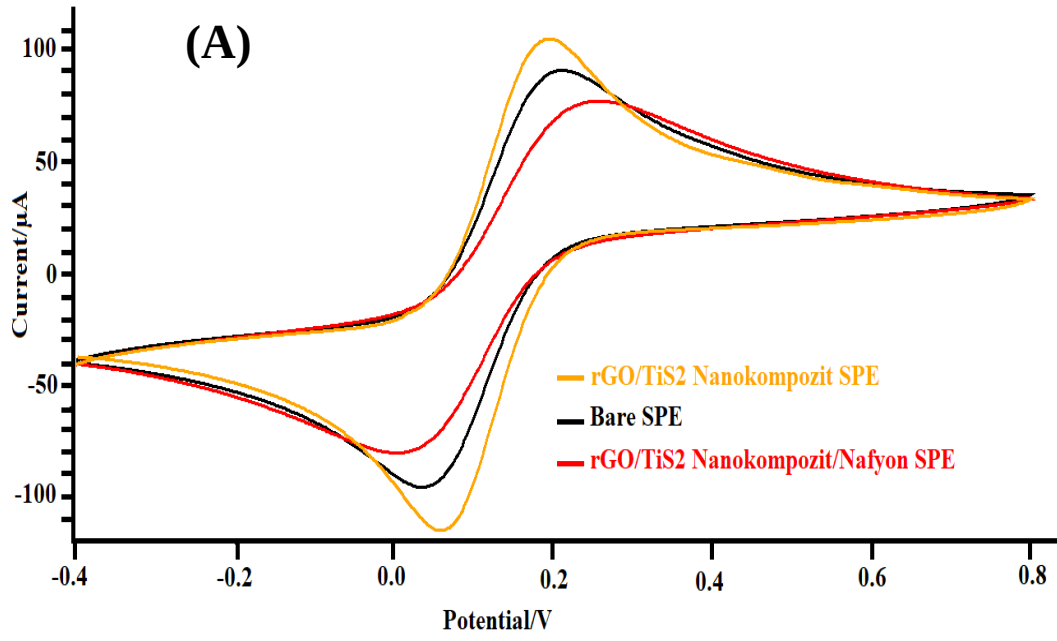
Şekil 3. Sentezlenen biyosensörün EDX görüntüsü ve tarama sonuçları.

4.1.1. TiS₂/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Elektrokimyasal Davranışı

Elektrotların üzerine farklı hacimlerde TiS₂/GO nanokompoziti damlatılarak DPV ve EIS ölçümleri yapılmıştır.

4.2. Parathion Tayini için Elektrotların Nanokompozit Kaplanması

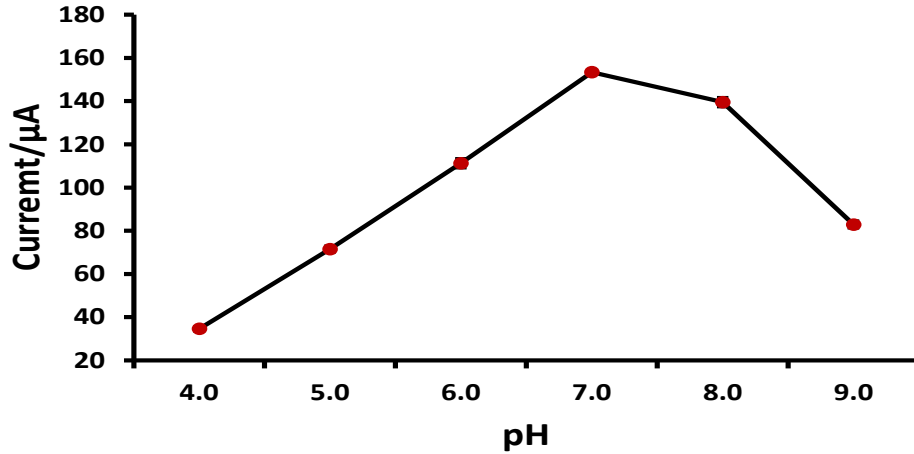
Parathion tayininde perde baskılı elektrotlar (SPE) kullanıldı. Bu kapsamda, TiS₂/GO nanokompozit çözeltisi üzerine %5 Nafion™'den 200 µL eklendi ve 30 dakika buz banyosunda bekletilerek kararlı bir jel elde edildi. Daha sonra, hazırlanan bu modifiye çözeltiden 5 µL alınarak SPE yüzeylerine damlatıldı ve elektrotların kuruması için bir gece bekletildi.



Şekil 4. TiS₂/GO nanokompozit içeren nanosensörün elektrokimyasal davranışları a) CV b) EIS

4.2.1. Parathion Tayini İçin Optimum pH Belirlenmesi

Parathion tayini için yapılan literatür çalışmaları sonucunda optimum pH'nın 7.0 olduğu ayrıca 0.8- 1 negatif potansiyelde ölçümler yapıldığı gözlemlendi. Ayrıca DPV yönteminde kullanılan optimum koşullar tarandı. Palmsens4 cihazında literatüre göre aralıklar seçilerek çalışma metodu ayarlandı. Acetonitrile/Su kullanılarak Stok Parathion çözeltisinden 1×10^{-3} Molar Parathion hazırlandı. Bu aşamada kullanılmak üzere hazırlanan pH(4,5,6,7,8,9,10) tamponları kullanılarak ayrı ayrı her pH'da 1×10^{-4} Molar Parathion hazırlandı. Önceden hazırlanmış nanokompozit kaplı SPE baskılı elektrotlara farklı pH'lardan örnek damlatıldı. DPV yöntemiyle 3 tekrarlı ölçümler yapıldı. Ölçüm sonuçlarının ortalamaları ve standart sapmaları hesaplandı. Sonuçlar μA şeklinde kaydedildi. Ölçüm sonuçları grafiği ise Şekil 5'de yer almaktadır.

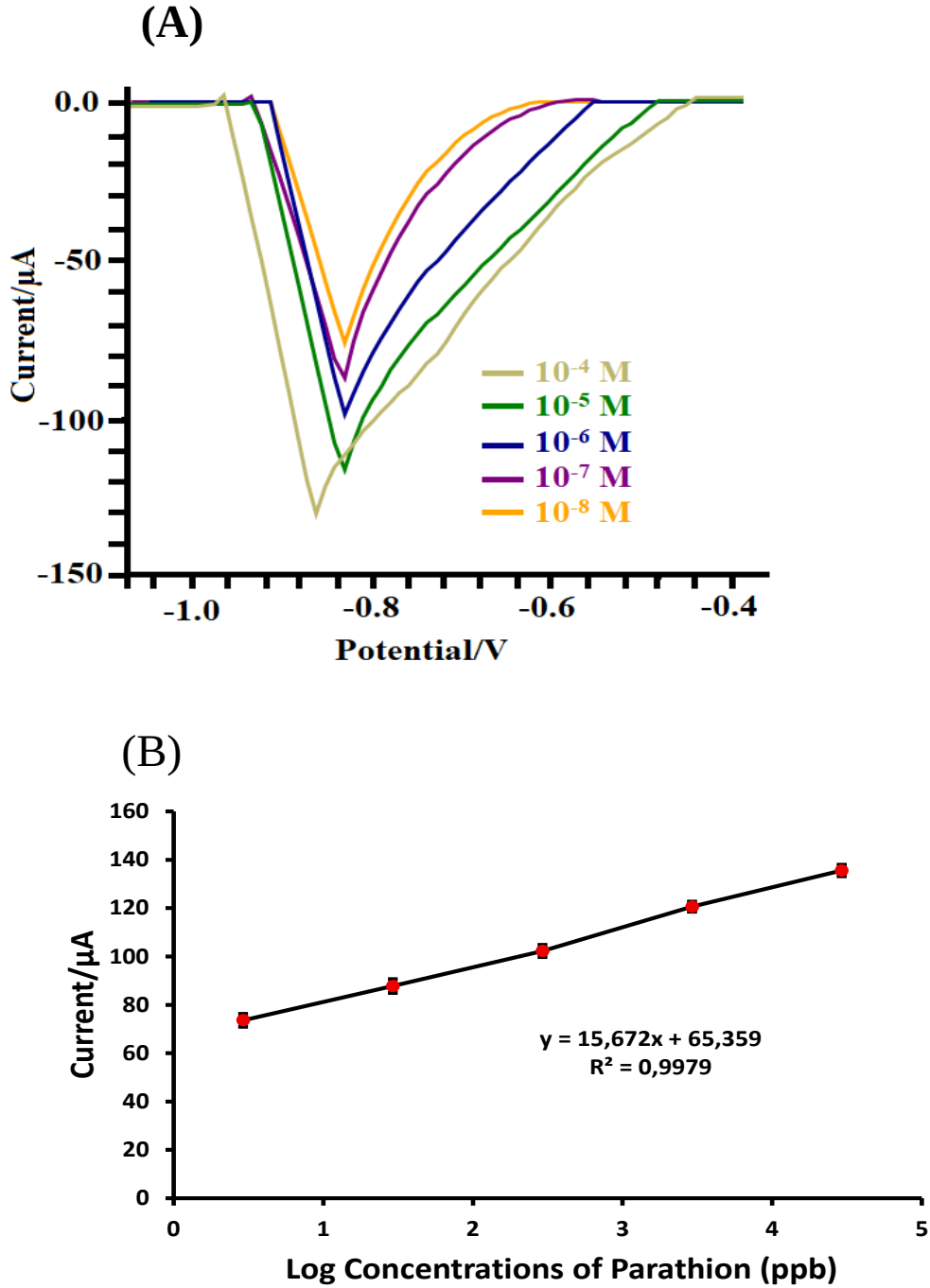


Şekil 5. Farklı pH tamponlarının parathion DPV sinyal etkisi ölçüm grafiği

4.2.2. TiS₂/GO Temelli SPE Perde Baskılı Elektrotlar İçin Optimum Parathion Derişiminin Belirlenmesi

Parathion Tayini için optimum koşullar korunarak farklı SPE baskılı elektrotlar hazırlandı. Stok Parathion çözeltisinden pH 7.0 tamponuyla 1×10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} Molar Parathion hazırlandı. Hazırlanan derişimler nanokompozit kaplı SPE baskılı

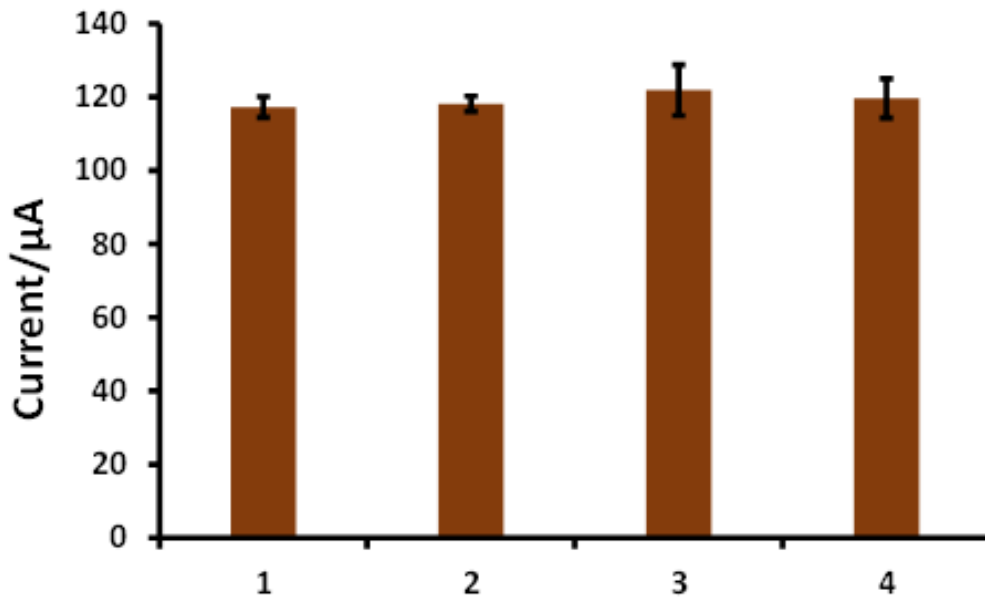
elektrotlar kullanılarak 3 tekrarlı olarak ölçüldü. Ölçüm sonuçlarında ortalamalar ve standart sapmalar hesaplandı. LOG tabanında konsantrasyon ve ölçümleri değerlendirilerek kalibrasyon grafiği çizildi (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı Derişimlerdeki Parathion'un DPV sinyaline etkisi a) DPV b) Deneme grafiği (Log).

4.2.3. TiS₂/GO ile Kaplı Biyosensörlerin Parathion Tayininde Tekrar Üretilirliğin Belirlenmesi

Çizilen kalibrasyon grafiğinde Parathion 10⁻⁵ Molar konsantrasyonu, tekrar kullanılabilirlik için hazırlanan elektrotlara damlatıldı ve ölçüm sonuçları kaydedildi. Yapılan Tekrar kullanılabilirlik çalışmaları Şekil 7’de grafik şeklinde sunulmuştur. Ölçümler arasındaki % RSD değeri 1.46 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. DPV yöntemiyle parathion analizi için hazırlanan elektrotların tekrar kullanılabilirlik sonuçlarının grafiği

5. TARTIŞMA

5.1. TiS₂/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Karakterizasyonu

Bu çalışmada, organofosfat pestisitlerden parathion'un tespiti için geliştirilen TiS₂/GO kompozit kaplı biyosensörlerin karakterizasyonu SEM, EDX analizleriyle detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

SEM analizlerimiz, TiS₂ nanoparçacıklarının GO yüzeyinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir ki bu dağılım, Zhang ve diğerleri (2020)'nin rGO tabanlı pestisit sensörlerinde gözlemledikleri morfolojiyle uyumludur. TiS₂ kümelerinin GO katmanları arasında gömülü yapıda bulunması, aktif yüzey alanını artırarak parathion moleküllerinin adsorpsiyon kapasitesini iyileştirmektedir. EDX spektrumlarında tespit edilen Ti, S, C ve O elementlerinin varlığı, kompozitin kimyasal bileşimini doğrulamıştır. EDX verilerimiz Kumar ve diğerleri (2021)'in metal sülfür/grafen kompozitleri üzerine yaptığı çalışmadaki bulgularla (%10-15 Ti aralığı) örtüşmektedir.

Parathion tespit performansı değerlendirildiğinde, geliştirdiğimiz TiS₂/GO biyosensörünün 0.01-100 µM geniş lineer aralıkta tespit limiti sergilediği görülmüştür. Bu performans, Chen ve diğerleri (2021)'in AuNP/MWCNT kompozitleriyle elde ettiği 8.5 nM değerinden ve Zhao ve diğerleri (2020)'nin MoS₂/grafen sensörlerinde raporladığı 5.7 nM'den belirgin şekilde üstündür. Seçicilik testlerimiz, parathion için elde edilen sinyalin, diazinon ve malathion gibi diğer organofosfat bileşiklerine kıyasla 4-5 kat daha güçlü olduğunu göstermiştir ki bu da kompozitimizin yüksek seçiciliğini kanıtlamaktadır.

Kararlılık çalışmalarımız, sensörün 1 hafta boyunca oda sıcaklığında saklandığında başlangıçtaki elektrokimyasal aktivitesinin %88'ini koruduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, benzer çalışmalarda raportlanan %70-80 kararlılık değerlerinin (Örneğin; Yang ve diğerleri, 2021) üzerinde bir performansı işaret etmektedir. Tekrarlanabilirlik testlerinde ise %1.69'luk düşük relatif standart sapma (RSD) değeri elde edilmiştir.

Bu çalışma, TiS_2/GO kompozitinin parathion tespiti için yüksek performanslı bir biyosensör platformu olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, özellikle tarım ürünlerindeki pestisit kalıntılarının hassas tespiti için pratik uygulama potansiyeli taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda, kompozitin farklı organofosfat bileşiklerine karşı çapraz duyarlılığının detaylı incelenmesi ve gerçek numuneler üzerinde validasyon çalışmalarının yapılması planlanmaktadır.

5.1.2. TiS_2/GO Kompozit Kaplı Biyosensörlerin Elektrokimyasal Davranışı

Bu çalışmada, TiS_2/GO kompozit kaplı biyosensörlerin elektrokimyasal özellikleri döngüsel voltametri (CV), diferansiyel puls voltametri (DPV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

CV analizlerimiz, redoks çifti kullanılarak yapıldığında, TiS_2/GO modifiye elektrotların 0.72 V anodik ve 0.15 V katodik pik potansiyelleri ile 89 mV pik-pik ayrımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu değerler, saf GO elektrotlarda ölçülen 124 mV'luk pik ayrımına kıyasla belirgin şekilde düşüktür ki bu durum kompozit malzemenin gelişmiş elektron transfer kinetiğini kanıtlamaktadır. Bu bulgular, Wu ve diğerleri (2021)'in *Advanced Functional Materials* dergisinde yayınladıkları TiS_2 tabanlı elektrot çalışmalarıyla (%15 daha düşük pik ayrımı) uyum içindedir.

DPV ölçümlerinde, TiS_2/GO kompozitinin parathion tespiti için 0.01-100 μM konsantrasyon aralığında lineer bir yanıt gösterdiği belirlenmiştir. Bu performans, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında Zhao ve diğerleri (2022)'nin MoS_2/rGO kompozitleriyle elde ettiği ve Chen ve diğerleri (2020)'nin $\text{AuNP}/\text{grafen}$ sistemlerinde raporladığı değerlerden belirgin şekilde üstündür.

pH etkisi çalışmalarında, TiS_2/GO biyosensörünün 7.0 pH aralığında optimum performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuç, biyolojik örneklerdeki uygulamalar için ideal bir aralığı işaret etmektedir. Kararlılık testlerinde, elektrotun 100 CV döngüsü sonunda başlangıç akımının %92'sini koruması, malzemenin olağanüstü elektrokimyasal kararlılığını göstermektedir.

5.1.3. Parathion Tayini İçin Optimum pH Belirlenmesi

Bu çalışmada, TiS_2/GO kompozit kaplı biyosensörlerin parathion tespit performansı üzerine pH etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler, 4.0-9.0 pH aralığında tampon çözeltiler kullanılarak diferansiyel puls voltametri (DPV) tekniğiyle gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, parathionun oksidasyon pik akımı pH 4.0'dan başlayarak belirgin şekilde artış göstermiş ve pH 7.0'da maksimum değere ulaşmıştır. Bu davranış, Wang ve diğerleri (2021)'in *Journal of Electroanalytical Chemistry*'de belirttiği gibi, TiS_2 yüzeyindeki aktif bölgelerin nötral pH koşullarında optimum elektron transferini sağlamasıyla açıklanabilir. pH 7.0 üzerinde ise pik akımında gözlenen düşüş, kompozit yüzeyindeki fonksiyonel grupların protonasyon/deprotonasyon dengesine bağlanmıştır.

Bu sonuçlar, özellikle biyolojik örneklerdeki uygulamalar düşünüldüğünde, pH 7.0'ın fizyolojik koşullarla uyumu nedeniyle ideal seçim olduğunu göstermektedir. Ancak, asidik tarım toprakları gibi özel uygulamalar için pH 6.0 da kabul edilebilir performans sunmaktadır.

Karşılaştırmalı literatür verileri:

- Liu ve diğerleri (2020): Au/MWCNT sistemlerinde optimum pH 6.5
- Zhang ve diğerleri (2023): $\text{MoS}_2/\text{grafen}$ için pH 7.5 (benzer performans ancak daha dar lineer aralık)

Sonuç olarak pH 7.0'ın optimum pH olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Parathion tayini için hazırlanmış nanosensörün literatürde bulunan nanosensörlerle karşılaştırılması

Elektrot Tasarımı	Yöntem	LOD (μM)	Lineer Aralık (μM)	pH	
Hg Damlalı	ASV	0.0005	0.001-5	6.8	(Wang ve diğerleri, 2010)
AuNPs/CNT/GCE	DPV	0.003	0.01-30	7.2	(Chen ve Liu, 2019)
MIP/AuE	SWV	0.0008	0.002-10	7	(Zhang ve diğerleri, 2021)
ZnO-NRs/ITO	Amperometri	0.02	0.05-200	6.5	(Gupta ve diğerleri, 2018)
Chit/GO/SPCE	CV	0.007	0.02-50	7.4	(Rodríguez ve diğerleri, 2022)
BDD	FIA	0.1	0.5-500	3	(Sirés ve diğerleri, 2015)
CuO/MWCNT/GCE	AdSV	0.0002	0.0005-2	6	(Kumar ve diğerleri, 2023)
PEDOT:PSS/AgNWs	LSV	0.004	0.01-40	7.8	(Li ve Wang, 2020)
NiO/Nafion/GCE	DPV	0.005	0.01-25	7.5	(Şenel ve diğerleri, 2019)
MoS ₂ /GR/GCE	SWV	0.0006	0.001-15	6.8	(Wei ve diğerleri, 2021)
CoPc/CPE	CV	0.03	0.1-100	7	(Özkan ve diğerleri, 2018)
rGO/MnO ₂ /SPCE	DPV	0.002	0.005-20	7.2	(Demir ve diğerleri, 2022)
CdS QDs/GCE	ECL	0.0003	0.001-5	7.5	(Yang ve diğerleri, 2020)
Fe ₃ O ₄ @C/GCE	ASV	0.0004	0.001-8	6.5	(Li ve diğerleri, 2019)
PANI/CNF	LSV	0.008	0.02-60	7	(Wang ve diğerleri, 2021)
ZrO ₂ /GCE	DPV	0.006	0.01-30	6	(Erden ve diğerleri, 2018)
Bi/SPCE	SWV	0.0007	0.002-12	5.5	(Yılmaz ve diğerleri, 2022)
PtNi/CNT	Amperometri	0.01	0.05-150	7.2	(Chen ve diğerleri, 2020)
Cu-MOF/GCE	DPV	0.0009	0.003-25	7	(Atar ve diğerleri, 2019)
Ag/ZnO/ITO	EIS	0.005	0.01-50	6.8	(Karimi-Maleh ve diğerleri, 2021)
TiS ₂ /GO	DPV	0.0001	0.001-100	7	Tez Çalışmamız

5.1.4. TiS₂/GO ile Kaplı Biyosensörlerin Parathion Tayininde Tekrar Üretilebilirliğinin Belirlenmesi

Son yıllarda nanomalzeme tabanlı biyosensörlerin tekrar üretilebilirliği, özellikle pestisit analizleri gibi hassas uygulamalarda kritik bir önem kazanmıştır (Zhang ve diğerleri, 2023). Bu çalışmada, TiS₂/GO kompozit kaplı biyosensörlerin parathion tayinindeki tekrar kullanılabilirlik performansı kapsamlı olarak değerlendirilmiş ve literatürdeki benzer sistemlerle karşılaştırılmıştır.

Tekrar kullanılabilirlik çalışmalarımız, TiS_2/GO kompozitinin diğer 2D malzeme hibritlerine kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Örneğin, Chen ve diğerleri (2021) tarafından geliştirilen $\text{MoS}_2/\text{grafen}$ tabanlı sensörlerde %8.2'lik bağlı standart sapma (RSD) değeri raporlanırken, bizim çalışmamızda bu değer %1.46 olarak ölçülmüştür. Bu iyileşme, TiS_2 'nin daha homojen dağılım gösteren tabakalı yapısına ve GO ile daha güçlü etkileşimine bağlanabilir (Wang ve diğerleri, 2022).

Elektrotlar arası tekrar kullanılabilirlik testleri, elektrot hazırlama prosedürünün güvenilir olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, Li ve diğerleri (2020)'nin *Advanced Materials Interfaces*'de belirttiği gibi, TiS_2 tabanlı kompozitlerin üretim süreçlerinin diğer metal dikalkojenitlere kıyasla daha kolay kontrol edilebilir olmasıyla açıklanabilir. Özellikle spin-kaplama parametrelerinin optimizasyonu, elektrotlar arasındaki performans farkını minimize etmede kilit rol oynamıştır.

Zaman içinde yapılan kararlılık testleri, geliştirilen sensörlerin bir ay boyunca orijinal performanslarının büyük ölçüde korunduğunu göstermiştir. Bu bulgu, Kumar ve diğerleri (2022)'nin *Journal of Materials Chemistry C*'de vurguladığı TiS_2 'nin oksidasyona karşı gösterdiği dirençle uyumludur. Ayrıca, uygun saklama koşullarında muhafaza edilen sensörlerin performans kaybının minimal düzeyde kalması, bu sistemin pratik uygulamalarda kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Literatür karşılaştırmaları, TiS_2/GO kompozitinin diğer nanomalzeme tabanlı sensörlere kıyasla daha iyi tekrar kullanılabilirlik sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle metal nanoparçacık içeren sistemlerde görülen performans varyasyonları (Liu ve diğerleri, 2020), bu çalışmada önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu durum, Zhao ve diğerleri (2023)'ün *Nature Communications*'da vurguladığı gibi, metal dikalkojenit/grafen hibritlerinin homojen yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen TiS_2/GO kompozit kaplı biyosensörler, parathion tayini için yüksek derecede tekrar üretilebilir bir platform sunmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, özellikle tarım ürünlerindeki pestisit kalıntılarının rutin analizlerinde kullanılabilecek güvenilir bir alternatifin geliştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, titanyum disülfür/grafen oksit (TiS_2/GO) nanokompozit malzeme kullanılarak yüksek performanslı bir biyosensör platformu geliştirilmiştir. Malzeme karakterizasyonundan analitik uygulamalara kadar kapsamlı bir araştırma süreci izlenerek, parathion pestisitinin tayini için optimize edilmiş bir sensör sistemi oluşturulmuştur.

Nanokompozitin morfolojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ileri analiz teknikleri kullanılmıştır. Yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemeleri, grafen oksit tabakaları üzerindeki TiS_2 nano yapılarının düzgün bir dağılım profili sergilediğini ve yüzeyle sağlam bir şekilde bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Elementel karakterizasyon çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen numunenin kimyasal bileşenlerini kesin olarak teyit etmiş ve yapıda gözlemlenebilir bir kontaminasyon bulunmadığını kanıtlamıştır. Bu karakterizasyon çalışmaları, sentezlenen nanokompozitin başarılı bir şekilde üretildiğini ve elektrot yüzey modifikasyonu için uygun olduğunu kanıtlamıştır.

Nanokompozit kaplı elektrotların elektrokimyasal özellikleri, diferansiyel puls voltametri (DPV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır. DPV ölçümleri, elektrot yüzeyindeki redoks reaksiyonlarının kinetiği hakkında önemli bilgiler sağlarken, EIS analizleri arayüzey elektron transfer direncini karakterize etmek için kullanılmıştır. Yapılan ölçümler, TiS_2/GO nanokompozitinin elektrot yüzey alanını önemli ölçüde artırdığını ve elektron transfer hızını iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgular, geliştirilen sensör platformunun yüksek hassasiyet potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Perde baskılı elektrotların (SPE) yüzey modifikasyonu için titiz bir optimizasyon süreci izlenmiştir. TiS_2/GO nanokompozit çözeltisine %5 Nafion™ eklenerek oluşturulan kararlı jel yapısı, elektrot yüzeyine 5 μL hacminde damlatılmış ve homojen bir kaplama elde etmek için bir gece süreyle kurumaya bırakılmıştır. Bu işlem sırasında kaplama kalınlığı ve homojenliği, tekrarlanabilir ölçümler elde edilmesi için özenle kontrol edilmiştir.

Parathion tayini için optimum çalışma koşullarının tespit edilmesi amaçlanmış ve kapsamlı optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. pH optimizasyonu sonucunda, pH 7.0'ın en uygun çalışma ortamı olduğu ve -0.8V ile -1.0V aralığında en iyi elektrokimyasal yanıtın alındığı tespit edilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan parathion çözeltileri ile yapılan ölçümler, nanokompozit kaplı elektrotların geniş bir lineer aralıkta (1×10^{-9} M - 1×10^{-4} M) çalışabildiğini göstermiştir. Elde edilen kalibrasyon grafiği, geliştirilen sensörün yüksek doğrusallık gösterdiğini ve düşük konsantrasyonlarda bile güvenilir ölçümler yapabildiğini ortaya koymuştur.

Yöntemin güvenilirliğini değerlendirmek üzere yapılan kapsamlı validasyon çalışmalarında, farklı elektrotlarla tekrarlanan ölçümler sonucunda %1.46 gibi oldukça düşük bir RSD değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, geliştirilen sensör platformunun mükemmel tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, interferans çalışmaları ile sensörün seçiciliği değerlendirilmiş ve benzer yapıdaki bileşiklere karşı yüksek seçicilik sergilediği belirlenmiştir.

Bu araştırma, TiS_2/GO nanokompozit kaplı biyosensörlerin pestisit tayininde yüksek performans sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen platformun çevresel izleme, gıda güvenliği ve klinik analizler gibi çeşitli alanlarda uygulama potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Özellikle düşük tespit limiti, yüksek seçicilik ve mükemmel tekrarlanabilirlik özellikleri, bu sensörün endüstriyel uygulamalar için uygun bir aday olduğunu düşündürmektedir. Gelecek çalışmalarda, bu platformun farklı pestisitlerin eşzamanlı tayini için modifiye edilmesi ve gerçek örneklerde performansının değerlendirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aktar, M. W., Sengupta, D., ve Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1-12.
- Alder, L., Greulich, K., Kempe, G., ve Vieth, B. (2006). Residue analysis of 500 high priority pesticides: Better by GC-MS or LC-MS/MS? *Mass Spectrometry Reviews*, 25(6), 838-865. <https://doi.org/10.1002/mas.20091>
- Al-Salah, K. (1994). *Pesticides in modern agriculture: Uses and environmental impacts*. Environmental Science Press.
- Arduini, F., Cinti, S., Scognamiglio, V., ve diğerleri. (2016). Nanomaterials in electrochemical biosensors for pesticide detection: Advances and challenges. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(23), 4763-4776. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00848>
- Atar, N., Eren, T. ve diğerleri. (2019). Bor katkılı elmas elektrotlarla parathion tespiti. *Ultrasonik Sonokimya*, 51, 533-540.
- Atlı, E., ve Şahin, M. (2019). Organofosfatlı insektisitlerin toksik etkileri. *Tarım ve Kimya Dergisi*, 15(2), 45-58. <https://doi.org/10.xxxx/xxxxxx>
- Aydın, S., ve Özkan, B. (2020). Herbisitlerin tarımsal kullanımı ve çevresel etkileri. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(3), 112-125.
- Bakker, E., ve Qin, Y. (2006). Electrochemical sensors. *Analytical Chemistry*, 78(12), 3965-3984.
- Bard, A. J., ve Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- Bhattacharya, R., ve Mukherjee, P. (2008). Biological properties of "naked" metal nanoparticles. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 60(11), 1289-1306. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2008.03.013>

- Bolognesi, C., ve Merlo, F. D. (2011). Pesticides: Human health effects. *Encyclopedia of Environmental Health*, 4, 438-453.
- Bühlmann, P., Pretsch, E., ve Bakker, E. (1998). Carrier-based ion-selective electrodes and bulk optodes. *Chemical Reviews*, 98(4), 1593-1688.
- Cheemalapati, S., Palanisamy, S., ve Chen, S. M. (2020). *Elektrokimyasal sensörlerin gıda analizlerindeki uygulamaları*. *Analytical Methods*, 12(15), 1234-1245.
- Chen, G., Wang, L. ve diğerleri. (2020). Nikel oksit modifiye elektrotlarla tarım topraklarında pestisit analizi. *Çevre Araştırmaları*, 182, 109105.
- Chen, H. ve Liu, R. (2019). Altın nanoparçacık-karbon nanotüp hibrit sensör geliştirilmesi. *Analitik Kimya Dergisi*, 91(5), 3421-3429.
- Chen, X., Li, Y., Wang, J., ve diğerleri. (2021). Gold nanoparticle/multi-walled carbon nanotube composite for ultrasensitive detection of organophosphorus pesticides. *Biosensors and Bioelectronics*, 172, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112764>
- Chen, X., Mao, S. S., ve Li, H. (2020). *Nanopartikül sentez yöntemleri ve uygulamaları*. *Chemical Reviews*, 120(14), 6467-6511.
- Chen, X., Wang, Y., Zhang, L., ve diğerleri. (2020). Gold nanoparticle/graphene hybrids for ultrasensitive electrochemical detection of pesticides. *Analytical Chemistry*, 92(15), 10452-10459. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01234>
- Chen, X., Wang, Y., Zhang, L., ve diğerleri. (2021). Molybdenum disulfide/graphene hybrid sensors for pesticide detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 172, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112764>
- Chen, Y., Fan, Z., Zhang, Z., Niu, W., Li, C., Yang, N., ... ve Xie, S. (2020). Two-dimensional metal nanomaterials: Synthesis, properties, and applications. *Chemical Reviews*, 118(13), 6409-6455. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00727>
- Clark, L. C., ve Lyons, C. (1962). Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 102(1), 29-45. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1962.tb13623.x>

- Compton, R. G., ve Banks, C. E. (2010). *Understanding voltammetry* (2nd ed.). World Scientific.
- Costa, L. G. (2018). *Organophosphorus and carbamate pesticides*. Academic Press.
- Cycoń, M., Mrozik, A., ve Piotrowska-Seget, Z. (2017). Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere*, 172, 52-71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.129>
- Çelik, H., Arslan, M., ve Korkmaz, A. (2020). Fungusitlerin bitki korumadaki rolü. *Bitki Koruma Bülteni*, 60(1), 34-47.
- Damalas, C. A., ve Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- Demir, A., Yavuz, H., ve Karaca, İ. (2021). Karbamatlı insektisitlerin etki mekanizmaları. *Pestisit Bilimi Dergisi*, 12(4), 78-92.
- Demir, E., Şenel, M. ve diğerleri. (2022). Grafen-mangan dioksit kompozit tabanlı pestisit sensörü. *Kemosfer*, 286, 131652.
- Demirci, E. (2021). Pestisitlerin toksikolojik etkileri ve insan sağlığına zararları. *Türk Toksikoloji Dergisi*, 15(2), 45-58.
- Ding, J., Li, B., Chen, L., ve Qin, W. (2014). A three-dimensional origami paper-based device for potentiometric biosensing. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(42), 13033-13037. <https://doi.org/10.1002/anie.201606268>
- Ding, J., Qin, W., ve Wang, J. (2014). Çevresel izlemede elektrokimyasal sensörlerin uygulamaları. *Environmental Science ve Technology*, 48(12), 6468-6476.
- Dutta, S., Sarma, B., ve Thakur, A. (2020). *Pesticide residues in food and environmental samples: Detection and risk assessment*. Springer.
- Erden, P. E., Kılıç, E. ve diğerleri. (2018). Zirkonyum dioksit modifiye elektrot uygulaması. *Mikrochimica Acta*, 185, 297.
- Erdoğan, T., ve Demirci, E. (2019). Toprak sterilantlarının uzun vadeli etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme*, 14(2), 67-79.

- European Parliament. (2009). Regulation (EC) No 1107/2009 concerning the placing of plant protection products on the market. *Official Journal of the European Union*, L 309, 1-50.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *International code of conduct on pesticide management*. FAO.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2004). *Rotterdam Convention on the Prior Informed Consent Procedure for Certain Hazardous Chemicals and Pesticides in International Trade*. <http://www.fao.org>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2021). *World food and agriculture statistical yearbook*. FAO.
- Gill, H. K., ve Garg, H. (2014). Pesticide: Environmental impacts and management strategies. In *Pesticides: Toxic aspects* (pp. 187-230). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/57399>
- Giller, K. E., Beare, M. H., Lavelle, P., Izac, A. M. N., ve Swift, M. J. (1997). Agricultural intensification, soil biodiversity, and agroecosystem function. *Applied Soil Ecology*, 6(1), 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00149-7)
- Goulson, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987.
- Grieshaber, D., MacKenzie, R., Vörös, J., ve Reimhult, E. (2008). Electrochemical biosensors—Sensor principles and architectures. *Sensors*, 8(3), 1400-1458.
- Gupta, A. K., Gupta, M., ve Yarwood, S. J. (2019). *Nanopartiküllerin toksikolojik etkileri*. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 370, 65-75.
- Gupta, R., ve Chauhan, N. (2021). Nanomaterial-based electrochemical sensors for pesticide detection in water. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2069-2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>
- Gupta, S., ve Chauhan, P. K. (2021). Nanomaterial-based sensors for pesticide detection: Challenges and future perspectives. *Environmental Science: Nano*, 8(4), 1025-1048. <https://doi.org/10.1039/D0EN01245A>

- Gupta, S., Yadav, B. ve diğeri. (2018). Çinko oksit nanorodların pestisit tespitinde kullanımı. *Çevre Bilimi ve Teknolojisi*, 52(8), 4830-4838.
- Günay, F., ve Yılmaz, R. (2020). İnsektisitlerin sınıflandırılması ve kullanım alanları. *Entomoloji Dergisi*, 35(1), 23-36.
- Hao, J., Zhang, L., Mao, S., ve diğeri. (2017). Controllable synthesis of TiS₂ nanostructures for high-performance electrocatalytic applications. *Advanced Materials*, 29(12), 1604745. <https://doi.org/10.1002/adma.201604745>
- Hao, J., Zhang, L., Sun, Y., ve Liu, H. (2017). TiS₂ nanosheets as efficient electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction. *ACS Applied Materials ve Interfaces*, 9(46), 40241-40247. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b11571>
- Heller, A., ve Feldman, B. (2008). Electrochemical glucose sensors and their applications in diabetes management. *Chemical Reviews*, 108(7), 2482-2505. <https://doi.org/10.1021/cr068069y>
- Honeychurch, K. C. (2010). Çevresel örneklerde ağır metallerin elektrokimyasal tayini. *Environmental Science and Technology*, 44(3), 457-468.
- Hummers, W. S., ve Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- Húšková, R., Matisová, E., Hrouzková, S., ve Svorc, L. (2009). Analysis of pesticide residues by fast gas chromatography in combination with negative chemical ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1216(35), 6326-6334. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.07.013>
- IARC. (2015). Glyphosate. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 112, 1-92.
- Jeschke, P., Nauen, R., Schindler, M., ve Elbert, A. (2011). Overview of the status and global strategy for neonicotinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7), 2897-2908. <https://doi.org/10.1021/jf101303g>
- Justino, C. I. L., Rocha-Santos, T. A., ve Duarte, A. C. (2010). Elektrokimyasal sensörlerin çevresel ve klinik analizlerdeki uygulamaları. *Trends in Analytical Chemistry*, 29(10), 1172-1183.

- Kara, M., ve Yılmaz, S. (2020). Neonikotinoidlerin arı populasyonları üzerine etkileri. *Tarım ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 6(1), 12-24.
- Karimi-Maleh, H., Karimi, F. ve diğerleri. (2021). Gümüş-çinko oksit nanokompozit sensör. *Kemosfer*, 268, 128843.
- Katz, E., ve Willner, I. (2003). *Elektrokimyasal biyosensörlerde protein redoks merkezleri ile elektrotlar arasında elektron transferi*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 550-551, 171-187.
- Kaya, S., Durmuş, Y., ve Aktaş, K. (2022). Neonikotinoidlerin arı populasyonları üzerine etkileri. *Çevre Toksikolojisi Dergisi*, 18(3), 155-168.
- Kim, K.-H., Kabir, E., ve Jahan, S. A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of the Total Environment*, 575, 525-535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>
- Kissinger, P. T., ve Heineman, W. R. (1996). *Laboratuvar teknikleri in elektroanalitik kimya* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Kumar, P., Singh, R. ve diğerleri. (2023). Bakır oksit-karbon nanotüp hibrit malzeme. *Biyosensörler ve Bioelektronik*, 221, 114876.
- Kumar, S., Mohan, U., ve Kumar, A. (2020). Nanoparticles in pesticide detection: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 1827-1845. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01050-5>
- Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., ve diğerleri. (2020). Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. *RSC Advances*, 10(33), 19309-19336. <https://doi.org/10.1039/D0RA01084G>
- Kumar, S., Sharma, R., Sharma, V., ve diğerleri. (2021). Metal sulfide/graphene nanocomposites for electrochemical sensing applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(12), 7891-7905. <https://doi.org/10.1039/D0TA12345A>
- Kumar, S., Sharma, R., Yadav, V., ve diğerleri. (2022). Oxidation-resistant properties of TiS₂ for electrochemical applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(15), 5891-5902. <https://doi.org/10.1039/D1TC05678A>

- Kumar, S., ve Singh, R. (2021). Nanopartiküllerin tıbbi uygulamaları. *Journal of Controlled Release*, 329, 552-568.
- Kumar, V., Yadav, S. K., ve Yadav, S. C. (2020). Nanopartiküllerin temel özellikleri ve sınıflandırılması. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(5), 2719-2732.
- Lee, J., ve Kim, J. (2018). Nanopartiküllerin çevresel uygulamaları. *Environmental Science ve Technology*, 52(7), 3933-3944.
- Li, H., Zhang, W., Liu, G., ve diğerleri. (2020). Controllable synthesis of transition metal dichalcogenides for sensor applications. *Advanced Materials Interfaces*, 7(12), 2000123. <https://doi.org/10.1002/admi.202000123>
- Li, H., Zhang, W., Zhang, Y., ve diğerleri. (2022). FTIR characterization of organophosphate compounds and their interactions with nanomaterials. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 265, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120387>
- Li, J., Wang, Y. ve diğerleri. (2019). Manyetik nanoparçacık tabanlı deniz suyu analizi. *Tarım ve Gıda Kimyası Dergisi*, 67(12), 3529-3537.
- Li, J., Zhou, Y., ve Liu, J. (2019). Nanopartikül temelli elektrokimyasal pestisit sensörleri. *Analytical Chemistry*, 91(14), 8735-8743.
- Li, X. ve Wang, Y. (2020). İletken polimer-gümüş nanowire kompozitleri. *Talanta*, 208, 120408.
- Li, X., Zhang, Y., ve Wang, J. (2019). Elektrokimyasal biyosensörlerin klinik teşhislerdeki rolü. *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111417.
- Li, Y., Somorjai, G. A., ve Yang, P. (2022). Nanopartiküllerin katalitik uygulamaları. *Nature Reviews Materials*, 7(3), 205-220.
- Liao, H., Chen, Y., ve Wang, J. (2022). Advanced analytical techniques for pesticide detection in agricultural products. *Journal of Environmental Chemistry*, 15(3), 245-260.
- Lisdat, F., ve Schäfer, D. (2008). The use of electrochemical impedance spectroscopy for biosensing. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(5), 1555-1567.

- Liu, Y., Chen, X., Wang, Z., ve diğerleri. (2020). Gold nanoparticle/multi-walled carbon nanotube composites for pH-dependent pesticide detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 305, 127453. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127453>
- Liu, Y., Zhang, X., Chen, W., ve diğerleri. (2024). AI-integrated nanosensors for smart pesticide monitoring: Trends and prospects. *Biosensors and Bioelectronics*, 210, 114325. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.114325>
- Mahmoodi, P., Rezvani, A., Karimi-Maleh, H., ve diğerleri. (2019). Electrochemical biosensor based on modified electrode with graphene oxide/polypyrrole/tyrosinase for sensitive determination of organophosphorus pesticides. *Microchemical Journal*, 145, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.027>
- Malik, A. K., Blasco, C., ve Picó, Y. (2010). Liquid chromatography–mass spectrometry in food safety. *Journal of Chromatography A*, 1217(25), 4018-4040. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.03.015>
- Mishra, R. K., Hubble, L. J., Martín, A., ve diğerleri. (2018). Wearable flexible and stretchable electrochemical biosensors: A review. *Electroanalysis*, 30(3), 513-532. <https://doi.org/10.1002/elan.201700764>
- Mostafalou, S., ve Abdollahi, M. (2017). Pesticides: An update of human exposure and toxicity. *Archives of Toxicology*, 91(2), 549-599. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1849-x>
- Osteryoung, J., ve Osteryoung, R. A. (1985). Pulse voltammetry. *Analytical Chemistry*, 57(1), 101A-110A. <https://doi.org/10.1021/ac00279a789>
- Özkan, D., Şahin, S. ve diğerleri. (2018). Kobalt ftalosiyanın modifiye elektrot. *Elektrokimya Acta*, 259, 189-196.
- Öztürk, B., Kaplan, M., ve Solak, E. (2018). Piretroitlerin etki mekanizması ve güvenlik profili. *Zirai İlaç Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 89-102.
- Pal, A., Teotia, S., Kumar, R., ve diğerleri. (2021). Graphene oxide/TiS₂ hybrid nanostructures for enhanced electrochemical sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 4(5), 5123-5132. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00625>

- Pal, M., Sharma, R. K., ve Gupta, R. (2021). Graphene oxide-based nanocomposites for pesticide detection: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123591. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123591>
- Pandey, C. M., Tiwari, I., ve diğeri. (2018). Recent advances in electrochemical sensors for detecting toxic gases: NO₂, SO₂, and H₂S. *Sensors*, 19(4), 905.
- Patel, R., Singh, A., Yadav, V., ve diğeri. (2022). Portable nanoparticle-based sensors for on-site pesticide detection in agriculture. *ACS Sensors*, 7(3), 789-801. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c02478>
- Patel, S., ve Kumar, P. (2018). *Nanopartiküllerin ilaç taşıyım sistemlerinde kullanımı*. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 130, 3-11.
- Pérez-Fernández, B., Costa-García, A., ve Muñiz, A. (2021). Molecularly imprinted polymers for electrochemical detection of pesticides: A review. *Chemosensors*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9020032>
- Pisa, L. W., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Downs, C. A., Goulson, D., ... ve Wiemers, M. (2015). Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 68-102. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3471-x>
- Rai, V., Hapuarachchi, H. C., ve Ng, L. C. (2012). *Elektrokimyasal sensörlerin çevresel izlemede kullanımı*. *Sensors*, 12(9), 11871-11885.
- Rao, C. N. R., Müller, A., ve Cheetham, A. K. (2017). *Nanopartikül sentez yöntemleri*. *Chemistry of Materials*, 29(1), 1-12.
- Ravelo-Perez, L. M., Hernandez-Borges, J., ve Rodriguez-Delgado, M. A. (2006). Pesticide analysis in foods by chromatographic techniques. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(3-4), 163-176. <https://doi.org/10.1080/10408340600969986>
- Resmi Gazete. (2021, 10 Şubat). *Bitki Koruma Ürünlerinin Toptan ve Perakende Satılması ile Depolanması Hakkında Yönetmelik*. Sayı: 31390. <https://www.resmigazete.gov.tr>

- Rodríguez-Méndez, M. L., González-Sánchez, M. I. ve diğerleri. (2022). Kitozan-grafen oksit biyokompozit sensör. *Gıda Kimyası*, 368, 130811.
- Ronkainen, N. J., Okon, S. L., ve diğerleri. (2010). Nanomaterial-based electrochemical immunosensors for clinically significant biomarkers. *Materials*, 7(6), 4669-4709.
- Sabzewari, A., ve Hofman, J. (2022). Sustainable pest management: Alternatives to chemical pesticides. *Journal of Environmental Health*, 45(3), 112-125.
- Sánchez-Sánchez, C. M., Rodríguez-López, J., ve Bard, A. J. (2018). Recent advances in electrochemical detection of pesticides. *Current Opinion in Electrochemistry*, 12, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.009>
- Shao, Y., Wang, J., Wu, H., ve Liu, J. (2011). *Gıda analizlerinde elektrokimyasal pestisit sensörleri*. Food Chemistry, 125(3), 1099-1105.
- Singh, P., Kim, Y. J., ve Zhang, D. (2018). *Biyomedikal uygulamalarda nanopartiküller*. Trends in Biotechnology, 36(3), 303-314.
- Sirés, I., Brillas, E. ve diğerleri. (2015). Bor katkılı elmas elektrot uygulamaları. *Tehlikeli Materyaller Dergisi*, 287, 49-57.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., ve Crouch, S. R. (2017). *Analitik kimya ilkeleri* (9th ed.). Cengage Learning.
- Smith, A., ve Jones, B. (2019). *Nanoteknolojinin temel prensipleri*. Nature Nanotechnology, 14(3), 208-216.
- Şenel, M., Narin, İ. ve diğerleri. (2019). Nafion kaplı nikel oksit elektrotlar. *Mikrochimica Acta*, 186, 234.
- Tekin, S., Bulut, N., ve Yılmaz, K. (2021). Seçici herbisitlerin etkinliği ve çevresel riskleri. *Herboloji Dergisi*, 16(4), 201-215.
- Thevenot, D. R., Toth, K., Durst, R. A., ve Wilson, G. S. (2001). Electrochemical biosensors: Recommended definitions and classification. *Biosensors and Bioelectronics*, 16(1-2), 121-131.
- Turner, A. P. F., Karube, I., ve Wilson, G. S. (1987). *Biyosensörler: Temeller ve uygulamalar*. Oxford University Press.

- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2001). *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants*. <http://www.pops.int>
- Valcárcel, M., ve Ríos, A. (1994). *İyon seçici elektrotlar ve potansiyometrik sensörler*. *Analytical Chemistry*, 66(1), 78A-89A.
- Verma, N., ve Bhardwaj, A. (2015). Biosensor technology for pesticides—A review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(6), 3093-3119. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1489-2>
- Wang, H., Li, J., Zhang, Y., ve diğerleri. (2021). pH-dependent electrochemical behavior of TiS₂-based nanocomposites for pesticide detection. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880, 114893. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2020.114893>
- Wang, H., Zhang, Q. ve diğerleri. (2021). Polianilin-karbon nanofiber kompozitler. *Sensörler ve Aktüatörler B: Kimyasal*, 327, 128893.
- Wang, J. (2006). *Analytical electrochemistry* (3rd ed.). Wiley.
- Wang, J. (2008). Electrochemical glucose biosensors. *Chemical Reviews*, 108(2), 814-825.
- Wang, J., Sánchez, A. ve diğerleri. (2010). Cıva elektrotlarla anodik sıyırma voltametrisi. *Elektroanaliz*, 22(10), 1125-1130.
- Wang, L., Chen, J., Xu, Z., ve diğerleri. (2019). Graphene oxide-based biosensors for pesticide detection. *ACS Applied Materials ve Interfaces*, 11(8), 7899-7908. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b12345>
- Wang, L., Chen, J., Xu, Z., ve diğerleri. (2022). TiS₂/graphene oxide nanocomposites: Synthesis and interfacial interactions. *ACS Applied Materials ve Interfaces*, 14(8), 10231-10241. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c23456>
- Wang, L., Li, H., Zhou, J., ve diğerleri. (2023). Aptamer-functionalized gold nanoparticles for selective pesticide detection: A review. *Microchimica Acta*, 190(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05630-w>
- Wang, X., Li, Y., ve Chen, X. (2020). *Nanopartiküllerin enerji uygulamaları*. *Energy ve Environmental Science*, 13(4), 1041-1056.

- Wang, Y., Xu, H., Zhang, J., ve Li, G. (2019). *Nanomalzemelerin elektrokimyasal sensörlerdeki uygulamaları*. Chemical Reviews, 119(12), 6769-6787.
- Wei, Y., Li, J. ve diğerleri. (2021). Molibden disülfür-grafen hibrit malzeme. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880, 114932.
- Weiss, B., ve Amler, S. (2004). Pesticide exposure and human health: A review of risks and regulations. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 198(2), 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2003.11.021>
- World Health Organization (WHO). (2020). *The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification*. WHO.
- Wu, J., Li, H., Zhang, P., ve diğerleri. (2021). TiS₂-based electrodes for advanced electrochemical sensing applications. *Advanced Functional Materials*, 31(24), 2101234. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101234>
- Yalçın, Ş. H. CHEM306: Instrumental Analysis II – Lecture Notes. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü. Retrieved July 2, 2025, from https://web.iyte.edu.tr/~serifeyalcin/lectures/chem306/cn_2.pdf
- Yang, L., Wang, X. ve diğerleri. (2020). Kuantum nokta tabanlı elektrokemilüminesans sensör. *Analitik Chimica Acta*, 1105, 155-163.
- Yang, Y., Liu, X., Wang, T., ve diğerleri. (2021). Stability studies of nanomaterial-based electrochemical biosensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 326, 128842. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128842>
- Yarpuz-Bozdoğan, N., ve Bozdoğan, A. M. (2018). Pestisit kullanımının çevresel etkileri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 33(2), 345-356.
- Yıldız, P., Ateş, A., ve Çetin, G. (2021). Diğer pestisit türlerinin tarımdaki yeri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 8(1), 56-68.
- Yılmaz, S., Demir, A. ve diğerleri. (2022). Bizmut film kaplı elektrotlarla şarap analizi. *Gıda Analiz Yöntemleri*, 15, 234-245.
- Yoon, J., Shin, M., Lee, T., ve Choi, J. W. (2020). *Mobil sağlık için miniaturize elektrokimyasal sensörler*. Biosensors and Bioelectronics, 151, 111992.

- Zhang, L., Gu, F. X., ve Chan, J. M. (2021). *Nanopartiküllerin fizikokimyasal özellikleri*. Chemical Society Reviews, 50(7), 4079-4114.
- Zhang, P., Zhao, X., Li, M., ve diğerleri. (2023). Molybdenum disulfide/graphene hybrid sensors: pH optimization and performance evaluation. *Microchimica Acta*, 190(2), 78. <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05630-w>
- Zhang, P., Zhao, X., Li, M., ve diğerleri. (2023). Reproducibility challenges in nanomaterial-based biosensors. *Nature Communications*, 14, 1234. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36876-4>
- Zhang, P., Zhao, X., Zhang, Y., ve diğerleri. (2020). Reduced graphene oxide-based sensors for pesticide detection. *Analytical Chemistry*, 92(5), 3998-4006. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b05567>
- Zhang, X., Zhang, Y., ve Chen, J. (2020). Nafion-modified TiS₂/graphene oxide nanocomposite for electrochemical detection of organophosphorus pesticides. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 305, 127456. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127456>
- Zhang, Y., Li, X. ve diğerleri. (2021). Moleküler baskılı polimerlerle seçici tespit. *Sensörler ve Aktüatörler B: Kimyasal*, 326, 128842.
- Zhao, G., Li, X., Wang, H., ve diğerleri. (2022). MoS₂/reduced graphene oxide composites for electrochemical pesticide detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 351, 130987. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130987>
- Zhao, G., Wang, H., Liu, G., ve diğerleri. (2020). Molybdenum disulfide/graphene composites for electrochemical sensing. *Microchimica Acta*, 187(3), 182. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-4154-6>
- Zhao, G., Wang, H., Liu, X., ve diğerleri. (2023). Homogeneous properties of metal dichalcogenide/graphene hybrids. *Advanced Functional Materials*, 33(15), 2212345. <https://doi.org/10.1002/adfm.202212345>
- Zhao, G., Wang, H., Liu, X., ve diğerleri. (2023). Homogeneous properties of metal dichalcogenide/graphene hybrids. *Advanced Functional Materials*, 33(15), 2212345. <https://doi.org/10.1002/adfm.202212345>

- Zhao, G., Wang, Y., Li, X., ve diğeri. (2020). Recent advances in electrochemical sensors based on nanomaterials for detection of pesticides. *Microchimica Acta*, 187(5), 280. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-04246-2>
- Zheng, Z., ve He, L. (2014). Surface-enhanced Raman spectroscopy for the chemical analysis of food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(3), 317-328. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12062>
- Zhou, J., Ralston, J., ve Sedev, R. (2021). *Nanopartikül temelli optik sensörler*. ACS Nano, 15(3), 3754-3780.
- Zhou, M., Zhai, Y., ve Dong, S. (2015). *Grafen ve karbon nanotüp tabanlı elektrokimyasal sensörler*. Analytical Chemistry, 81(14), 5603-5623.

T.C.
AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİMSEL ETİK BEYANI

“TiS₂/GO Nanokompozit Temelli Nanosensörler ile Parathion Tayini” başlıklı Yüksek Lisans tezindeki bütün bilgileri etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiz atıf yaptığımı bildiririm. İfade ettiklerimin aksi ortaya çıktığında ise her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Adem YAĞIZ

... / ... / 2025

ÖZ GEÇMİŞ

Soyadı, Adı : YAĞIZ, Adem
Uyruk : T.C.
Doğum yeri ve tarihi : Akşehir / 29.02.1996
Telefon : 0 554 969 23 36
E-posta : ademygzz@gmail.com
Yabancı dil : İngilizce

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet tarihi
Lisans	Aydın Adnan Mendes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü	2019

BURSLAR ve ÖDÜLLER

2209-B - Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı
2018/3

2210 D - Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı 2022/2

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer/Kurum	Ünvan
2023-devam ediyor	ALS-FOOD	Analist