

T.C.
HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BESLENME VE DİYETETİK ANABİLİM DALI



**GIDALARDAN FAMOKSADON TESPİTİ İÇİN YENİ BİR
MOLEKÜLER BASKILI SPR SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ**

Merve YAVAŞ KİREZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZİANTEP- 2025



LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZ KABUL VE ONAY FORMU

Beslenme ve Diyetetik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi **Merve YAVAŞ KİREZ** tarafından hazırlanan “**Gıdalardan Famoksadon Tespiti İçin Yeni Bir Moleküler Baskılı SPR Sensörü Geliştirilmesi**” başlıklı tez, 17/6/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucu **başarılı** bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

<u>Görevi</u>	<u>Unvanı, Adı ve Soyadı</u>	<u>Kurumu/Üniversitesi</u>	<u>İmzası:</u>
Tez Danışmanı	Prof. Dr. Mehmet Lütfi YOLA	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	
Jüri Başkanı	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Anıl ERBAĞCI	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hülya YILMAZ	Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi	

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ufuk AKBAŞ
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Merve YAVAŞ KİREZ

Tarih:

HASAN KALYONCU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BESLENME VE DİYETETİK ANABİLİM DALI

GIDALARDAN FAMOKSADON TESPİTİ İÇİN YENİ BİR
MOLEKÜLER BASKILI SPR SENSÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

Merve YAVAŞ KİREZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman
Prof. Dr. Mehmet Lütfi YOLA

ÖZET

Bu araştırmada, bir fungusit olarak Famoksadon (FAM) için yeni moleküler baskılı yüzey plazmon rezonans (SPR) sensörü hazırlanmıştır. Biyosensörler, gıda analizinde süper hızlı, tahribatsız ve uygun maliyetli algılama sunarak otomatik bir teknoloji sağlamaktadırlar. SPR (Surface Plasmon Resonance) biyosensörü, çok yönlülüğü ile bilinen gıda testi ve analizinde daha geniş uygulamalara sahip bir optik biyosensördür. Çalışmadaki amaç, bu sensörü yüksek geri kazanıma sahip domates numunelerindeki Famoksadon (FAM) fungusitinin kantitatif analizi için kullanmaktır. İlk olarak FAM-MAGA kompleksi PBS (pH 6,0) varlığında hazırlandıktan sonra AIBN-HEMA-EGDMA çözeltisine (1,5 mL) eklenmiştir. UV polimerizasyonu kullanılarak FAM baskılı SPR yongası oluşturulmuştur. (MIP/SPR). Geliştirilen sensör yüzeyleri fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Analitik sonuçlar, domates örneklerinde SPR sinyallerinin 1,0 – 10,0 ng L⁻¹ FAM arasında doğrusallığa sahip olduğu belirlenmiştir. Kantifikasyon sınırı (LOQ) ve LOD değerleri sırasıyla 1,0 ng L⁻¹ ve 0,30 ng L⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Neticede, geliştirilen SPR tabanlı sensör platformu, yüksek seçicilik, tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik ve yapısal stabilite gibi kritik analitik parametreler açısından üstün performans sergilemiştir. Bu özellikleriyle sensör, küresel düzeyde gıda güvenliğinin izlenmesine yönelik stratejik uygulamalarda etkin bir analitik araç olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: famoksadon; SPR, sensör; moleküler baskılama, gıda analizi

**HASAN KALYONCU UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
DEPARTMENT of NUTRITION AND DIETETICS**

**DEVELOPMENT OF A NEW MOLECULAR IMPRESSED SPR SENSOR FOR
DETECTION OF FAMOXADONE FROM FOODS**

Merve YAVAŞ KİREZ

MASTER THESIS

**Advisor
Prof. Dr. Mehmet Lütfi YOLA**

ABSTRACT

In this study, a novel molecularly imprinted surface plasmon resonance (SPR) sensor was developed for the detection of Famoxadone (FAM), a fungicide. Biosensors offer a rapid, non-destructive, and cost-effective technology for food analysis by enabling automatic detection. SPR (Surface Plasmon Resonance) biosensors are widely used in food testing and analysis due to their high sensitivity and broad application range. The aim of this study is to utilize this sensor for the quantitative analysis of Famoxadone (FAM) in tomato samples, which is known as a fungicide with high sensitivity and signal acquisition. Initially, the FAM-MAGA complex was prepared in PBS (pH 6.0) and AIBN-HEMA-EGDMA solution (1.5 mL) was added. The SPR chip imprinted with FAM was then fabricated using UV polymerization (MIP/SPR). The sensor surfaces were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Atomic Force Microscopy (AFM). Analytical results showed that SPR signals in tomato samples were linear in the range of 1.0–10.0 ng L⁻¹ for FAM, with a strong correlation. The limit of quantification (LOQ) and limit of detection (LOD) values were calculated as 1.0 ng L⁻¹ and 0.30 ng L⁻¹, respectively. Consequently, the developed SPR-based sensor platform demonstrated high selectivity, repeatability, reusability, and structural stability, exhibiting superior performance in terms of critical analytical parameters. With these features, the sensor has the potential to serve as an effective analytical tool in strategies aimed at monitoring food safety at a global level.

Keywords: Famoxadone; surface plasmon resonance; sensor; molecularly imprinting; food analysis

ÖNSÖZ

Tez süreci boyunca bana yol gösteren, bilgisini, tecrübesini, anlayışını, zamanını ve desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Lütfi Yola'ya,

Yüksek lisans dönemim boyunca bilgi, deneyim ve destekleri için değerli İlknur Polat'a,

Her zaman olduğu gibi yüksek lisans döneminde de bana güç veren canım eşim Furkan Kirez 'e ve tüm aileme en büyük teşekkürlerimi sunarım.

Merve YAVAŞ KİREZ
Gaziantep- 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Önemi	3
1.2. Çalışmanın Amacı	3
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	5
2.1. Pestisitler	5
2.1.1. Pestisitlerin tanımı	5
2.1.2. Pestisitlerin tarihçesi.....	6
2.1.3. Dünya çapında ve ülkemizde pestisit kullanımı	7
2.1.4. Pestisitlerin sınıflandırılması	12
2.1.5. Pestisitlerin kullanım alanları	17
2.1.6. Pestisit kullanımının çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri	18
2.2. Famoksadon (Famoxadone)	21
2.3. Biyosensörler	22
2.3.1. Biyosensörlerinin karakteristik özellikleri.....	23
2.3.2. Biyosensör çeşitleri.....	25
2.3.3. Yüzeysel plazmon rezonans sensörü (SPR).....	28
2.3.4. Gıda güvenliği ve biyosensör kullanımı	29
2.4. Moleküler Baskılama Teknolojisi	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33
3.1. Materyal.....	33
3.2. Enstrümantasyon	33
3.3. Yöntem	33
3.3.1. Famoksadone (FAM) baskılı SPR sensörünün geliştirilmesi	33
3.3.2. Numune hazırlama.....	34
3.3.3. MIP/SPR'den FAM uzaklaştırılması ve analiz prosedürü	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	36
4.1. FAM Baskılı p(HEMA-MAGA) Filminin FTIR ve AFM Karakterizasyonları.....	36
4.2. FAM Baskılı SPR Çipinde pH Etkisi	37
4.3. Doğrusallık Aralığı	38
4.4. Geri Kazanım.....	39
4.5. MIP/SPR'nin Tekrarlanabilirliği, Yeniden Üretilirliği ve Kararlılığı.....	40

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	41
5.1 Sonuçlar	41
5.2 Öneriler	42
KAYNAKÇA.....	45
ÖZGEÇMİŞ	50



ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2. 1 2022 yılında Türkiye’de bölgelere pestisit kullanım miktarları (Erdoğan, 2024).....	10
Çizelge 2. 2 2022 yılında Türkiye’de pestisit kullanımının en çok olduğu iller ve kullanım miktarları (ton) (Erdoğan, 2024).	11
Çizelge 2. 3 DSÖ Pestisit Sınıflaması (Dünya Sağlık Örgütü, 2019)	17
Çizelge 4. 1 Domates örneklerinde FAM’ın geri kazanım sonuçları (n=6)	39

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2. 1 2022 yılı Ülkelerin Toplam Pestisit Kullanım Miktarları (Food and Agriculture Organization, 2024).....	8
Şekil 2. 2 Yıllara göre Türkiye’de Toplam Pestisit Kullanımı (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2025).....	9
Şekil 2. 3 Famoksadon’ un kimyasal yapısı	21
Şekil 2. 4 Biyosensörlerin şematik çalışma prensibi gösterimi (Bhalla vd., 2016).....	23
Şekil 2. 5 Biyosensörlerin sınıflandırılması (Alhadram, 2018).....	25
Şekil 2. 6 Moleküler baskılama prensibinin şematik gösterimi (Bedair vd., 2025).	32
Şekil 4. 1 (A) SPR üzerine basılmış FAM’ın FTIR spektrumları; (B) çıplak SPR çipinin ve (C) MIP/SPR çipinin AFM görüntüleri	37
Şekil 4. 2 (A) PBS'nin farklı pH'larında 10,0 ng L ⁻¹ FAM için SPR sensörgramları, (B) pH'ın FAM baskılı SPR çipi ve 10,0 ng L ⁻¹ FAM varlığındaki etkisi.....	38
Şekil 4. 3 pH 6.0 PBS varlığında (1,0 ng L ⁻¹ 'den 10,0 ng L ⁻¹ FAM’a) FAM konsantrasyonunun MIP/SPR sinyalleri üzerindeki etkisi: (a) adsorpsiyon; (b) desorpsiyon; (c) rejenerasyon	39
Şekil 4. 4 25 °C'de pH 6.0 PBS içeren 10.0 ng L ⁻¹ FAM varlığında MIP/SPR çipinin tekrarlanabilirliği: (a) adsorpsiyon; (b) desorpsiyon; (c) rejenerasyon	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat derece
Au	: Altın
C	: Karbon
-CH	: Hidrokarbon
cm	: Santimetre
g	: Gram
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
K	: Seçicilik katsayısı
k'	: Bağlı seçicilik katsayısı
M	: Molar
mg	: Miligram
ml	: Mililitre
mM	: Milimolar
NaCl	: Sodyum klorür
nm	: Nanometre
P	: Fosfor
PK _a	: Asidik iyonlaşma sabiti
pH	: Potansiyel hidrojen
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
π	: Pi

Kısaltmalar

ACN	: Asetonitril
ADI	: Kabul edilebilir günlük alım miktarı (Acceptable Dietary Intake)
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
AIBN	: Azobisisobutironitril
ARfD	: Akut referans dozu
CNM'ler	: Karbon nanomateryalleri
CNT'ler	: Karbon nanotüpler
CV	: Döngüsel voltammetri
DDT	: Diklorodifeniltri-kloroetan
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
DWCNT'ler	: Çift duvarlı karbon nanotüpler
EFSA	: Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
EİA	: Enzim immün testleri
EGDMA	: Etilen glikol dimetakrilat
ELISA	: enzim bağlı immunosorbent
FAM	: Famoksadon
FAO	: Gıda ve Yarı m Örgütü
FDA	: Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HEMA	: 2-hidroksietilmetakrilat
HPLC	: Yüksek performanslı sıvı kromatografisi
LCMS	: Sıvı kromatografi-mass spektrometresi
LOD	: Tespit limiti
LOQ	: Nicelik sınırı
MAA	: Metakrilik asit
MAGA	: Metakriloilamidoglutamik asid
MIP	: Moleküler baskılı polimer
MRL	: Maksimum kalıntı sınırı
MWCNT'ler	: Çok duvarlı karbon nanotüpler
NIP	: Moleküler baskılanmamış

PBS	: Fosfat tamponlu salin
RSD	: Bağıl standart sapma
SDG2	: Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 2
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
S-GCN	: Kükürt katkılı grafit karbon nitür
SPR	: Yüzey plazmon rezonansı
SWCNT'ler	: Tek duvarlı karbon nanotüpler
TEM	: Transmisyon elektron mikroskobu
THI	: THI
TLC	: İnce tabaka kromatografisi
UK-2A	: Antibiyotik UK 2A
UV	: Ultraviyole
UV-Vis	: Ultraviyole ve görünür ışık absorpsiyon spektroskopisi
XPS	: Fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışını difraktometresi

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan dünya nüfusu, insanlığın karşı karşıya olduğu en temel sorunlardan biri olan gıda yetersizliğini de beraberinde getirmektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için öncelikli hedef, tarımsal üretim alanlarından en yüksek verimi elde etmeye yönelik çalışmaların yoğunlaştırılması olmuştur (Tortora vd., 2024).

Tarihsel süreçte, bitkisel üretimi tehdit eden zararlılar ve hastalık etmenleriyle mücadele edebilmek amacıyla çeşitli tarımsal savaşım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; kültürel uygulamalar, biyoteknik müdahaleler, karantina önlemleri ile birlikte fiziksel, mekanik, biyolojik ve kimyasal mücadele yaklaşımlarını kapsamaktadır. Ancak, Türkiye’de uygulama kolaylığı, kısa sürede etkili sonuç vermesi ve yaygın bilgi düzeyi nedeniyle en sık başvurulan yöntem kimyasal mücadele olmuştur. Bunun sonucu olarak pestisit kullanımı ülke tarımında yaygın bir uygulama haline gelmiştir ancak pestisitlerin bilinçsiz veya aşırı kullanımı, çevresel kirlenme, insan sağlığına yönelik riskler, biyolojik çeşitlilikte azalma ve direnç gelişimi gibi çok yönlü sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle pestisit uygulamalarında sürdürülebilirlik ilkesine dayalı, entegre zararlı yönetimi gibi daha çevreci yaklaşımların benimsenmesi giderek daha büyük önem kazanmaktadır (Öztürk ve Tosun, 2004).

Oksazolidinon sınıfından nispeten yeni bir fungusit olan Famoksadon; tarla bitkileri, meyve ve sebzelerde geniş bir yelpazedeki mantar patojenlerine karşı etkilidir. Famoksadon, spor çimlenmesine ve hassas mantarların misel büyümesine karşı oldukça etkilidir. Famoksadon’un biyokimyasal etki mekanizması, Kompleks III’te mantar mitokondriyal solunum zincirinin inhibisyonu olup, mantar hücresi tarafından ATP üretiminin azalmasına neden olmaktadır. Famoksadon’un kullanım amaçları arasında kabakgiller ve marullarda tüylü küf tedavisini , meyve ve sebzelerde ise erken ve geç yaprak yanıklığının tedavisi yer almaktadır (Sternberg vd., 2001).

Bununla beraber gıda mahsullerinde bulunan belirli pestisitlerin eser miktarları bile insan sağlığı için risk oluşturabilmektedir. Bu nedenle maksimum kalıntı sınırları (MRL) dünya çapında hükümetler tarafından düzenlenmelidir. EFSA, Avrupa Birliği Mevzuatında uygulanan Famoksadon için oluşturulan uluslararası olarak önerilen kodeks maksimum kalıntı sınırını baz alarak tüketici risk değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. En yüksek akut maruziyet domates için hesaplanmıştır (European Food Safety Authority, 2023).

Gıda güvenliğini sağlamak için özellikle yeni tanıtılan bileşikler için hassas ve güvenilir analitik yöntemler acilen istenmektedir (Rejczak ve Tuzimski, 2016). QuEChERS (Hızlı, Kolay, Ucuz, Etkili, Sağlam ve Güvenilir) yöntemi dünya çapında analistler tarafından geniş çapta kabul görmüştür (Anastassiades vd., 2003). Şu anda, gıda örneklerinden pestisitleri çıkarmak için en yaygın kullanılan yöntem QuEChERS yöntemidir (Sierotzki ve Scalliet, 2013).

Biyosensörler, gıda analizinde süper hızlı, tahribatsız ve uygun maliyetli algılama sunarak otomatik bir teknoloji sağlar. SPR (Surface Plasmon Resonance) biyosensörü, çok yönlülüğü ile bilinen, gıda testi ve analizinde daha geniş uygulamalara sahip bir optik biyosensördür. Yüzey plazmonlarının uyarılması ve sorgulanması için bir optik sisteme ve bir numunede bulunan hedef analiti tespit etmek ve yakalamak için bir biyomoleküler tanıma elemanına sahiptir. Optik sinyal, tanıma elemanı üzerindeki bağlayıcı analiti saptar, bu da yüzeyde kırılma indeksinde bir değişiklik ile sonuçlanır ve yüzey plazmonlarının yayılma sabitini değiştirir. SPR, gıdalardaki safsızlıklar, antibiyotikler, biyomoleküller, genetiği değiştirilmiş gıdalar, pestisitler, insektisitler, herbisitler, mikroorganizmalar ve mikrobiyal toksinler gibi çeşitli bileşenlerin etiketsiz tespitine yardımcı olur ve güvenliği sağlar (Kadirsoy vd., 2020; Ravindran vd., 2023).

Hedef molekül için çapraz bağlı ve spesifik polimerik yapılar oluşturma işlemine moleküler baskılama denir. Moleküler baskılama işlemi için, fonksiyonel monomer ve analitin etkileşimi ile bir ön polimerizasyon kompleksi oluşturulur. Daha sonra çapraz bağlayıcı ilave edilerek polimerizasyon başlatılır. Çapraz bağlayıcının fazlalığı sayesinde, fonksiyonel gruplar olan fonksiyonel monomer ve analit dondurulur. Analitin yapıdan uzaklaştırılması sonucunda tamamen analite özgü şekil ve büyüklükte bir tanıma bölgesi elde edilir. Moleküler baskılı polimer (MIP), analite özgü moleküler tanıma bölgelerine sahiptir ve yüksek afinite ile etkileşime girmeye hazırdır. Son yıllarda sensör teknolojisinde MIP'lerin tanıma elemanı olarak kullanıldığını görülmüştür (Ravindran vd., 2023; Yola vd., 2015).

1.1. Çalışmanın Önemi

Kimyasal yöntemler, dünya genelinde en yaygın kullanılan tarımsal mücadele teknikleri arasındadır. Bunun nedeni, kimyasal mücadelenin etkisinin yüksek olması, hızlı sonuç sağlaması ve doğru şekilde, bilinçli ve kontrollü kullanıldığında ekonomik avantaj sunmasıdır. Bu tür mücadelenin temelinde, pestisit olarak adlandırılan sentetik tarım ilaçları yer alır (De Waard vd., 1993).

Pestisitlerin bilinçsiz ve denetimsiz biçimde kullanımı, zararlı organizmaların direnç geliştirme potansiyelini artırmakta ve bu durum, pestisit kalıntılarının insan sağlığı ile çevre üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmasına neden olmaktadır. Bu tür etkiler kesinlikle göz ardı edilmemeli, dikkatle değerlendirilmelidir (Delen vd., 2005). Kontrolsüz pestisit uygulamaları; hava, su, toprak ve doğal ekosistemler üzerinde geri dönüşü zor zararlar doğurmaktadır. Her ne kadar bu kimyasallar tarımsal verimliliği artırmak amacıyla kullanılsa da ürünlerde kalıntı şeklinde kontaminasyona yol açarak insan sağlığı açısından çeşitli riskler barındırmaktadır. Pestisitlerin potansiyel toksik etkileri; kanserojenite, doğumsal anomaliler, sinir sisteminin hasar görmesi ve felç, multipl skleroz, demans gibi önemli ve kalıcı sorunlara sebep olabilmektedir (European Food Safety Authority, 2023).

Bu doğrultuda, maksimum kalıntı limitlerinin (MRL) uluslararası düzeyde hükümetler tarafından düzenlenmesi gerekmektedir. Gıda güvenliğinin sağlanabilmesi adına, özellikle yeni tanıtilen bileşikler için duyarlılığı yüksek ve güvenilir analitik yöntemlere acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, Famoksadon'un daha hassas şekilde tespitini mümkün kılan, çevre dostu yeni bir yöntemin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır (European Food Safety Authority, 2023).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, moleküler baskı malzemesi olarak kükürt katkılı grafitik karbon nitrür (S-g-C₃N₄) içeren yeni tasarlanmış bir yüzey plazmon rezonans (SPR) sensörünün geliştirilmesi ve kullanılması amaçlanmıştır.

Birincil amaç, bu sensörü pirinç numunelerindeki FEN'in kantitatif analizi için kullanmaktır. Araştırmada yeşil kimya ilkelerine uymak hedeflenmiştir ve S-g-C₃N₄'ün mükemmel saflıkta sentezi, yeşil kimya ilkelerine bağlı termal polikondenzasyon yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir.

Bu çalışma, FEN tanıma için moleküler baskılı SPR sensörüne dayalı verimli algılama yöntemini sunmaktadır. Hazırlanan nanokompozitin, analit molekülüne doğru spesifik bir yüzey alanı ve üstün sensör performansı göstermesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen moleküler baskılı SPR sensörünün, fungusit tespiti için yeni bir bakış açısı sağlaması ve aynı zamanda gıda güvenliğine sunduğu katkı ile sağlıklı yaşam için iyi bir araç olması beklenmektedir.



2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu araştırmanın amacı olan besinlerde pestisit analizleri ile ilgili literatürde yer alan bilgilere tezin bu bölümünde yer verilmiştir.

2.1. Pestisitler

2.1.1. Pestisitlerin tanımı

Pestisitler, kimyasal veya biyolojik bileşenlerden oluşan ve zararlıları püskürtmek, yok etmek veya kontrol etmek veya bitki büyümesini düzenlemek için tasarlanmış herhangi bir madde veya madde karışımıdır. Zararlılar, mahsul verimi kayıplarının önemli bir nedenidir. FAO, bitki zararlılarının ve hastalıklarının yıllık küresel mahsul veriminin yüzde 20 ila 40'ı arasında azalmayı oluşturduğunu tahmin etmektedir. Mahsul kayıpları, iklim zorlukları karşısında artan nüfus sayılarıyla birlikte artmaya devam eden gıda güvensizliğine katkıda bulunmaktadır. Son araştırmalar, iklim değişikliği ve değişken hava koşulları nedeniyle mahsul verimlerinin düşebileceğini güçlü bir şekilde göstermektedir. İklim değişikliğinin ayrıca bitki zararlılarını yoğunluk, dağılım ve yayılma açısından mahsullere daha zararlı hale getirmesini muhtemel kılmaktadır (Food and Agriculture Organization, 2025).

"Pestisit" terimi, veba anlamına gelen Latince "peſtis" ve öldürmek anlamına gelen "caedere" kelimelerinden türetilmiştir. Bu terim genel olarak, yabancı otlar, bitki patojenleri, böcekler, yumuşakçalar, nematodlar (yuvarlak solucanlar), kuşlar, balıklar, memeliler ve yiyecek için insanlarla rekabet eden, mülkleri yok eden, yayan veya hastalıkların taşınmasına veya yayılmasına yardımcı olan veya bir sıkıntı olarak görülen mikroplar dahil olmak üzere zararlıları yönetmek ve kontrol etmek için kullanılan bir dizi kimyasal kapsar (Yadav ve Devi, 2017).

Başka bir ifade ile bitkisel ürünlerin üretimi, hasadı, depolanması ve taşınması esnasında zararlı organizmaların zararını azaltmak amacıyla kullanılan formülasyon haline getirilmiş ticari preparatlardır. Ayrıca pestisitlere farklı bir adlandırma ile bitki koruma ürünleri (BKÜ) denir (Birişik vd., 2018).

2.1.2. Pestisitlerin tarihçesi

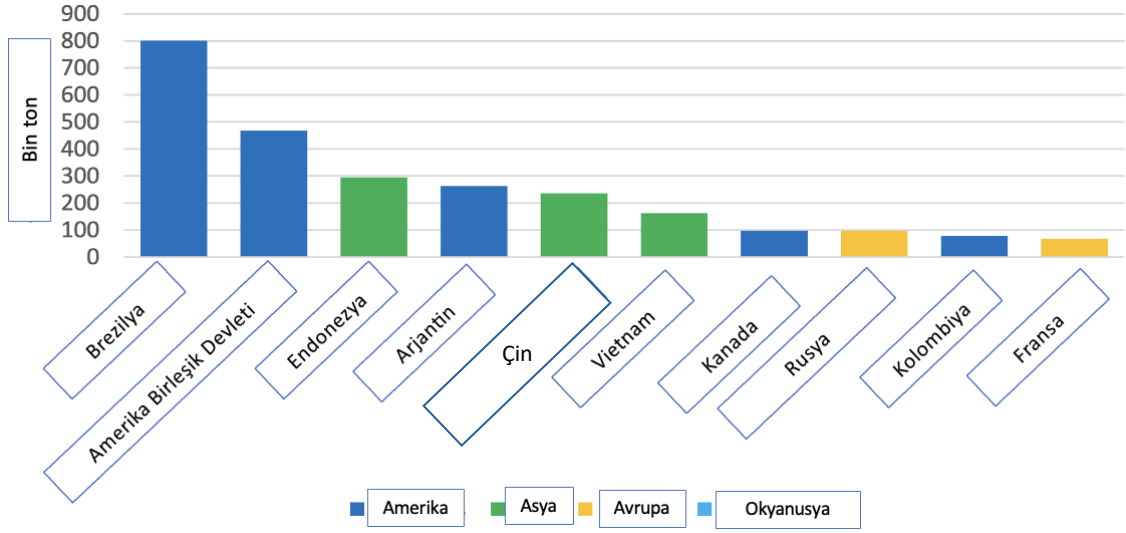
Pestisitlerin tarihçesi incelendiğinde, insanların zararlı organizmalarla mücadele amacıyla çeşitli maddeler kullandıkları çok eski dönemlere kadar gitmektedir. Örneğin, kutsal kabul edilen bazı tuzların ve fethedilen bölgelerin kalıntılarında bulunan küllerin, M.Ö 1200 yıllarında yabani otlara karşı seçici etkili bir herbisit olarak kullanıldığı bilinmektedir. M.Ö 1000'lerde ise kükürdün hem böcek öldürücü hem de mantar öldürücü etkisinin keşfedildiği anlaşılmaktadır. 'Hellebore' adlı bitki ise M.Ö 100 civarında Romalılar tarafından fare ve böcek gibi zararlılarla mücadelede kullanılmıştır. Çin kaynaklarına göre, M.S 900 yıllarında arsenik, Çinliler tarafından bahçe böcekleriyle mücadelede etkili bir madde olarak kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere'de ise 1821'de kükürtlü bileşiklerin bitki hastalıklarına karşı fungusit olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. 1921 yılında, tarım alanlarında uçakla ilaçlama yöntemine geçilmiştir. 1932'de Fransa 'da ise metil bromid, fumigant yani gaz halindeki bir pestisit olarak kullanılmaya başlanmıştır.1939 senesinde Paul Müller tarafından İsviçre'de DDT'nin insektisit etkisi ilk kez ortaya konulmuş, 1942'de ise 2,4-D maddesi geliştirilmiştir. 1948'de, İsviçre'de karasineklerde DDT'ye karşı ilk kez direnç olduğu gözlemlenmiştir. Ancak DDT, çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle 1973 yılında Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından tamamen yasaklanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA), 1978'de pestisitlerin yasaklanan veya kısıtlanan türlerine dair ilk resmi listeyi yayımlamıştır. Bu listeyi takiben ikinci liste ise 1985 yılında kamuoyuna sunulmuştur. Türkiye'de pestisit kullanımına yönelik kimyasal mücadele uygulamaları 1950'li yıllarda hız kazanmıştır. Bu dönemde çeşitli zararlılara karşı "Devlet Mücadeleleri" kapsamında pestisit kullanımının yaygınlaştırılması ve çiftçiler tarafından benimsenmesine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. 1960 sonrası dönemde hazırlanan kalkınma planlarında ise zirai mücadelede kullanılan kimyasal ilaçların tüketiminin artırılması hedeflenmiştir.1955 yılında süne zararlısına karşı ilk kez yer ekipmanları ve hava araçlarıyla ilaçlı mücadeleye başlanmıştır. 1979 yılına gelindiğinde ise ULV (ultra düşük hacimli) uygulamaları için uçak kullanımı tercih edilmiştir. Türkiye'de 2006 yılında havadan ilaçlama faaliyetleri yasaklanmış; 2008 yılında ise metil bromid maddesinin, karantina uygulamaları haricinde, kullanımı durdurulmuştur (Zirai Mücadele Merkez Araştırma Enstitüsü, 2015).

2.1.3. Dünya çapında ve ülkemizde pestisit kullanımı

Pestisit kullanım miktarı ve ticareti istatistikleri, tarımın sürdürülebilirliğini izlemek için önemlidir. Özellikle, pestisitlerin küresel hareketini değerlendirmeye ve pazarlara erişimdeki olası eksiklikleri belirlemeye yardımcı olabilirler. FAOSTAT (Pestisit Kullanımı veri tabanı), 1990-2022 dönemleri arasında aktif bileşenlere ve ana pestisit sınıflandırmasına göre ülkelerdeki pestisit kullanımı bilgilerini içerir (Food and Agriculture Organization, 2024).

2022 yılında tarımda kullanılan toplam pestisit miktarı 3,70 milyon ton (Mt) aktif madde olarak gerçekleşmiş olup, 2021 yılına göre yüzde 4, on yılda yüzde 13 artış ve 1990 yılından bu yana iki katına çıkmıştır. 1990-2022 yılları arasında pestisit yoğunlukları farklı oranlarda arttı: Ekili alan başına kullanım yüzde 94, tarımsal üretim değeri başına kullanım yüzde 5, kişi başına kullanım ise yüzde 35 artış göstermiştir. 2022 yılında toplam pestisit ihracatının hacmi 2021 yılına göre yüzde 1 azalarak yaklaşık 6,9 milyon ton formüle ürün olarak gerçekleşirken, değeri yüzde 13 artarak 48,8 milyar ABD dolarına çıkmıştır. 2022 yılında Asya, 3,5 milyon ton ve 21,7 milyar ABD doları (sadece diğer bölgelere yapılan ihracat dikkate alındığında 2,3 milyon ton ve 15,3 milyar ABD doları) ile en fazla pestisit ihraç eden bölge olmuştur. Amerika'da tarımda pestisit kullanımı 2021'de 1,71 milyon tondan 2022'de 1,89 milyon tona yüzde 10 artmıştır. Avrupa'da pestisit kullanımı 1990'dan bu yana yüzde 5 azalırken, son on yılda yüzde 7 oranında azalmıştır. Bölgedeki dört ada ülkesi ve topraklarına ait verilere göre Okyanusya'da toplam böcek ilacı kullanımına göre böcek ilacı-biyopestisitlerin ortalama payı yüzde 44'tür (Food and Agriculture Organization, 2024).

Şekil 2.1 Brezilya'nın 2022'de tarımsal kullanım için 801 kt pestisit uygulamasıyla dünyanın en büyük pestisit kullanıcısı olduğu gösterilmiştir. Bu, ikinci en büyük kullanıcı olan Amerika Birleşik Devletleri'nden (468 kt) yaklaşık %70 daha yüksektir. Sonraki üç kullanıcı olan ülke Endonezya'nın (295 kt), Arjantin (263 kt) ve Çin (236 kt) ile benzer miktarda uygulama seviyeleri görülmektedir (Food and Agriculture Organization, 2024).



Şekil 2. 1 2022 yılı Ülkelerin Toplam Pestisit Kullanım Miktarları (Food and Agriculture Organization, 2024).

Türkiye’de 2024 yılında toplam tarım ilacı kullanım miktarı, 2023 yılına göre %7,3 azalarak 53.515 tona düşmüştür. Pestisitlerin kullanım miktarları etki gruplarına göre değerlendirildiğinde, tıpkı dünya genelinde olduğu gibi Türkiye’de de en fazla kullanılan grup fungusitler olmuştur. 2024 yılında kullanılan toplam tarım ilaçlarının %33,9’luk kısmını fungusitler, %25,1’ini insektisitler (böcek öldürücüler), %23,7’lik kısmını yabancı otlara karşı kullanılan herbisitler, %4,1’ini akarisitler (akar ve mite öldürücüler), %0,4’ünü ise rodentisitler (kemirgen kontrol ürünleri) oluşturmuştur. Geriye kalan %12,6’lık kısım ise bitki aktivatörleri, gelişim düzenleyiciler, feromonlar, fumigantlar, nematisitler, kükürt ve mineral yağlar gibi çeşitli diğer pestisit gruplarına aittir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2025).

Yıllar Years	Bitki Koruma Ürünü Türleri						Diğerleri (1)
	Toplam	İnsektisit	Fungisit	Herbisit	Akarisit	Rodentisit + Mollussisit	
	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton
2006	45.376	7.628	19.900	6.956	902	3	9.987
2007	48.716	21.046	16.707	6.669	966	51	3.277
2008	38.836	9.251	16.707	6.177	737	351	5.613
2009	37.651	9.914	17.863	5.961	1.533	78	2.302
2010	38.555	7.176	17.396	7.452	1.040	147	5.344
2011	39.534	6.120	17.546	7.407	1.062	421	6.978
2012	42.611	7.264	18.124	7.351	859	247	8.766
2013	39.440	7.741	16.248	7.336	858	129	7.128
2014	39.723	7.586	16.674	7.794	1.513	149	6.007
2015	39.026	8.117	15.984	7.825	1.576	197	5.327
2016	50.054	10.425	20.485	10.025	2.025	259	6.835
2017	54.098	11.436	22.006	11.759	2.452	236	6.209
2018	60.020	13.583	23.047	14.794	2.486	309	5.801
2019	51.297	11.609	19.698	12.644	2.124	264	4.958
2020	53.672	12.347	20.600	13.250	2.200	280	4.995
2021	52.965	11.071	19.098	13.320	2.342	283	6.851
2022	55.374	12.205	19.446	14.553	2.462	298	6.410
2023	57.766	12.326	19.614	15.509	3.104	297	6.916
2024	53.515	13.420	18.145	12.727	2.223	221	6.779

Diğerleri: Bitki Gelişim Düzenleyici ve Aktivatörü, Böcek Cezbedici, Fumigant, Nemasit

Şekil 2. 2 Yıllara göre Türkiye’de Toplam Pestisit Kullanımı (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2025).

Pestisit kullanım miktarı en çok olan bölge 14.776.907 ton ile tarım faaliyetlerinin en yoğun olduğu Akdeniz Bölgesidir. Bu miktar Türkiye’deki pestisit kullanımının yaklaşık %26,68 oranına denk gelmektedir. Bu bölgeyi sıralı olarak 11.164.840 ton ve %20,16’lık kullanım oranı ile Marmara Bölgesi ve 10.729.353 ton ve %19,37 kullanım oranıyla Ege Bölgesi takip etmektedir. Türkiye’de pestisit kullanımının en düşük olduğu bölge Karadeniz Bölgesi’dir. Bu bölgenin ardından sonra en az kullanım sıralandığında Doğu Anadolu Bölgesi, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi gelmektedir (Erdoğan, 2024).

Tarımsal üretim açısından değerlendirildiğinde, Akdeniz Bölgesi Türkiye için son derece önemli bir konumda yer almaktadır. Benzer şekilde, tarım üretim kapasitesi ve çeşitliliği ele alındığında Marmara ve Ege Bölgeleri de ön plana çıkmaktadır. Söz konusu bölgelerde ürün deseninin çeşitliliği, üretim sezonunun uzunluğu, iklim ve toprak açısından elverişlilik, sulama olanaklarının varlığı ve seralarda üretimin yaygınlığı gibi unsurlar tarım faaliyetlerin yoğun olarak yürütülmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca, bu bölgelerin tarımsal ihracat potansiyeli yüksek olup, turizm

faaliyetleri nedeniyle tüketici talebinin fazla olması, pestisit kullanımının da artmasına neden olmaktadır. İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin tahıl üretiminde önemli bir yere sahip olup, bu yönüyle dikkat çekmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi ise GAP Projesi sayesinde gelişen sulama altyapısı ve pamuk gibi endüstriyel ürünlerin yaygın üretimi nedeniyle pestisit kullanımının yüksek olduğu bir diğer bölgedir. Öte yandan, Doğu Anadolu Bölgesi'nin iklimsel koşulları tarımsal üretim açısından sınırlayıcı niteliktedir. Bu nedenle bölgede hayvansal üretim ön planda olup, tarımsal üretim faaliyetleri sınırlı düzeyde gerçekleştiğinden pestisit kullanım oranı da düşüktür. Karadeniz Bölgesi ise Türkiye genelinde pestisit en az kullanıldığı bölge olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, bölgenin dağlık ve engebeli topoğrafyası ile eğimli arazilerde tarım faaliyetlerinin sınırlı olması gibi etmenlere dayanmaktadır. Bununla birlikte, bölge çay, fındık, turunçgiller, tütün, mısır ve kivi gibi birçok önemli tarım ürününün üretildiği bir alan olması bakımından ülke tarımı açısından stratejik bir öneme sahiptir (Erdoğan, 2024).

Çizelge 2. 1 2022 yılında Türkiye'de bölgelere pestisit kullanım miktarları (Erdoğan, 2024).

BÖLGE	Toplam	İnsektisit	Fungisit	Herbisit	Akarisit	Rodentisit/ Molluskisit	Diğerleri
Akdeniz	15.108.367	4.575.180	3.174.957	1.511.131	1.061.751	23.528	4.761.820
Marmara	11.164.840	1.496.441	4.610.663	4.369.853	225.136	60.662	402.085
Ege	10.894.923	2.086.623	5.557.089	2.024.572	591.520	35.714	599.405
İç Anadolu	7.019.240	1.172.547	2.118.780	3.049.473	160.504	147.728	370.208
Güneydoğu Anadolu	5.115.647	1.890.360	870.026	1.767.939	317.337	12.670	257.915
Doğu Anadolu	3.236.591	533.839	322.636	1.030.852	60.195	5.862	1.207.207
Karadeniz	2.834.392	451.150	809.545	1.507.996	45.557	7.079	12.705
Toplam	55.374.000	12.205.000	19.446.000	14.553.000	2.462.000	298.000	6.410.000

Diğerleri: Bitki Gelişim Düzenleyici ve Aktivatörü, Böcek Cezbedici, Fumigant, Nemasit

2022 yılı verilerine göre, tarım ilacı kullanımının en yüksek olduğu ilk altı il; tüm miktarın %7,7'sinin gerçekleştiği Antalya (4.272 ton), %7,6'sının gerçekleştiği Manisa (4.213 ton), %7,2'sinin gerçekleştiği Mersin (3.985 ton), %5,9'unun gerçekleştiği Adana (3.276 ton), %4,1'inin gerçekleştiği Malatya (2.280 ton) ve %3,93'lük oranla Konya (2.178 ton) olarak belirlenmiştir. Bu altı il, toplam bitki koruma ürünü kullanımının %36,44'lük kısmını oluşturmaktadır; yani toplam kullanımın üçte birinden fazlası bu illerde gerçekleşmektedir. Pestisit kullanım miktarının fazlalıkta olduğu bu illerde, tarım üretimi genellikle üzüm, sebze, meyve ve sera faaliyetleri etrafında şekillendiği görülmektedir. Antalya'da portakal, limon, turunç, greyfurt ve mandalina gibi narenciye türlerinin yanı sıra açık alanda sebze üretimi de yoğun olarak yapılmaktadır. Manisa'da başlıca ürünler arasında zeytin, üzüm, kiraz, tütün ve pamuk yer almaktadır. Mersin'de limon, muz, erik, badem, keçiboynuzu ve balkabağı gibi tarım ürünlerinin yanı sıra çeşitli sebze türleri yetiştirilmektedir. Adana'da ise nohut, fasulye, arpa, mercimek, soğan, sarımsak, biber, salatalık, domates, patlıcan, karpuz ve daha pek çok sebze türü üretimi yapılmaktadır. Malatya'da en önemli üretim kayısı ile öne çıkmakla birlikte arpa, buğday, nohut, mercimek, çavdar ve mısır da önemli ürünler arasındadır. Konya ilinde ise başlıca tarımsal ürünler arasında şeker pancarı, buğday, arpa, mısır, patates, ayçiçeği, yonca, fiğ, nohut, kuru fasulye ve sebzeler yer almaktadır (Erdoğan, 2024).

Çizelge 2. 2022 yılında Türkiye'de pestisit kullanımının en çok olduğu iller ve kullanım miktarları (ton) (Erdoğan, 2024).

İL	Toplam	İnsektisit	Fungisit	Herbisit	Akarisit	Rodentisit/ Molluskisit	Diğerleri
Antalya	4.271.889	1.501.142	1.057.804	424.048	568.42	15.498	70.977
Manisa	4.212.532	459.455	3.466.823	190.268	67.482	1.257	27.247
Mersin	3.984.988	1.770.628	482.735	387.902	14.85	16	1.328.857
Adana	3.275.746	511.807	558.244	215.227	106.345	0	1.884.123
Malatya	2.280.103	272.282	1.871.300	99.787	28.818	3.041	4.875
Konya	2.178.455	381.577	604.601	1.133.063	42.557	14.307	2.35

Diğerleri: Bitki Gelişim Düzenleyici ve Aktivatörü, Böcek Cezbedici, Fumigant, Nemasit

Tarımsal üretimde zararlı organizmalarla mücadelede pestisit kullanımının azaltılması amacıyla, Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Dünya genelinde kabul görmüş Entegre Zararlı Yönetimi (EZY) uygulamalarının ülkemizde de benimsenmesi teşvik edilmekte; hasat öncesi yapılan pestisit kontrolleriyle bu süreç desteklenmektedir. Ayrıca kimyasal mücadeleye alternatif olarak biyolojik ve biyoteknik yöntemlerin kullanımı teşvik edilmekte, bu yöntemler çeşitli destek programlarına dahil edilerek yaygınlaştırılmaktadır. Çiftçilere yönelik tarla okulu gibi uygulamalı eğitimlerin yanı sıra, uzaktan eğitim ve bilgilendirme faaliyetlerine de yoğunlaşarak, toplumda ve çiftçilerde bilinç düzeyinin artırılması hedeflenmektedir (Dönmez vd., 2024).

2.1.4. Pestisitlerin sınıflandırılması

Pestisitler birçok şekilde farklı gruplara ayrılmaktadır.

2.1.4.1 Pestisitlerin yapısal özelliklerine göre sınıflandırılması:

Pestisitler genel olarak doğal ve sentetik yapıda olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır.

a) Doğal pestisitler: bitkisel ve mineraller olarak ikiye ayrılırlar.

b) Sentetik pestisitler: inorganik ve organik pestisitler olarak ikiye ayrılırlar (Manap vd.,2023).

2.1.4.2 Pestisitlerin farklı ticari formülasyon şekillerine göre sınıflandırılması:

Pestisitler farklı ticari formülasyon şekillerine göre sınıflandırılması detaylı olarak gösterilmiştir.

-Granüller: Pestisit içeren küçük peletler veya granüller granüler formülasyonları oluşturur. Genellikle, hedef boyunca dağılırlar.

-Islatılabilir Tozlar: Bu pestisit parçacıkları ince toz haline getirilir ve zararsız maddelerle birleştirilir. Uygulamadan önce, bir süspansiyon oluşturmak için su ile birleştirilmeleri amaçlanmıştır. Stabiliteleri ve uzun raf ömrü ile önemlidirler.

-Çözünebilir Tozlar: Çözünebilir tozlar ıslanabilir tozlar gibidir, ancak suda tamamen çözünecek şekilde çerçevenirler.

-Sıvı konsantreleri: Genellikle, bu bileşimler suyla seyreltikten sonra uygulanır. Sıklıkla, emülsifiye edilebilir konsantrasyonlardır.

-Tozlar: Genellikle bir toz aplikatörü vasıtasıyla uygulanırlar. Toz formülasyonları normalde düşük neme sahip bölgelerde veya sıvı kullanımının mümkün olmadığı her yerde kullanılır.

-Yemler: Zararlıları çekmek için tasarlanmıştır ve aktif bileşen böcek ilacı içerir. Karıncalar, hamamböceği ve kemirgenler gibi böcekleri kontrol etmek için sıklıkla kullanılırlar. Yemler jel, macun veya katı blok olarak bulunabilirler.

-Aerosoller: Bu formülasyonlar, uçan böcekleri kontrol etmek için ince bir sprey yayan sıkıştırılmış kaplardır.

-Mikrokapsüllenmiş: Bu pestisitler, aktif bileşeni çevreleyen küçük kapsüllerdir. Kontrollü serbest bırakma sağlarlar ve daha uzun verimlilik için yüzeylere yapışırlar.

-Nano Bazlı Pestisit Formülasyonu: Kontrollü salım mekanizmaları aracılığıyla, nano bazlı pestisit formülasyonunun geliştirilmesi, aktif bileşenlerin yeterli miktarını hassas bir şekilde teslim etmeye çalışırlar (Ahmad vd., 2024).

2.1.4.3 Hedef zararlılar temelinde pestisitlerin sınıflandırılması:

Pestisitler genellikle hedef aldıkları zararlı organizmalara göre sınıflandırılır. Örneğin, insektisitler bitkileri böcek kaynaklı hastalıklardan korumak amacıyla kullanılan kimyasal maddelerdir. Bazı pestisit türleri ise birden fazla zararlı grubuna karşı etkili olacak şekilde formüle edilmiştir.

- Herbisitler: İstenmeyen bitki örtüsünü kontrol etmek için uygulanan kimyasallardır.
- İnsektisitler: Böcekleri öldürmek veya önlemek için kullanılan kimyasallardır.
- Rodentisitler: kemirgenleri öldüren böcek ilaçlarıdır.
- Fungusitler ve Bakterisitler: Mantar öldürücüler ve bakterisitler, mantar ve bakterilerin neden olduğu zararı engeller veya hafifletirler.
- Akarsitler: Hayvanlar ve bitkilerle beslenen akarları öldürür.
- Algisitler: Yosunların büyümesini öldürmek ve önlemek için kullanılan kimyasal maddelerdir.
- Silvisitler: Odunsu bitkilere karşı kullanılırlar.

- Larvisitler: Larvaların büyümesini engellerler.
- Ovisidler: Özellikle böcek yumurtalarını öldürmek için kullanılan maddelerdir.
- Nematositler: Nematodları öldürmek ve bitki parazitleri olarak hareket etmek için kullanılan kimyasallardır.
- Piskisitler: Balıklara karşı etkilidirler.
- Kurutucular: Dokularını kurutarak bitkilere etki ederler.
- Termitisitler: Termitleri yok etmek için özel olarak tasarlanmış kimyasallardır (Ahmad vd., 2024).

2.1.4.3 Pestisitlerin giriş biçimlerine göre sınıflandırılması:

-Sistemik pestisitler: Bitkiler tarafından emilen ve sapsarı, yaprakları, kökleri ve çiçekleri de dahil olmak üzere dokuları boyunca taşınan bir pestisit kategorisidir. Bitkinin dışında devam eden temas pestisitlerinin aksine, sistemik pestisitler bitkinin vasküler sistemi tarafından kullanılır ve dahili olarak dağıtılır. Sistemik böcek öldürücüler bitkiler tarafından emilir ve bitkinin dokularından beslenen böceklere karşı koruma sağlar. Böcekler, tedavi edilen bitkinin bölümlerini tükettiklerinde ve yaralandıklarında veya öldürüldüklerinde sistemik pestisiti yutarlar. Sistemik böcek öldürücüler, bitkinin yüzeyindeki pestisite doğrudan maruz kalmasalar bile kontrol edilebildikleri için, delici emme ağız parçalarına sahip zararlıların aksine esas olarak etkilidir (Ahmad vd., 2024).

-Sistemik olmayan pestisitler: Bu pestisitler, uygulandıktan sonra bitki içinde göç etmeyen veya translokasyon yapmayan pestisitlerdir. Bu pestisitler bitkinin yüzeyinde kalır ve dokuları içinde ne emilir ne de dağılır. Hedef organizmalar ve pestisitler arasındaki temas, sistemik olmayan böcek öldürücüleri belirler. Temas pestisitleri doğrudan bitki yüzeylerine veya zararlılara uygulanır. Zararlılarla temas ederek ve onları ya öldürerek ya da püskürterek çalışırlar. Temas böcek öldürücüler, uygulama sırasında mevcut olan zararlılara karşı etkilidir, ancak uzun süreli koruma sağlamayabilirler (Ahmad vd., 2024).

2.1.4.4 Kimyasal yapılarına göre pestisit gruplarının sınıflandırılması:

- **Organoklorlu pestisitler:** Bu pestisitler, kimyasal yapılarında klor atomlarının varlığı ile karakterize edilir, 1940'lı yıllardan itibaren insektisit olarak yaygın biçimde kullanılmışlardır. Ancak günümüzde bu maddeler, çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemini büyük ölçüde yitirmiştir. Organoklor bileşikleri yüksek toksisiteyi, özellikle gastrointestinal sistemde oluşturdukları etkiler ve güçlü temas toksisitesi ile bilinmektedir. Ayrıca bu bileşikler solunum sistemi ve diğer organlar üzerinde de ciddi zararlar oluşturabilmektedir (Reyes-Calderón vd., 2022).

- **Organik fosforlu pestisitler (Organofosfat):** Küresel ölçekte pestisit tüketiminin yaklaşık %45'ini oluşturan organofosfor bileşikleri, kolay sentezlenebilir olmaları sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu gruba ait bileşiklerin yapısal çeşitliliği zamanla artış göstermiştir. Grubun aktif maddeleri arasında; suda çözünürlük, sıcaklık değişimlerine karşı toksisite düzeyleri, uçuculuk ve çevresel kalıcılık gibi fiziko-kimyasal özellikler açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu çeşitlilik sayesinde, hemen her tarımsal ihtiyaç ve çevresel koşula uygun nitelikte organofosfat bileşiği üretilebilmektedir. Organofosforlu pestisitler; inhalasyon, dermal temas ve oral yolla organizmaya etki edebilirler. Bu böcek öldürücüler orta düzeyde haşere direncine sahip olsalar da biyolojik olarak parçalanabilirler ve kirliliği azaltırlar (Reyes-Calderón vd., 2022).

- **Karbamatlı insektisitler (Karbamatlar):** Karbamatlar, karbamik asit esterlerinden türeyen ve organik fosforlu insektisitlere kıyasla daha küçük bir gruba oluşturan pestisitlerdir. Bu bileşikler, Calabar fasulyesinden elde edilen Neostigmin ya da kimyasal adıyla N, N-dimetil karbamat şeklinde sentezlenmektedir. Etki mekanizmaları, asetilkolinesteraz enzimine bağlanarak bu enzimin inhibisyonu şeklindedir. Ancak organik fosforlu bileşiklerden farklı olarak bu inhibitör etkiyi farklı bir biyokimyasal yolla gerçekleştirirler. Karbamat grubu bileşikler hem temas yoluyla hem de sistemik olarak organizmalar üzerinde toksik etki gösterebilmektedir. İnsanlar üzerinde oluşturdukları toksisite, organofosfatlarla benzerlik göstermekte; fakat enzim düzeylerinin normale dönme süresi karbamatlarda daha kısa olmaktadır (Daş ve Aksoy, 2016).

Günümüzde en yaygın kullanılan pestisit grupları arasında organofosfatlar ve karbamatlar yer almaktadır. Bu kimyasal maddeler, diğer çevresel kirleticiler gibi hem çevre sağlığı hem de ekosistemler üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Özellikle

organoklor grubuna ait pestisitler, yaygın olarak kullanılmaları da çevresel kalıcılık açısından diğer pestisit gruplarına kıyasla çok daha dirençlidir (Reyes-Calderón vd., 2022).

2.1.4.5 Pestisitlerin toksisite düzeyine göre sınıflandırılması

Pestisitlerin toksik etkileri, esas olarak maruz kalınan doz miktarı ve süresi gibi iki temel parametreye dayanmaktadır. Bu bağlamda, pestisitlerin hangi sıklıkta uygulandığı ve organizmaların bu kimyasallara ne ölçüde maruz kaldığına göre, akut ve kronik toksisite olmak üzere iki farklı toksikolojik yanıt gelişebilmektedir (Akashe vd., 2018).

Akut toksisite: İnsan, hayvan ya da bitki organizmalarının tek seferlik ve kısa süreli yüksek dozda bir pestisitle karşılaşması durumunda ortaya çıkan toksik etkiyi ifade etmektedir. Akut toksisitesi yüksek olan bir pestisit, oldukça az dozlarda bile hayati tehlikeye sebep olabilmektedir. Akut toksik etkiler, genellikle oral ya da dermal yollarla alınan maddelerin kısa sürede fizyolojik sistemlerde yol açtığı bozulmalar şeklinde kendini gösterebilmektedir (Akashe vd., 2018).

Kronik toksisite: Uzun zaman süresince tekrarlayan ve düşük dozlarda gerçekleşen pestisit maruziyetinin sonucunda gelişen gecikmeli toksik etki olarak tanımlanmaktadır. Özellikle pestisit kalıntılarının gıda ürünleri, su veya hava yoluyla organizmalara alınması durumunda ya da pestisitlere doğrudan ve sürekli temas hâlinde, organizmalarda kronik toksisiteye bağlı sağlık sorunları meydana gelebilmektedir (Akashe vd., 2018).

Pestisitlerin toksikolojik sınıflandırılmasında dikkate alınan bir diğer önemli parametre LD₅₀ (letal doz) kavramıdır. LD₅₀ değeri, bir pestisit oral ya da dermal yolla organizmaya alınması sonucunda, test edilen popülasyonun %50'sinde ölüm meydana getiren madde miktarını ifade etmektedir. Yani, ortalama öldürücü doz olarak tanımlanan bu değer, kilogram başına miligram cinsinden verilmesi gereken pestisit miktarını ortaya koyar. LD₅₀ değeri azaldıkça pestisit toksik potansiyeli artar ve bu durum, pestisit çevresel ve biyolojik risklerini artırır. Bu nedenle, düşük LD₅₀ değerine sahip pestisitlerin kullanımı sırasında yüksek düzeyde dikkat ve özen gösterilmesi gerekmektedir (Dünya Sağlık Örgütü, 2019).

Çizelge 2. 3 DSÖ Pestisit Sınıflaması (Dünya Sağlık Örgütü, 2019)

DSÖ Sınıflaması	LD 50 (fareler için) (mg/kg vücut ağırlığı)	
	Oral	Dermal
I a son derece tehlikeli	<5	<50
Ib yüksek derece tehlikeli	5-50	50-200
II orta derece tehlikeli	50-2000	200-2000
III hafif tehlikeli	2000 üstü	2000 üstü
U akut tehlike arz etmesi muhtemel değil	5000 veya daha üstü	

2.1.5. Pestisitlerin kullanım alanları

Pestisitler, oldukça geniş bir kullanım yelpazesine sahip olup yalnızca tarımsal faaliyetlerle sınırlı kalmayıp çok sayıda sektörde yaygın biçimde uygulanmaktadır. Tarımsal üretimin yanı sıra, balık yetiştiriciliği, ormancılık, kentsel yeşil alan yönetimi (örneğin parklar, bahçeler, oyun alanları), tütün ve kereste sanayi, hayvancılık, endüstriyel zararlı mücadelesi, inşaat sektörü (duvar kaplama malzemeleri, boyalar, yalıtım ürünleri vb.), sucul ve denizel ortamlarda haşere kontrolü, gıda muhafaza teknolojileri, toplu yaşam alanlarının hijyeninin sağlanması ve evsel uygulamalar gibi farklı disiplinlerde pestisit kullanımı söz konusudur (Tiryaki ve ark., 2010).

2.1.5.1. Tarımsal Uygulamalar

Mevcut veriler, pestisitlerin yaklaşık %75'inin doğrudan tarımsal amaçlarla kullanıldığını göstermektedir. Yüksek verimli ve kaliteli ürün elde edilmesinde pestisit kullanımı, modern tarımsal üretimin vazgeçilmez unsurlarından biri hâline gelmiştir. 1940'lı yıllardan itibaren pestisitler, ürün kayıplarını azaltarak verimliliği artırmada önemli rol oynamaktadır. Nitekim yapılan araştırmalara göre çiftçiler, pestisit uygulamaları sayesinde meyvede %78, sebze %54 ve tahılda %32 oranında verim kaybını önleyebilmektedir (Tudi ve ark., 2021).

2.1.5.2. Tarımsal Olmayan Uygulamalar

Tarımsal alanlar dışındaki pestisit kullanımları da oldukça çeşitlidir. Pestisitler; eğitim kurumları, iş yerleri, büyük ölçekli perakende mağazaları, hastaneler, konaklama

tesisleri, gıda depolama alanları, tiyatrolar ve alışveriş merkezleri gibi insan faaliyetlerinin yoğunlaştığı kentsel alanlarda zararlılarla mücadele amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca golf sahaları ve diğer spor alanlarında çimlerin sağlıklı gelişiminin sürdürülmesi amacıyla uygulamalara başvurulmaktadır. Enerji iletim hatları, kanalizasyon ve benzeri altyapı sistemlerinde, istenmeyen bitki gelişimini baskılamak amacıyla da pestisit kullanımına gidilmektedir. Kara sinek ve sivrisinek gibi vektör organizmaların kontrol altına alınması da pestisitlerin kullanım alanlarından biridir. Bunun yanı sıra; yapışkan, boya, macun ve benzeri yüzey kaplamalarında; tenis kortu gibi dış mekân spor sahalarında yüzeylerin korunması amacıyla pestisit uygulamaları yapılmaktadır. Kozmetik (örneğin sabun ve şampuan), ev temizlik ürünleri, dezenfektanlar ve gıda ambalajları gibi endüstriyel ürünlerde de pestisitler, zararlı kontrolü amacıyla sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, su kanalları, hendekler ve yüzme havuzlarında yosun oluşumunu engellemek, sucul ekosistemlerde bitki gelişimini sınırlamak amacıyla da pestisitlerden yararlanılmaktadır. Küresel düzeyde ise, özellikle sivrisinek kaynaklı hastalıkların, örneğin sıtmanın, yayılımını engellemek ve halk sağlığını korumak amacıyla pestisitlerin sağlık alanındaki kullanımı da önem arz etmektedir. Bununla birlikte, ev içi kullanım esnasında, kapalı ortam koşullarında gerçekleşen pestisit uygulamaları sonucunda çevresel kirlenme oluşabileceği ve bu durumun zehirlenmelere yol açabileceği belirtilmektedir (Tiryaki ve ark., 2010).

2.1.6. Pestisit kullanımının çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri

Pestisitler, yapıları gereği yalnızca hedef organizmalar üzerinde değil, aynı zamanda insanlar ve diğer canlı türleri üzerinde de toksik etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle, söz konusu kimyasalların güvenli koşullarda kullanılması ve çevresel etkilerinin doğru yöntemlerle ortadan kaldırılması büyük önem arz etmektedir. İdeal şartlarda bir pestisit yalnızca hedef organizmaya yönelik etkili olması beklenir; ancak uygulamalar, insan da dahil olmak üzere hedef dışı canlıların da bu zararlardan etkilenebileceğini göstermektedir. Günümüzde tarım teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, gıda güvenliği ve insan sağlığı küresel ölçekte öncelikli bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda, pestisitlerin üretim sürecinde sağladığı faydaların yanı sıra, insan sağlığı ve çevre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler de dikkat çekmektedir. Bu zararların fark edilmesiyle birlikte, pek çok ülke pestisit kullanımına yönelik çeşitli yasal ve teknik düzenlemeler geliştirme yoluna gitmiştir (Yılmaz vd., 2024).

2.1.6.1 Pestisit maruziyeti ve insan sağlığı

Pestisitlere maruz kalma, onu çeşitli zararlı sağlık sonuçları ve hastalıklarla ilişkilendiren artan veriler nedeniyle büyük bir halk sağlığı sorunu olarak ortaya çıkmıştır. Pestisitler sadece kanser gibi yaşamı tehdit eden hastalıklarla değil, aynı zamanda tedavi edilmezse ölümcül olabilecek ve bir bireyin yaşam kalitesini tehlikeye atan çeşitli diğer bozukluklarla da ilişkilidir. Çalışmalar, pestisitlerle temas ile nörolojik hastalıklar, solunum yolu rahatsızlıkları, üreme sağlığı ile ilgili zorluklar ve hatta belirli kanser türleri gibi bir dizi sağlık sorunu arasında bağlantılar olduğunu göstermiştir (Kumar vd.,2023).

Ana maruz kalma yolları aşağıdaki şekildedir.

Solumum: Uygulama sırasında veya havadaki kalıntılardan pestisit aerosollerini, buharlarını veya tozlarını solumak.

Deri teması: Özellikle tarım işçileri için pestisitlerle doğrudan cilt teması.

Ağız yolu ile: Kalıntılı gıdalar, su tüketmek veya uygunsuz depolama nedeniyle kazara yutması.

Sağlık etkileri aşağıdaki şekildedir.

Akut etkiler: Yüksek dozlara kısa süreli maruz kalma şunlara neden olabilir: cilt ve göz tahrişi, baş ağrısı ve dönmesi ve mide bulantısı, solunum sorunları, şiddetli vakalar nöbetlere, komaya veya ölüme neden olabilir (Rodrigues vd., 2025).

Kronik etkiler: Düşük seviyelerde bile uzun süreli maruz kalma şunlara yol açabilir:

-Kanser: çeşitli perstisitlerin maruziyeti hem çocuklarda hem de yetişkinlerde lösemi, Burkitt lenfoma, nötrofilom, Wilm tümörü, Hodgkin dışı lenfoma, yumuşak doku sarkomu, Sindirim organı kanseri, Solunum kanseri, Meme, Erkek ve Kadın genital organ kanseri dahil olmak üzere çeşitli kanser riskinin artmasıyla bağlantılıdır. (IARC,2024).

- Nörolojik bozukluklar (sinir sistemi): Bilişsel bozukluklar, Alzheimer ve Parkinson gibi hastalıklarla ilişkilidir (Sheakhar vd., 2024)

-Solunum problemleri: Astım, Kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAİ)

-Üreme ve gelişim sorunları: Potansiyel etkiler kısırılık, düşükler ve doğuştan gelen kusurlardır. (Sheakhar vd., 2024)

- Endokrin bozulma: Vücut ağırlığı artışı, yağ-glikoz homeostazının bozulması, insülin direnci ve diyabet (Zhao vd.,2023)

2.1.6.2 Pestisit maruziyeti ve çevre sağlığı

Pestisitlerin çevre sağlığı üzerindeki etkilerinin; hava, su ve toprak olmak üzere üç ana başlık altında incelenmesi uygun bir yaklaşım olacaktır.

Hava, pestisit partiküllerini uzun mesafelere taşıyabilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, pestisitlerin geniş alanlara yayılmasına ve çeşitli ortamlara sürüklenmesine neden olmaktadır. Kontrolsüz şekilde atmosfere karışan pestisitler; su kaynaklarına, yerleşim alanlarına ve yeşil bölgelere ulaşarak, başta yabani yaşam ve hassas bitki türleri olmak üzere birçok ekosistem bileşenine zarar verebilmektedir. Bu nedenle uçucu özellik taşımayan pestisit formülasyonlarının tercih edilmesi çevresel açıdan daha güvenli bir uygulama olacaktır. Pestisitlerin uygulandığı bölgelerde, kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak rüzgâr ve yağmur gibi çevresel faktörler, bu maddelerin başka alanlara taşınmasına ve dolayısıyla çevre sağlığını tehdit eden durumların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bazı pestisitler buharlaşarak atmosfere karışmakta ve burada kalıcı toksik maddelerin birikimine neden olmaktadır. Diğer bazı pestisitler ise fotokimyasal süreçler sonucunda toksik etkisi olmayan bileşiklere dönüşebilmektedir. Pestisitlerin bir bölümü ise doğrudan toprakta tutulmakta ve burada kimyasal ya da mikrobiyolojik parçalanma reaksiyonları ile çevresel kirlenmeye sebebiyet vermektedir. Yağmur, kar ve sel suları aracılığıyla bu maddeler topraktan taşınarak göl, nehir ve deniz gibi su kaynaklarını kirletebilmektedir. Tarımsal üretimde pestisitlerin yoğun kullanımı; hava, toprak ve su ekosistemlerinin zamanla kirlenmesine neden olmakta, bu durum doğal besin zincirinde yer alan tüm canlılar için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Özdemir ve Kiraz, 2022).

2.1.6.3 Pestisit maruziyeti ve hayvan sağlığı

Zararlılarla mücadelede kullanılan pestisitlerin aşırı ve bilinçsiz tüketimi, doğal düşmanlar olarak bilinen faydalı böcekler ile su ve kara ekosistemlerinde yaşayan diğer canlı türlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu durum, ekosistem içindeki doğal dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Hayvanların pestisitlere maruz kalması; nörotoksisite, endokrin sistem bozuklukları, karaciğer ve böbrek hasarı, kanser, üreme bozuklukları (örneğin sperm anormallikleri), doğurganlıkta azalma, fetal büyüme geriliği, doğum anomalileri ya da düşük gibi gelişimsel sorunlar ile ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, pestisitlerin biyolojik türler üzerindeki tehdidine de

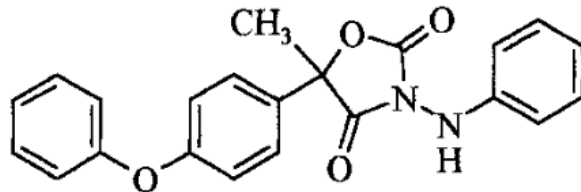
dikkat çekilmiştir. Nitekim Avrupa’da yapılan araştırmalara göre, pestisit kullanımının böcek biyokütlesinde %70, kuş türlerinde %50 ve bal arısı popülasyonlarında ise %30 oranında bir azalmaya yol açtığı bildirilmiştir (Yılmaz vd., 2024).

2.2. Famoksadon (Famoxadone)

Famoksadon (3-anilino-5-metil-5-(4-fenoksifenil)-1,3-oksazolidin-2,4-dion), DuPont tarafından yakın zamanda Famoxate ticari adı altında ticarileştirilen yeni bir tarımsal fungusittir. Famoksadon, üzüm, tahıl, domates, patates ve diğer mahsulleri enfekte eden Ascomycete, Basidiomycete ve Oomycete sınıflarındaki bitki patojenlerine karşı mükemmel kontrol sağlayan yeni bir oksazolidinon fungusit sınıfının üyesidir (Xiao vd., 2024).

Famoksadon meyvelere, sebzelere ve tahıllara yaygın olarak uygulanır ve son yıllarda Corteva Agriscience Co., Ltd. için en çok satan beş fungusit arasında yer almıştır. Famoksadon'un yaygın olarak uygulanması, hem çevrede hem de tarım ürünlerinde yaygın kalıntılara neden olmuştur. Famoksadon konsantrasyonu, uygulamadan sonra suda 912 ila 1916 µg/L ve toprakta 1916 ila 2045 µg/kg arasında değişmektedir. Üzümlerde , domateslerde, salatalıklarda, Çin lahanalarında ve diğer mahsullerde famoksadon kalıntıları tespit edilmiştir. Bazı bölgelerde sebze konsantrasyonu maksimum kalıntı sınırını aşmıştır. Özellikle, son yıllarda insan serumunda 1,45 ila 2,60 ng/mL arasında değişen konsantrasyonlarda famoksadon tespit edilmiştir. Bu nedenle, famoksadon maruziyetinin neden olduğu insan sağlığı riskleri göz ardı edilemez (Xiao vd., 2024).

EFSA’ ya göre Famoksadon’un mevcut kabul edilebilir günlük alımı (ADI) günde 0,006 mg/kg ve akut referans dozu (ARfD) günde 0,1 mg/kg şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca domateste belirlenen mevcut maksimum kalıntı limitleri (MRL) 2 mg/kg’dır (European Food Safety Authority, 2023).



Şekil 2. 3 Famoksadon’ un kimyasal yapısı (Xiao vd., 2024).

2.3. Biyosensörler

Sensör teknolojisi, modern tıbbi cihazlarda çok sayıda parametrenin düşük maliyetli, güvenilir ve etkin bir şekilde izlenmesini mümkün kılan temel bileşenlerden biridir. Biyosensörler, üretim süreçlerindeki kolaylıkları, ölçeklenebilirlikleri ve yüksek verimlilikleri sayesinde önemli bir uygulama potansiyeline sahiptir. Günümüzde biyosensörlerin, başta diyabet, kardiyovasküler hastalıklar ve kanser olmak üzere çeşitli hastalıkların tanı, izlem ve ayırt edilmesinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Turner, 2013).

Sensörler, buldukları ortamda meydana gelen değişimleri algılayarak, bu verileri bilgisayar gibi elektronik sistemlere ileten cihazlardır. Sensörler; moleküler tanıma sistemi (reseptör), fizikokimyasal dönüştürücü ve sinyal işlemcisi olmak üzere 3 bölümden meydana gelmektedir. Sensör yapısında yer alan reseptör bir biyolojik öge olduğunda, bu tür cihazlar “biyosensör” olarak adlandırılır (Turner, 2013).

“Biyosensörler, belirli bir maddenin (analit) miktarını belirlemek için biyolojik bir tanıma elemanı ile bu bilgiyi ölçülebilir bir sinyale çeviren bir dönüştürücünün birleşiminden oluşan ölçüm cihazıdır” şeklinde de tanımlanabilirler. Potansiyel kullanımlar, tıbbi teşhisten ilaç keşfi, gıda güvenliği, süreç kontrolü ve çevresel izlemeye, savunma ve güvenlik uygulamalarına kadar akla gelebilecek hemen hemen her analitik görevi kapsamaktadır (Justino vd., 2010).

Biyosensörün temel konsepti ilk olarak Leyland C. tarafından açıklanmıştır. Clark oksijen elektrodunun daha önceki icadı üzerine dayanarak, oksijen veya hidrojen peroksitin elektrokimyasal tespitinin, uygun immobilize edilmiş enzimlerin dahil edilmesiyle çok çeşitli biyoanalitik cihazlar için temel olarak kullanılabilmesini gerçekleştirmiştir. Klasik örnek, basit bir platin elektrotu diyabetli insanlardan alınan insan örneklerinde glikozun tespiti için güçlü bir analitik cihaza dönüştüren immobilize edilmiş glukoz oksidaz (GOx) idi (Turner, 2013).

Biyosensörler; biyoreseptör, transducer (sinyal dönüştürücü) ve elektronik kısım olmak üzere 3 ana bileşimden meydana gelmektedir (Bhalla vd., 2016).

-Analit: Biyosensörlerde saptanması hedeflenen maddeye denir. Örnek olarak bir sensör glikozu ölçmek amacıyla üretildiyse, glikoz bu sistemin analiz etmeye çalıştığı analittir (Bhalla vd., 2016).

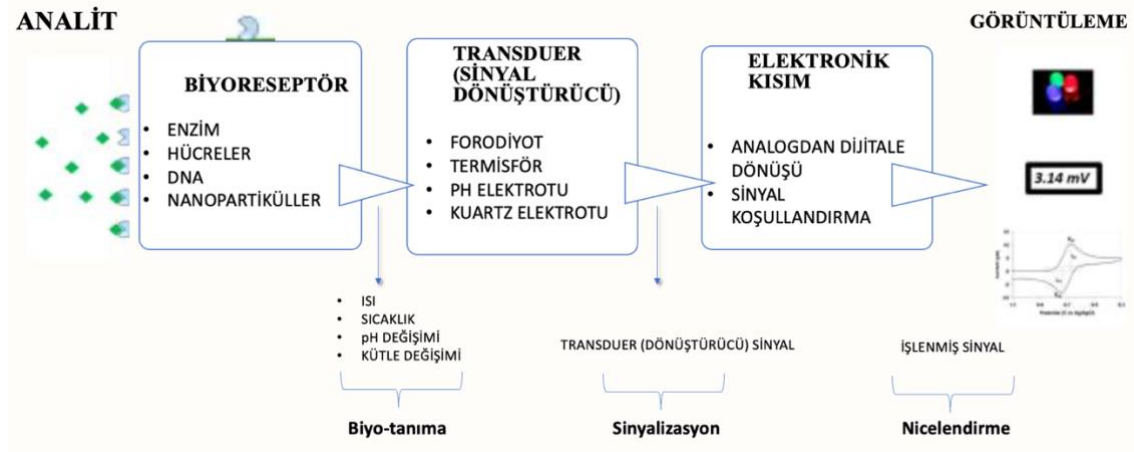
-Biyoreseptör: Analiti tanıma görevini üstlenen özel moleküllere biyoreseptör adı verilir. Bunlar genellikle enzimler, hücreler, antikolar veya DNA gibi biyolojik

yapılar olabilir. Biyoreseptör, analitle etkileşime girdiğinde bu temas bir sinyal üretimine yol açar. Bu sürece biyo-tanıma denir ve genellikle ışık, sıcaklık, pH gibi fiziksel veya kimyasal değişimlerle kendini gösterir (Bhalla vd., 2016).

-Dönüştürücü: Bu bileşen, biyo-tanıma sonucu oluşan değişimi ölçülebilir bir sinyale çevirir. Yani biyosensörün tanıdığı maddeye verdiği tepkiyi, elektriksel ya da optik bir sinyale dönüştürür. Bu dönüşüm, sinyalizasyon süreci olarak da adlandırılır. Dönüştürücünün ürettiği sinyalin şiddeti genellikle analit miktarına bağlıdır (Bhalla vd., 2016).

-Elektronik: Dönüştürücünden gelen sinyali kaydetme ve onu kullanıcıya sunmak üzere hazırlayan bölümdür. Bu kısım, sinyalin dijitalleştirilmesini, güçlendirilmesini (amplifikasyon) ve uygun forma getirilmesini sağlayan elektronik devrelerden oluşur. Sonuçta işlenen veri, ekrana aktarılır (Bhalla vd., 2016).

-Ekran: Elde edilen sinyallerin kullanıcıya sunulmasını sağlayan sistemdir. Bu, genellikle grafik ekranlar, dijital göstergeler ya da çıktı üreten yazıcılar şeklinde olabilir. Ekran, kullanıcıya bilgiyi anlaşılır biçimde sunar ve görsel ya da sayısal şekilde sonuçlar gösterebilir (Bhalla vd., 2016).



Şekil 2. 4 Biyosensörlerin şematik çalışma prensibi gösterimi (Bhalla vd., 2016)

2.3.1. Biyosensörlerinin karakteristik özellikleri

Biyosensörler, belirli statik ve dinamik parametreler doğrultusunda işlev gören algılama sistemleridir. Bu parametrelerin uygun biçimde yapılandırılması, cihazın genel performansını ve uygulama başarımını doğrudan belirlemektedir (Bhalla vd., 2016).

-Seçicilik: Bir biyosensörün hedef analiti, matris içindeki benzer yapılar ya da parazit edici bileşenlerden ayırt edebilme kapasitesini ifade eder.

Bu özellik, biyosensörün sadece spesifik bir biyolojik etkileşime yanıt vermesini sağlar. Örneğin, bir antijenin yalnızca ilgili antikor ile seçici olarak etkileşime girmesi, yüksek düzeyde seçiciliğin göstergesidir. Seçicilik, biyosensörün doğruluk ve güvenilirliğini belirleyen temel kriterlerden biridir (Bhalla vd., 2016).

-Tekrarlanabilirlik: Biyosensörün aynı deneysel koşullar altında gerçekleştirilen çoklu ölçümler sonucunda tutarlı ve benzer çıktılar üretebilme yeteneğidir. Bu özellik, sistemin ölçümsel güvenilirliğini destekleyen temel bir parametredir. Dönüştürücülerin stabilitesi, sinyal üretimindeki doğruluk ve elektronik bileşenlerin keskinliği ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek tekrarlanabilirlik, özellikle nicel analizlerin geçerliliğini artırır ve istatistiksel olarak güvenli sonuçlara ulaşılmasını sağlar (Bhalla vd., 2016).

-Kararlılık (İstikrar): Biyosensörün zamanla ve çevresel değişkenliklere rağmen işlevselliğini sürdürebilme derecesidir. Sıcaklık, nem, pH gibi çevresel parametrelerdeki dalgalanmalar, sensörün yanıtlarında sapmalara neden olabilir. Bu tür dışsal etkiler karşısında biyosensörün sinyal bütünlüğünü koruyabilmesi, özellikle uzun vadeli izleme ve kesintisiz ölçüm gerektiren uygulamalarda büyük önem taşır. Bu bağlamda kararlılık, biyosensör performansının sürekliliğini sağlayan temel faktörlerden biridir (Bhalla vd., 2016).

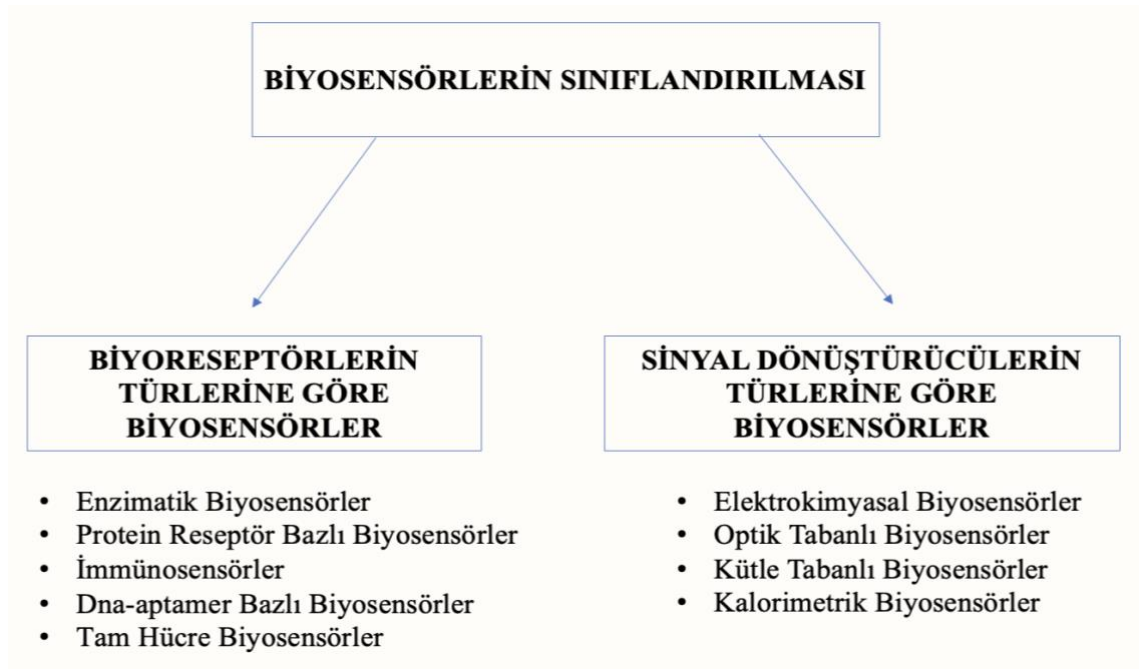
-Hassasiyet (Duyarlılık): Biyosensörün algılayabileceği en düşük analit düzeyini ifade eder ve genellikle “limit of detection” (LOD) değeri ile tanımlanır. Bu özellik, özellikle klinik ve çevresel analizlerde düşük konsantrasyonlardaki bileşenlerin güvenilir biçimde tespit edilmesinde kritik rol oynar. Örneğin, kandaki prostata özgü antijen (PSA) seviyelerinin nanogram/mililitre (ng/mL) düzeyinde belirlenebilmesi, prostat kanseri tanısında önemli bir göstergedir. Dolayısıyla, biyosensörün yüksek hassasiyete sahip olması, erken tanı ve izlem açısından vazgeçilmezdir (Bhalla vd., 2016).

-Doğrusallık: Biyosensörün farklı analit konsantrasyonlarına karşılık verdiği yanıtın, matematiksel olarak doğrusal bir ilişki (örneğin, $y = mc$) sergileme derecesini ifade eder. Bu özellik, analit miktarının artışına paralel olarak sensörün ölçüm çıktısının da tutarlı ve orantılı bir şekilde değişmesini gerektirir. Burada c analit konsantrasyonunu, y ölçülen yanıtı ve m ise sensörün yanıt verme duyarlılığını temsil eder. Bir biyosensörün doğrusallığı, hem çözünürlük kapasitesi hem de belirli analit konsantrasyonlarını doğru şekilde ayırt edebilme becerisiyle ilişkilidir. Bu bağlamda çözünürlük, sensörün ölçüm yanıtında anlamlı bir değişiklik oluşturabilmesi için gerekli

olan en küçük analit konsantrasyonu farkını tanımlar. Dolayısıyla, yüksek doğrusallık ve çözünürlük, biyosensörün hassas ve güvenilir ölçümler gerçekleştirebilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Bhalla vd., 2016).

2.3.2. Biyosensör çeşitleri

Biyosensörler, genellikle kullanılan biyoreseptör ve sinyal dönüştürücünün yapısına göre sınıflandırılırlar (Alhadram, 2018).



Şekil 2. 5 Biyosensörlerin sınıflandırılması (Alhadram, 2018).

Biyoreseptörlerin türlerine göre biyosensörler: 5'e ayrılır.

1.Enzimatik biyosensörler: Biyosensör teknolojisinde yaygın olarak tercih edilen analitik enzimler arasında oksidoredüktazlar ve hidrolazlar öne çıkmaktadır. Enzim temelli biyosensör sistemlerinde, genellikle immobilize edilmiş (sabitlenmiş) enzimlerin katalizlediği biyokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan veya tüketilen bazı analizler —örneğin oksijen (O₂), karbondioksit (CO₂) ya da çeşitli iyonlar— uygun bir transdüser aracılığıyla elektriksel ya da optik sinyallere dönüştürülerek ölçülebilir hale getirilir. Bu tür sistemlerin tipik bir örneği, biyotanıma elemanı olarak glikoz oksidaz enzimi kullanılan ve kan şekeri düzeylerini saptamak amacıyla geliştirilen glikoz biyosensörleridir (Alhadram, 2018).

2. Protein reseptör bazlı biyosensörler: Protein reseptörlerine dayalı biyosensörler, hücre zarında doğal olarak bulunan reseptör proteinlerinin biyotanıma elemanı olarak işlev görmesine dayanan gelişmiş sistemlerdir. Bu reseptörler, hedef molekülün özgül bağlanması sonucunda sinyal iletimini başlatarak biyokimyasal bir yanıt oluşturur. Sinyal iletimi iki temel mekanizma üzerinden gerçekleşebilir: Metabotropik reseptörler, ligand bağlanmasını takiben hücre içi ikincil haberci sistemlerini aktive ederek enzimatik yanıtları başlatırken; iyonotropik reseptörler, doğrudan iyon kanallarını açarak hücre zarından iyon geçişine olanak tanır. Bu tür biyosensörler, tek bir analit molekülünü yüksek seçicilikle ve hızlı biçimde tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Etiketli ya da etiketsiz tespit yöntemlerine uyarlanabilir yapıları sayesinde, özellikle taşınabilir analiz cihazlarında kullanılmaya elverişlidir. Protein reseptör temelli biyosensörler, hassasiyet, özgüllük ve gerçek zamanlı izleme avantajlarıyla başta biyomedikal tanı, farmasötik araştırmalar ve çevresel analizler olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır (Misawa ve Takeuchi, 2018).

3. İmmünosensörler: İmmünosensörler, biyolojik tanıma unsurunu antijen-antikor etkileşimleri üzerine kuran özel bir biyosensör sınıfıdır. Bu sensörler, antijen ile antikor arasındaki yüksek özgülüğe dayalı doğal tanıma mekanizması sayesinde, hedef bileşiğin önceden saflaştırılmasına gerek duymadan tespit edilmesini mümkün kılar. Bu sensörlerin en dikkat çeken yönlerinden biri, tanıma hassasiyetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Ayrıca, modern biyoteknolojik yaklaşımlar kullanılarak geliştirilen rekombinant antikorlar aracılığıyla bu sistemlerin özgüllük ve bağlanma kapasitesi daha da iyileştirilebilmektedir. Bu sayede, immünosensörler sadece güvenilir ölçüm sunmakla kalmaz, aynı zamanda çok düşük konsantrasyonlardaki analitlerin bile tespitine olanak tanır. Yüksek seçicilik, duyarlılık ve esnek antikor mühendisliği imkânları sayesinde immünosensörler, özellikle tıbbi tanı, çevresel kirleticilerin izlenmesi ve gıda güvenliği gibi hassasiyet gerektiren uygulama alanlarında büyük önem taşımaktadır (Alhadram, 2018).

4. DNA-aptamer tabanlı biyosensörler: DNA aptamerlerine dayalı biyosensör teknolojileri, yüksek termal ve kimyasal stabiliteleri, moleküler hedeflere karşı gösterdikleri üstün özgüllük ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle, klasik antijen-antikor temelli biyotanıma sistemlerine işlevsel bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Aptamerler, belirli hedef moleküllere yüksek afiniteyle bağlanabilen, sentetik olarak üretilen kısa oligonükleotid zincirleridir ve in vitro seçim süreci olan SELEX

(Systematic Evolution of Ligands by Exponential Enrichment) yöntemi ile elde edilmektedir. Bu moleküler tanıma elemanlarının biyosensör platformlarına entegre edilmesi, yalnızca antikor tabanlı sistemlerde karşılaşılan sınırlılıkların aşılmasını sağlamakla kalmamış; aynı zamanda daha sade, hızlı ve maliyet etkin analiz protokollerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır (Alhadram, 2018).

5. Tam hücre biyosensörleri: Genetik olarak modifiye edilmiş mikrobiyal hücrelere dayanan tam hücre biyosensörleri, çevresel ve biyolojik örneklerdeki kimyasal bileşimlerin, toksik ajanların, mutajenik ve kanserojen bileşiklerin tespitinde etkili bir biyoteknolojik araç olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde hem prokaryotik hem de ökaryotik hücreler, hedef bileşiğe maruz kaldıklarında belirli bir biyolojik yanıt üretecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede analiz, gerçek zamanlı ve düşük maliyetli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tam hücre biyosensörleri yalnızca belirli bir kimyasalın varlığını veya yokluğunu göstermekle kalmaz; aynı zamanda söz konusu maddenin toksik veya mutajenik etkisini ortaya çıkarabilecek, ancak hücre ölümüne yol açmayacak düzeydeki alt eşik konsantrasyonlarını da yüksek hassasiyetle ölçebilme kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde çevre izleme, toksisite değerlendirme ve biyogüvenlik uygulamalarında önemli bir yer edinmişlerdir (Alhadram, 2018).

Biyosensörler, sinyal dönüştürücülerin türlerine göre 4 gruba ayrılmaktadırlar.

1. Elektrokimyasal Biyosensörler: Bu tip sensörler kolay taşınabilir olmakla birlikte maliyet olarak uygun, son derece hassas ve modern mikrofabrikasyon teknolojileriyle uyumludur. Günümüzde en yaygın kullanılan biyosensör türüdür (Alhadram, 2018).

2. Optik tabanlı Biyosensörler: Elektrokimyasal tabanlı sistemlerden sonra en yaygın biyosensörler optik sensörlerdir. Bunlar yüksek tespit hızı, hassasiyet, sağlamlık ve birden fazla analiti tespit etme yetenekleri ile karakterize edilir. Biyosensör yapımında genellikle kullanılan optik tekniklere bir örnek olan yüzey plazmon rezonansı (SPR), işaretlenmiş moleküllere gerek olmadan bir kimyasalın varlığını saptayabilmektedir (Alhadram, 2018).

3. Kütle Tabanlı Biyosensörler: Bu tür biyosensör sistemleri, sıvı, vakum ya da gaz ortamlarında anlık izleme imkânı sunmalarıyla dikkat çeker. Bu sensörler, yüzeye bağlanan hedef moleküllerin kütle değişimlerini algılayarak sinyale dönüştürür. Ancak bu sınıftaki sensörlerin çoğu, sinyal iletiminde piezoelektrik materyaller kullandığı için sınırlı bir hassasiyet aralığına sahiptir ve bu durum, yüzey plazmon rezonansı (SPR) gibi daha yüksek duyarlılığa sahip yöntemlerle karşılaştırıldığında, uygulama sıklığını

azaltan bir dezavantaj olarak öne çıkar. Mikrokantilever tabanlı biyosensörler, bu gruba ait önemli örneklerden biridir ve hedef molekülün bağlanmasıyla oluşan mekanik sapmayı tespit ederek analiz gerçekleştirir (Alhadram, 2018).

4. Kalorimetrik Biyosensörler: Bu tür biyosensörler, biyokimyasal reaksiyonlar sırasında açığa çıkan ısıyı ölçerek analit tespiti yapan sistemlerdir. Özellikle ekzotermik enzimatik reaksiyonlarda oluşan ısı değişimleri, hedef bileşiğin konsantrasyonuna doğrudan orantılı olarak ölçülebilir. Bu tür biyosensörler, yüksek stabiliteye sahip olmaları ve herhangi bir işaretleme gerektirmeden doğrudan ölçüm yapılabilmesine olanak tanımaları nedeniyle, özellikle klinik tanı süreçlerinde ve endüstriyel üretim hattı kontrollerinde tercih edilmektedir (Alhadram, 2018).

2.3.3. Yüzey plazmon rezonans sensörü (SPR)

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR), polarize ışık bir metal ve dielektrik bir malzeme arasındaki ara yüzde elektronlarla etkileşime girdiğinde meydana gelen ve yüzey plazmonlarının (SP'ler) oluşumuna neden olan elektronların tutarlı salınımları ile sonuçlanan bir optik etkidir (Duan vd.,2021). Bu etkileşim, metal-dielektrik ara yüz boyunca elektromanyetik bir dalganın yayılmasına yol açar. SPR, metal yüzeye yakın kırılma indeksindeki (RI) değişikliklere karşı oldukça hassastır, bu da onu etiketlere ihtiyaç duymadan moleküler etkileşimleri gerçek zamanlı olarak tespit etmek için değerli bir yöntem haline getirir (Butt, 2025). SPR deneylerinde, polarize ışık, rezonans kriterlerini karşılayan koşullar altında genellikle altın (Au) olan ince bir metal filme yönlendirilir. Belirli bir açıda veya dalga boyunda, gelen fotonların enerjisi, SP'leri uyarmak için gereken enerjiyle hizalanır ve yansıyan ışığın yoğunluğunda bir düşüşe neden olur. Bu rezonans, çevredeki ortamın RI'sindeki değişikliklere karşı oldukça hassastır. Bir molekül metal yüzeye sabitlenmiş bir liganda bağlandığında, yerel kırılma indeksi değişir ve rezonans açısında veya dalga boyunda bir kaymaya neden olur. SPR, bu kaymaları gözlemleyerek, bağlanma afiniteleri, kinetik ve konsantrasyonlar dahil olmak üzere biyomoleküler etkileşimlerin hassas bir şekilde ölçülmesine izin verir (Caucheteur vd.,2015).

Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) teknolojisi, reaksiyon süreçlerini yüksek hassasiyet ve etiket kullanımına ihtiyaç duymadan, gerçek zamanlı olarak izleyebilme imkânı sunmaktadır. Bu nitelikleri doğrultusunda moleküler biyoloji, analitik kimya, tarımsal ürün denetimi, ekosistem takibi, farmasötik araştırmalar, klinik teşhis

teknolojileri ve biyoproses mühendisliği gibi çok çeşitli disiplinlerde yaygın kullanım potansiyeli taşımaktadır. Özellikle, hızlı yanıt süresi ve yüksek özgüllük gerektiren tıbbi tanı uygulamalarında, biyosensörlerin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. SPR teknolojisi, biyolojik örnek ihtiyacını azaltarak etiketsiz analiz yöntemlerinin etkin bir biçimde uygulanmasına olanak tanımaktadır. Gıda güvenliği kapsamında ise toksinler, patojenler, farmasötik kalıntılar ve gıda katkı maddelerinin tespitinde etkili bir analiz yöntemi olarak kullanılmaktadır (Cemek vd., 2021).

Gıda ürünlerinin güvenliğini ve kalitesini sağlamak, SPR biyosensörlerinin kritik uygulamasıdır. Bu cihazlar, gıda matrislerindeki alerjenleri, kirleticileri ve bozulma organizmalarını tespit ederek geleneksel yöntemleri aşan hızlı ve doğru testler sunar. Örneğin, SPR işlenmiş gıdalardaki yer fıstığı proteinlerinin eser seviyelerini tanımlayabilir veya bozulabilir maddelerdeki bakteriyel kontaminasyonu izleyebilir. Bu gerçek zamanlı izleme, gıda kaynaklı hastalıkların önlenmesine yardımcı olur ve güvenlik standartlarına uyumu sağlar, böylece tüketicileri korur ve gıda endüstrisindeki ekonomik kayıpları azaltır. Yüzey plazmon rezonansı (SPR) temelli biyosensörler, süt, şarap ve meyve suyu gibi sıvı gıdalarda bulunan bakteriyel biyobelirteçler ya da kontaminantları herhangi bir ön işleme gerek kalmaksızın doğrudan algılayabilmektedir. Öte yandan, katı gıda örneklerinin analizi, farklı bir yaklaşım gerektirir; bu tür örneklerde, plazmonik bir yüzeye doğrudan numune yerleştirilerek ya da gıda yüzeyine metal nanopartiküller uygulanarak, yüzey destekli raman saçılımı (SERS), yüzey geliştirilmiş floresans (SEF) veya lokalize yüzey plazmon rezonansı (LSPR) gibi optik teknikler aracılığıyla hedef bileşenlerin tespiti sağlanmaktadır (Butt,2025).

2.3.4. Gıda güvenliği ve biyosensör kullanımı

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), güvenli gıdaların toksik olmayan ve zararsız olmaması gerektiğini açıkça tanımlamıştır. Gıda güvenliği, özellikle gelişmekte olan ülkelerde insan sağlığı için her zaman büyük bir küresel zorluk olmaya devam etmektedir (Lv vd.,2018).

Farklı gıda ürünlerinin küresel ölçekte taşınarak geniş tüketici kitlelerine ulaştırılması, bireylerin çeşitli beslenme kültürlerini deneyimlemelerine olanak tanırken; aynı zamanda gıda güvenliğine ilişkin biyolojik, kimyasal ve fiziksel risklerin ortaya çıkmasına da zemin hazırlamaktadır. Çoğu gıdanın karmaşıklığı, bunların geleneksel mikrobiyolojik tekniklerle analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Şu anda, mikrobiyal

kontrol için çoğunlukla plaka sayım yöntemleri ve polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) kullanılırken, gıdaların kimyasal kontrolü için gaz kromatografisi ve yüksek basınçlı sıvı kromatografisi kullanılmaktadır. Tüm bu yöntemlerin eğitimli personel gereksinimi, maliyet ve zaman tüketimi gibi bazı sorunları vardır. Plaka sayım yöntemlerinin sonuç vermesi 7 güne kadar sürebilir (zenginleştirme adımından suş tanımlama testine kadar), bu da raf ömrü kısa olan gıdalar için çok uzun bir süredir. PCR yöntemleri analiz süresini 24 saate-48 saate düşürür, ancak DNA polimerazını inhibe edebilen ve yanlış negatif sonuçlar üretebilen karmaşık gıda matrisi bileşiklerine karşı hassas olabilmektedir (Balbinot vd.,2021).

Gıda kalitesinin ve güvenliğinin izlenmesinde kullanılan enstrümantal analiz yöntemleri, altın standartlar arasında yer alsada da kalite parametrelerini ve potansiyel tehlikeleri hızlı ve etkin şekilde belirleyebilecek tamamlayıcı tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda fotonik tabanlı yenilikçi gelişmelerin hız kazanması, optik ve mikro akışkan sistemlerin entegrasyonu ile biyosensör sistemlerinin geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Mikroçip tabanlı teknolojiler ve biyoteknolojiye odaklı yeni nesil yaklaşımlar sayesinde, gıda kalitesinin değerlendirilmesi ve güvenlik analizleri dâhil olmak üzere birçok alanda kullanılabilecek, kimyasal sensörler ve biyosensörlerin geliştirilmesi yönünde önemli adımlar atılmıştır (Narsaiah vd., 2012).

Optik biyosensörler, kullanım kolaylığı ve az maliyetli olmaları sebebiyle güvenilir gıda tespiti uygulamalarında en yaygın tercih edilen cihazlar arasında yer almaktadır. Minimum örnek hacmi ile karmaşık gıda matrislerinde bulunan analizleri tespit edebilme yetenekleri, bu cihazlara olan ilgiyi artırmaktadır. Bu bağlamda, optik biyosensörlerin en yaygın türlerinden biri olan Yüzey Plazmon Rezonansı (SPR) biyosensörleri, yüksek duyarlılığa sahip sinyal dönüştürücü yapıları sayesinde, karmaşık matrislerde bulunan hedef bileşenleri doğrudan ve seçici biçimde algılayarak üstün analitik başarı sağlamaktadır (Balbinot vd.,2021).

2.4. Moleküler Baskılama Teknolojisi

Moleküler baskı teknolojisi (MIT), sentetik polimerlerden türetilen belirli bir hedef molekül için yapay reseptörlerin hazırlanmasına yönelik bir yöntemdir. Moleküler olarak damgalı polimerlerin (MIP'ler) sentezlenmesinde kullanılan teknik, hedeflenen molekülün tam yapısına, boyutlarına ve fonksiyonel gruplarına uygun şekilde eşleşen

boşlukların geliştirilmesine neden olur. Sonuç olarak, bu MIP'ler hedef molekülleri spesifik olarak tanımlayabilir (Bedair vd., 2025).

Doğal reseptörlerin işlevsel özelliklerini taklit eden moleküler baskılanmış polimerler (MBP'ler), hedef moleküllere karşı gösterdikleri yüksek özgüllük ve bağlanma yetenekleriyle ön plana çıkmaktadır. Bu yapay tanıma elemanları, biyolojik karşıtlarına göre daha üstün bir kimyasal ve fiziksel stabilite sunmakta; üretim süreçlerinin basitliği ve çok çeşitli sistemlere entegrasyon kabiliyetleri sayesinde giderek artan bir ilgi görmektedir (Şener vd., 2010).

Moleküler baskılanmış polimerler, yalnızca yüksek seçicilikleriyle değil, aynı zamanda güçlü mekanik yapılarıyla da dikkat çekmektedir. Yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına karşı dayanıklılık göstermeleri; ayrıca asidik, bazik, metal iyonları içeren veya organik çözücü barındıran agresif ortamlarda bile işlevselliklerini koruyabilmeleri, onları zorlu uygulama alanları için ideal hâle getirmektedir. Bu materyaller, uzun raf ömrüne sahip olmalarının yanı sıra, performans kaybı olmaksızın yıllarca muhafaza edilebilme özelliğiyle de tercih edilmektedir (Şener vd., 2010).

Moleküler baskılanmış polimerler, yüksek kararlılıkları, düşük maliyetleri ve polimerizasyon aşamalarının sensör teknolojileriyle uyumlu olması sayesinde, çeşitli uygulamalarda sentetik tanıma elemanı olarak kullanılabilir (Yılmaz vd., 2015). Bu özellikler, kimyasal biyosensörlerin geliştirilmesinde bu polimerlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Pestisitler, şekerler, nükleik asitler, amino asit türevleri, ilaçlar, toksinler ve çözücüler gibi birçok hedef madde için moleküler baskılanmış polimer temelli sensörlerin geliştirildiği bildirilmiştir (Guan vd., 2008).

Son yıllarda, moleküler baskılanmış polimerlere dayalı sensör sistemleri, özgün tanıma yetenekleri ve çok yönlü kullanım alanları nedeniyle bilim insanlarının yoğun ilgisini çeken dinamik bir araştırma sahası olarak öne çıkmaktadır (Yola vd., 2014).

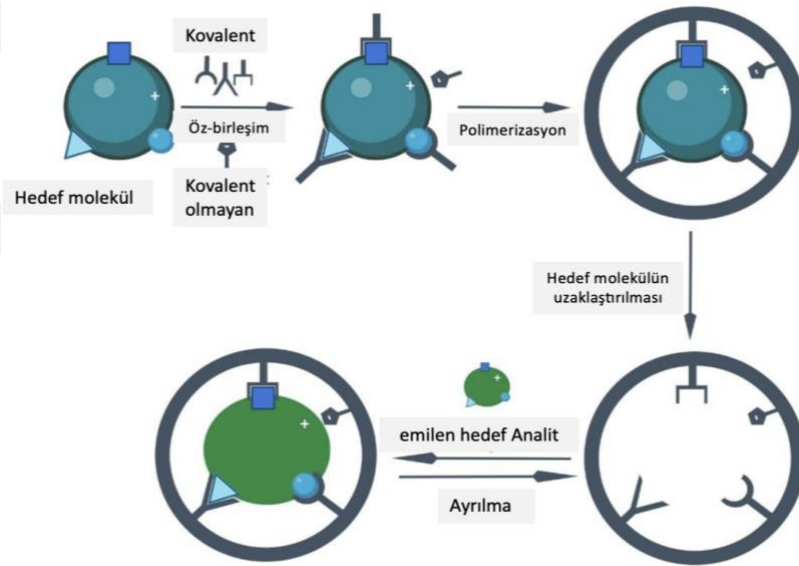
Moleküler baskılama yöntemi, temelde üç ana adımdan oluşur. Alttaki şekilde detaylı olarak gösterilmiştir (Bedair vd., 2025).

-Ön kompleks oluşumu: Fonksiyonel monomerler, hedef analit ile özgül etkileşimler kurabilecek kimyasal gruplara sahiptir hem de polimerizasyon reaksiyonuna katılmalarını sağlayan doymamış bağlar (örneğin çift karbon bağları) içerir. Bu monomerler, şablon molekülle kovalent veya zayıf etkileşimler (hidrojen bağları, elektrostatik çekim vb.) yoluyla birleşerek, polimerizasyon öncesinde geçici bir kompleks meydana getirir. Bu ön yapı, hedef molekülün çevresinde monomerlerin uygun şekilde konumlandığı, özgül bir tanıma bölgesi oluşumuna zemin hazırlar. Bu

aşamada, şablon molekülün hem üç boyutlu konformasyonu hem de kimyasal özellikleri, kalıp oluşumunun doğruluğu açısından kritik rol oynar (Denizli ve Küfrevioğlu, 2010).

–**Polimerizasyon:** Fonksiyonel monomer ile hedef molekül kompleksinin uygun bir başlatıcı ve çapraz bağlayıcı eşliğinde polimerleştirilmesiyle polimer yapı oluşturulur (Denizli ve Küfrevioğlu, 2010).

–**Hedef (kalıp) molekülün uzaklaştırılması:** Polimerden hedef molekülün ayrılması, uygun çözücüler ya da çözücü karışımlarıyla gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda, baskılanan molekül polimer matristen fiziksel ve kimyasal yollarla uzaklaştırılır. Böylece polimerde, molekülün boyutu ve yapısına uygun seçici boşluklar (kaviteler) elde edilir. Bu kaviterler, baskılanan molekülün polimere tekrar ayırt edici olarak bağlanabilmesini sağlarlar (Denizli ve Küfrevioğlu, 2010).



Şekil 2. 6 Moleküler baskılama prensibinin şematik gösterimi (Bedair vd., 2025).

Moleküler baskılamaya dayalı farklı bir kullanım alanı ise sensör teknolojilerinde tanıma elemanı amacıyla önemli olarak kullanımındır. Temel prensipte, elektrokimyasal voltametri, floresan, piezoelektrik ve yüzey plazmon rezonansı gibi fiziksel ölçüm yöntemleri, moleküler baskılama tabanlı sensörlerde sinyal tayini amacıyla kullanılabilir. Sentetik tanıma elemanlarının yüksek yapısal kararlılık, düşük üretim maliyeti ve kolay hazırlanabilirlik gibi üstün özellikleri, bu sistemlerin çeşitli pratik uygulamalarda tercih edilmesini mümkün kılmaktadır (Saylan vd., 2017).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda, Famoksadon tespiti için yeni bir moleküler baskılı SPR sensörü geliştirilmesinde kullanılacak materyal, enstrüman, seçilen yöntemler ve yapılan analizler aşağıdaki kısımda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.1. Materyal

Famoksadon, aflatoksin B1 (AFB1), fumonisin B1 (FB1), okratoksin A (OTA), 2-hidroksietilmetakrilat (HEMA), MAGA, etilen glikol dimetakrilat (EGDMA), AIBN, sodyum klorür (NaCl), MWCNT'ler (35-45 nm çapında ve 2.0-6.0 mm uzunluğunda, sodyum molibdat dihidrat (Na₂MoO₄.2H₂O), setiltrimetilamonyum bromür (CTAB) ve L-sistein, Sigma-Aldrich tarafından sağlanacaktır. Destek solüsyonu olarak fosfat tamponlu salin (pH 6.0, PBS) (0.1 mol L⁻¹) seçilmiştir.

3.2. Enstrümantasyon

Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) için JEOL 2100 TEM (Tokyo, Japonya), Rikagu Miniflex, X-ışını kırınım analizi (XRD) için X-ışını difraktometresi (Tokyo, Japonya), Bruker-Tensor gibi morfolojik analizlere yönelik enstrümantal cihazlar Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) için 27 FTIR spektrometresi (Tokyo, Japonya), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) için PHI 5000 Versa Prob tipi X-ışını fotoelektron spektrometresi (Tokyo, Japonya/New York, NY, ABD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) için AFM Park NX10 (Tokyo, Japonya) ve UV-Vis için Thermo Fisher Scientific UV-Vis/ Vis Instrumentation büyük bir özenle kullanıldı. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve döngüsel voltametri (CV) ölçümleri, Warminster, PA, ABD'den Gamry Reference 600 iş istasyonu kullanılarak yapıldı. Kinetik analiz için Calgary, AB, Kanada'dan GenOptics SPR sistemi kullanılacaktır.

3.3. Yöntem

3.3.1. Famoxadone (FAM) baskılı SPR sensörünün geliştirilmesi

Öncelikle altın filmle kaplanmış SPR yongalarının yüzey temizliği gerçekleştirildi. Bu işlemde, SPR yongaları önceden hazırlanmış asidik piranha

çözeltisine (25,0 mL, 3:1 H₂SO₄:H₂O₂, v/v) daldırıldı ve bu yongalar 30 dakika boyunca çalkalanmış banyo sisteminde bırakıldı. 30 dakika sonra, temizlenmiş SPR yongaları 45 dakika boyunca nitrojen atmosferinde kurutuldu.

PBS (pH 6,0) varlığında optimum mol stokiyometrik oranda (2:1) FAM-MAGA kompleksi hazırlandıktan sonra, AIBN (10,0 mg), HEMA (1,0 mL) ve EGDMA (2,0 mL) karışımı bir tüpte hazırlandı. Daha sonra, FAM-MAGA kompleksi (0,5 mL) 1 saat boyunca AIBN-HEMA-EGDMA çözeltisine (1,5 mL) yavaşça eklendi. Hazırlanan bu dispersiyon çözeltisi yaklaşık 30 dakika boyunca nitrojen atmosferinde saflaştırıldıktan sonra, SPR yongaları 15 saniye boyunca spin kaplama yöntemi ile bu çözelti ile kaplandı ve 25 °C'de kurutuldu. 25 dakika UV polimerizasyonundan sonra, FAM baskılı SPR yongası oluşturuldu (MIP/SPR). Yukarıda açıklanan prosedürü kullanarak FAM molekülü olmadan baskı seçiciliğini göstermek için NIP/SPR hazırlandı.

3.3.2. Numune hazırlama

Yerel süpermarketten satın alınan domates örneği (0,25 g, Gaziantep/Türkiye) ve 15,0 mL etanol:asetonitril çözeltisi (1:1, v/v) karışımı, 10 dakika boyunca kuvvetli karıştırma işlemi altında bir tüpte taşınmıştır. Hazırlanan karışımın 10000 rpm'de 20 dakika santrifüjlenmesinden sonra, üst faz toplandı ve 0,1 M PBS (20,0 mL, pH 6,0) ile seyreltildi ve FAM tayini için SPR hücrelerine aktarılmıştır.

3.3.3. MIP/SPR'den FAM uzaklaştırılması ve analiz prosedürü

Analit molekülünün baskılanmasından sonra, FAM molekülünün polimerik yüzeyden tamamen uzaklaştırılması, MIP tipi sensör uygulamalarında baskılama kinetiğini önemli ölçüde etkiler. Analit molekülü ile monomer arasındaki etkileşime bağlı olarak farklı desorpsiyon ajanları kullanılabilir. Bu çalışmada, FAM ve MAGA arasındaki elektrostatik etkileşimler nedeniyle desorpsiyon ajanı olarak 1,0 M NaCl seçilmiştir. Hazırlanan MIP bazlı SPR yongaları, 1,0 M NaCl içeren bir çözeltiye daldırılmış ve 45 dakika boyunca çalkalanmış banyo sisteminde tutulmuştur. Uzaklaştırmadan sonra, SPR yongaları bir nitrojen atmosferi altında kurumaya bırakılmıştır. Aynı uzaklaştırma işlemi NIP/SPR için tekrarlanmıştır.

FAM uzaklaştırmalı MIP/SPR elektrot hücrelerine yerleştirildikten sonra, ilk olarak denge tampon çözeltisi (pH: 6.0, PBS, 10.0 mL, 1.0 mL dak⁻¹ akış hızı) 10 dakika

boyunca ip yüzeyine gönderildi. Doğrusallık aralığında olan herhangi bir FAM çözeltisine ait adsorpsiyon çözeltisi, 40 dakika boyunca SPR ip yüzeyine (1.0 mL dak⁻¹ akış hızı) gönderilmiştir. Rezonans frekansındaki değişimler sabit bir plato bölgesine ulaştıktan sonra, desorpsiyon özeltisi (1.0 M NaCl) sisteme (1.0 mL dak⁻¹ akış hızı) verilmiş ve tekrar denge sağlanmıştır.

Doğrusallık aralığında olan her bir FAM adsorpsiyon çözeltisi için yukarıda belirtilen "adsorpsiyon-desorpsiyon-rejenerasyon" döngüsünün tekrarlanmasıyla elde edilen SPR sinyalleri vasıtasıyla kalibrasyon korelasyonu oluşturulmuştur.



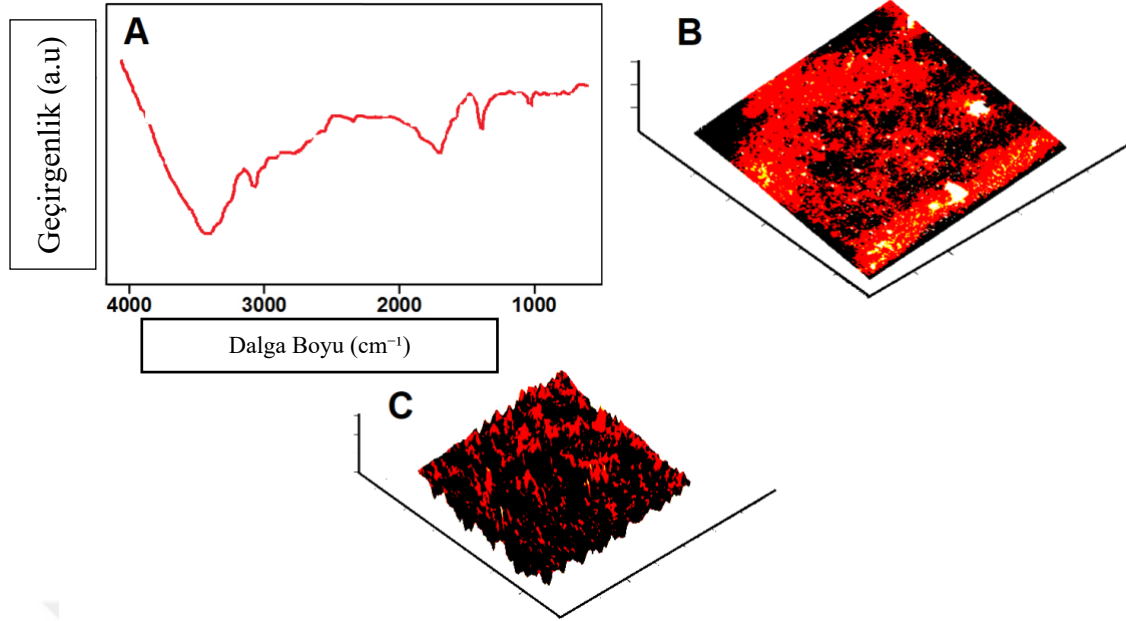
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, Famoxadone (FAM) tayini amacıyla geliştirilen moleküler baskılı yüzey plazmon rezonans (SPR) sensörüne ilişkin uygulanan yöntemler ile gerçekleştirilen analitik çalışmaların sonuçları ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Elde edilen veriler, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak bilimsel bağlamda değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen sensör sisteminin, domates örneğinde FAM analizine yönelik yüksek seçicilik ve duyarlılık göstermesi, ayrıca çevre dostu bir alternatif analiz yöntemi sunması bakımından önem arz ettiği ortaya konulmuştur.

4.1. FAM Baskılı p(HEMA-MAGA) Filminin FTIR ve AFM Karakterizasyonları

FAM desorpsiyon çalışmalarından sonra, SPR çipi üzerindeki FAM baskılı p(HEMA-MAGA) filminin FTIR spektrumları kaydedildi (Şekil 4.1.A). MAGA ve HEMA'ya ait yaklaşık 3563 cm^{-1} 'de, MAGA'nın -CH gerilmesine ait 2918 cm^{-1} 'de, karboksil-karbonil gerilmesine ait 1691 cm^{-1} 'de ve -COO- gerilmesine ait 1478 cm^{-1} 'de emilim bantları gözlenmiştir. Gözlenen bu karakteristik emilim bantları, FAM'ın SPR çipi yüzeyine başarılı bir şekilde basıldığını kanıtlamıştır.

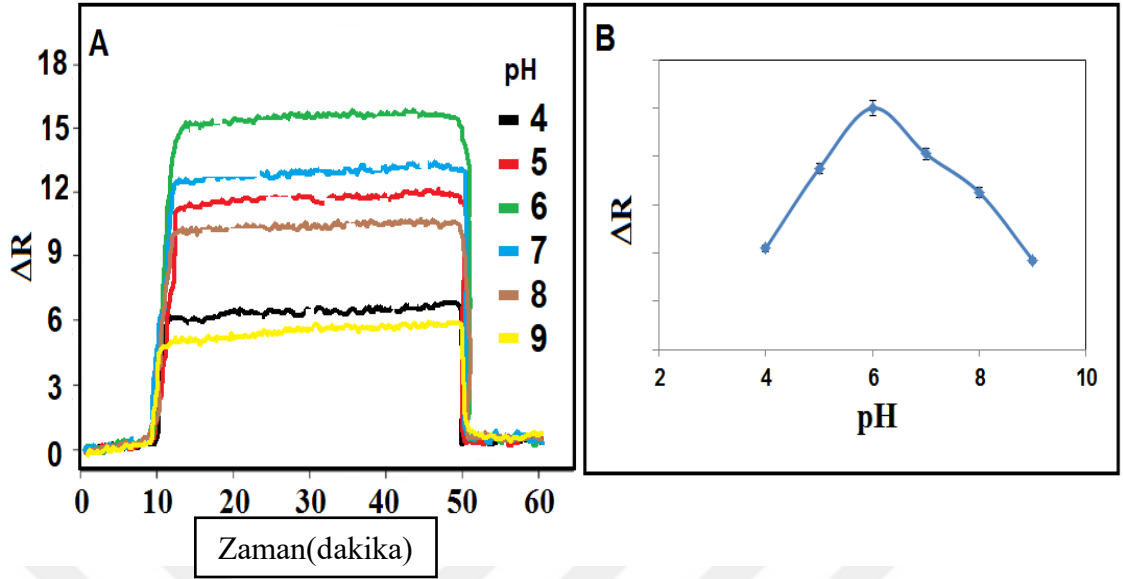
AFM yöntemi, çıplak SPR çipinin (Şekil 4.1.B) ve SPR üzerine FAM baskılı yüzey kalınlıklarının hesaplanması için kullanılmıştır (Şekil 4.1.C). Çıplak SPR çipi ve MIP/SPR çipi için sırasıyla $2,08\pm 0,06$ ve $29,17\pm 0,97$ nm yüzey kalınlıkları elde edilmiştir. Son olarak, FTIR ve AFM sonuçları FAM baskılı SPR çipinin başarılı bir şekilde oluştuğunu doğrulamıştır.



Şekil 4. 1 (A) SPR üzerine basılmış FAM'ın FTIR spektrumları; (B) çıplak SPR çipinin ve (C) MIP/SPR çipinin AFM görüntüleri

4.2. FAM Baskılı SPR Çipinde pH Etkisi

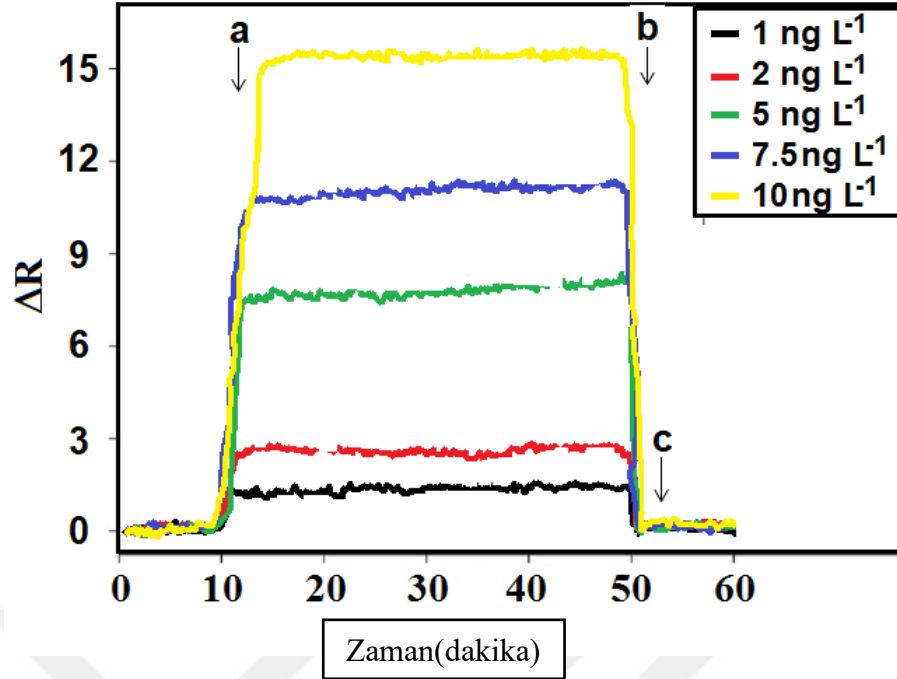
Optik sensör uygulamalarında, PBS'nin pH'ı sensör sinyalini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çalışmada monomer olarak kullanılan MAGA'nın karboksilik asit grupları (pKa1: 2.10 ve pKa2: 4.07), yüksek pH'ta anyonik hale gelir. Özellikle pH 6.0'a kadar, monomerin anyonik davranışı nedeniyle monomer-analit (FAM) etkileşimi maksimum olmuştur. pH 7.0'dan sonra, FAM analiti bazik ortamda anyonik hale geldikçe monomer-analit etkileşimi azalmış ve bu da sensör afinitesinin azaldığını göstermiştir. Şekil 4.2.A'ya ve Şekil 4.2.B'ye göre, optimum SPR sinyali pH 6.0'da elde edildiğinden gıda uygulamaları için pH 6.0 seçilmiştir.



Şekil 4. 2 (A) PBS'nin farklı pH'larında 10,0 ng L⁻¹ FAM için SPR sensörgramları, (B) pH'in FAM baskılı SPR çipi ve 10,0 ng L⁻¹ FAM varlığındaki etkisi

4.3. Doğrusallık Aralığı

MIP/SPR sensörü hazırlandıktan sonra, FAM çözeltilerinin farklı konsantrasyonlarının her biri 10 dakika sonra SPR çip yüzeyine gönderildi ve bir plato bölgesine ulaşıldıktan sonra, döngüler desorpsiyon çözeltisi ile tamamlandı. Tüm adsorpsiyon-desorpsiyon-rejenerasyon döngüsü tüm konsantrasyonlarda FAM çözeltileriyle tamamlandıktan sonra, SPR sinyallerinin 1,0 – 10,0 ng L⁻¹ FAM arasında doğrusallığa çok yakın olduğu belirlenmiş ve Şekil 4.3'te $y (\Delta R) = 1,0794x (CFAM, \text{ng L}^{-1}) - 0,3709$ kalibrasyon denklemi elde edilmiştir. Kantifikasyon sınırı (LOQ) ve LOD değerleri sırasıyla 1,0 ng L⁻¹ ve 0,30 ng L⁻¹ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 3 pH 6.0 PBS varlığında (1,0 ng L⁻¹ 'den 10,0 ng L⁻¹ FAM'a) FAM konsantrasyonunun MIP/SPR sinyalleri üzerindeki etkisi: (a) adsorpsiyon; (b) desorpsiyon; (c) rejenerasyon

4.4. Geri Kazanım

Geliştirilen SPR sensörünün doğruluğunu kanıtlamak için, doğrusallık aralığına giren 3 farklı FAM standart solüsyonu gerçek numunelere eklenerek geri kazanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir FAM standart solüsyonu eklenmeden geliştirilen MIP/SPR sayesinde Domates örneğinde $0,12 \pm 0,03$ ng L⁻¹ FAM bulunmuştur. Standart FAM solüsyonlarının eklenmesiyle Domates örneğindeki FAM miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'e göre, %100'e yakın değerler geliştirilen sensörün gerçek numuneleri yüksek doğrulukla analiz edebileceğini kanıtlamıştır.

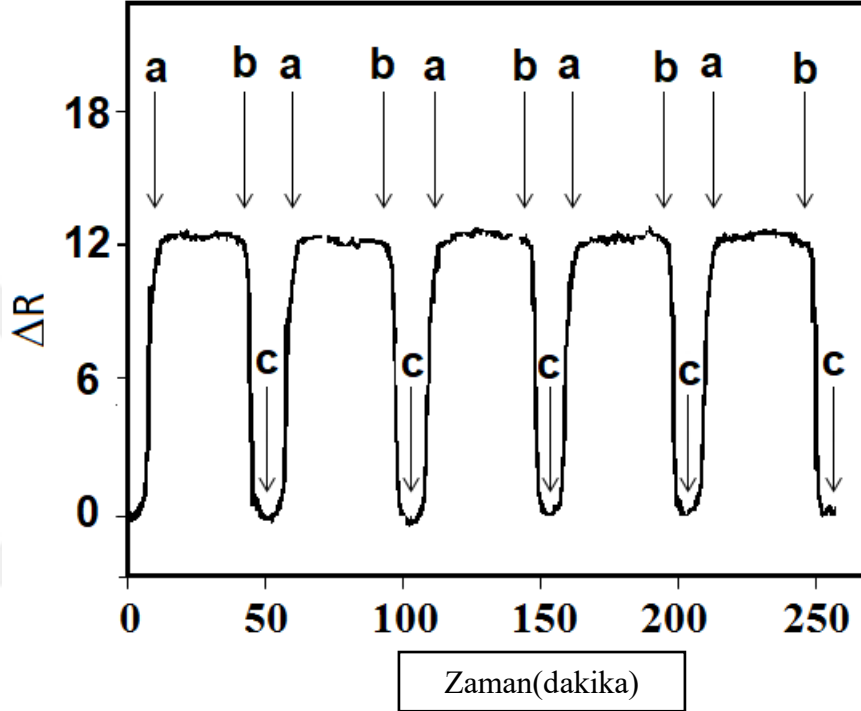
Çizelge 4. 1 Domates örneklerinde FAM'ın geri kazanım sonuçları (n=6)

Numune	Eklenen FAM (ng L ⁻¹)	Bulunan FAM (ng L ⁻¹)	*Geri Kazanım (%)
Domates	-	$0,12 \pm 0,03$	-
	2.00	$2,13 \pm 0,07$	$100,47 \pm 0,01$
	4.00	$4,11 \pm 0,01$	$99,76 \pm 0,03$
	6.00	$6,11 \pm 0,04$	$99,84 \pm 0,08$

*Geri kazanım = Bulunan FAM, ng L⁻¹ / Gerçek FAM, ng L⁻¹

4.5. MIP/SPR'nin Tekrarlanabilirliği, Yeniden Üretilirliği ve Kararlılığı

Kısa vadeli tekrarlanabilirlik için, 10,0 ng L⁻¹ FAM varlığında 5 ardışık adsorpsiyon-desorpsiyon-rejenerasyon döngüsü tamamlanmış ve her adsorpsiyon işlemi sırasında elde edilen SPR sinyallerinin bağıl standart sapma (RSD) değerleri hesaplanmıştır. %0,47'lik RSD değeri, yüksek kısa vadeli ölçüm tekrarlanabilirliğini göstermiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4. 4 25 °C'de pH 6.0 PBS içeren 10.0 ng L⁻¹ FAM varlığında MIP/SPR çipinin tekrarlanabilirliği: (a) adsorpsiyon; (b) desorpsiyon; (c) rejenerasyon

20 farklı MIP/SPR sensörünün tekrarlanabilirliği 10,0 ng L⁻¹ FAM varlığında değerlendirilmiş ve 20 farklı ölçüme ait %0,94'lük RSD, sentez prosedürünün yüksek tekrarlanabilirliğini doğrulanmıştır.

Bir MIP tabanlı SPR sensörünün SPR sinyalleri, belirli zaman aralıklarında 6 hafta boyunca 10,0 ng L⁻¹ FAM varlığında ölçülmüş ve %0,07'lik RSD değeri hazırlanan sensörün yüksek kararlılığını kanıtlanmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu kısımda Famoksidon tespiti için yeni bir moleküler baskılı SPR sensörü geliştirilmesi araştırmasının mevcut sonuçları ve önerileri verilmiştir.

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada FAM tespiti için yeni bir moleküler baskılı SPR sensörü sunulmuş ve domates numunelerine uygulanmıştır. İlk olarak FAM-MAGA kompleksi PBS (pH 6,0) varlığında hazırlandıktan sonra AIBN-HEMA-EGDMA çözeltisine (1,5 mL) eklenmiştir.

UV polimerizasyonu kullanılarak FAM baskılı bir SPR çip yüzeyi geliştirilmiştir. Yüksek baskı seçiciliğini göstermek için FAM molekülü olmadan MIP/SPR hazırlanmıştır. Seçicilik sonuçlarına yansıma durumuna göre FAM analizi yüksek seçicilik ve geri kazanımla başarılı şekilde tamamlanmıştır. Analitik sonuçlar, domates örneklerinde SPR sinyallerinin 1,0 – 10,0 ng L⁻¹ FAM arasında doğrusallığa sahip olduğu belirlenmiştir. Kantifikasyon sınırı (LOQ) ve LOD değerleri sırasıyla 1,0 ng L⁻¹ ve 0,30 ng L⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sensörün yüksek duyarlı olduğunu göstermiştir.

FAM desorpsiyon çalışmalarından sonra, SPR çipi üzerindeki FAM baskılı p(HEMA-MAGA) filminin FTIR spektrumları kaydedildi (Şekil 4.1.A). MAGA ve HEMA'ya ait yaklaşık 3563 cm⁻¹ 'de, MAGA'nın –CH gerilmesine ait 2918 cm⁻¹ 'de, karboksil-karbonil gerilmesine ait 1691 cm⁻¹ 'de ve –COO– gerilmesine ait 1478 cm⁻¹ 'de emilim bantları gözlenmiştir. Gözlenen bu karakteristik emilim bantları, FAM'ın SPR çipi yüzeyine başarılı bir şekilde basıldığını kanıtlamıştır.

AFM yöntemi, çıplak SPR çipinin ve SPR üzerine FAM baskılı yüzey kalınlıklarının hesaplanması için kullanılmıştır. Çıplak SPR çipi ve MIP/SPR çipi için sırasıyla 2,08±0,06 ve 29,17±0,97 nm yüzey kalınlıkları elde edilmiştir. Son olarak, FTIR ve AFM sonuçları FAM baskılı SPR çipinin başarılı bir şekilde oluştuğunu doğrulamıştır.

Optik sensör uygulamalarında, PBS'nin pH'ı sensör sinyalini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çalışmada monomer olarak kullanılan MAGA'nın karboksilik asit grupları (pKa1: 2.10 ve pKa2: 4.07), yüksek pH'ta anyonik hale gelir. Özellikle pH 6.0'a kadar, monomerin anyonik davranışı nedeniyle monomer-analit (FAM) etkileşimi maksimum olmuştur. pH 7.0'dan sonra, FAM analiti bazik ortamda anyonik hale

geldikçe monomer-analit etkileşimi azalmış ve bu da sensör afinitesinin azaldığını göstermiştir. Optimum SPR sinyali pH 6.0'da elde edildiğinden gıda uygulamaları için pH 6.0 seçilmiştir.

Geliştirilen SPR sensörünün doğruluğunu kanıtlamak için, doğrusallık aralığına giren 3 farklı FAM standart solüsyonu gerçek numunelere eklenerek geri kazanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir FAM standart solüsyonu eklenmeden geliştirilen MIP/SPR sayesinde Domates örneğinde $0,12 \pm 0,03 \text{ ng L}^{-1}$ FAM bulunmuştur. Standart FAM solüsyonlarının eklenmesiyle Domates örneğindeki FAM miktarları belirlenmiştir. Verilere göre, %100'e yakın değerler geliştirilen sensörün gerçek numuneleri yüksek doğrulukla analiz edebileceğini kanıtlamıştır.

Kısa vadeli tekrarlanabilirlik için, $10,0 \text{ ng L}^{-1}$ FAM varlığında 5 ardışık adsorpsiyon-desorpsiyon-rejenerasyon döngüsü tamamlanmış ve her adsorpsiyon işlemi sırasında elde edilen SPR sinyallerinin bağıl standart sapma (RSD) değerleri hesaplanmıştır. %0,47'lik RSD değeri, yüksek kısa vadeli ölçüm tekrarlanabilirliğini göstermiştir.

20 farklı MIP/SPR sensörünün tekrarlanabilirliği $10,0 \text{ ng L}^{-1}$ FAM varlığında değerlendirilmiş ve 20 farklı ölçüme ait %0,94'lük RSD, sentez prosedürünün yüksek tekrarlanabilirliğini doğrulanmıştır.

Bir MIP tabanlı SPR sensörünün SPR sinyalleri, belirli zaman aralıklarında 6 hafta boyunca $10,0 \text{ ng L}^{-1}$ FAM varlığında ölçülmüş ve %0,07'lik RSD değeri hazırlanan sensörün yüksek kararlılığını kanıtlanmıştır.

Neticede, geliştirilen SPR tabanlı sensör platformu, yüksek seçicilik, tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik ve yapısal stabilite gibi kritik analitik parametreler açısından üstün performans sergilemiştir. Bu özellikleriyle sensör, küresel düzeyde gıda güvenliğinin izlenmesine yönelik stratejik uygulamalarda etkin bir analitik araç olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir.

5.2 Öneriler

Pestisitlerin gıda üretiminde güvenli biçimde kullanılabilmesi için, uygulama dozlarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle yeni sentezlenen pestisitlerin dozaj sınırlarının bilimsel yöntemlerle saptanması hem ekosistem dengesi hem de halk sağlığı açısından temel bir zorunluluktur. Bu doğrultuda, çevresel etkiler konusunda toplumsal farkındalık oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Yeni nesil pestisitlerin izlenebilirliğini sağlayacak tanı ve analiz sistemlerinin geliştirilmesi ise acil bir gereksinim olarak öne çıkmaktadır. Çevre sağlığının korunması ve insan yaşam kalitesinin sürdürülebilirliği adına bu alanda daha yoğun ve nitelikli araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Geleneksel fungusit analizlerinde yaygın olarak kullanılan kromatografik yöntemler, yüksek doğruluk sağlamalarına rağmen hem zaman açısından verimsiz hem de maliyetli olabilmektedir. Ayrıca, bu tekniklerin uygulanması uzmanlık gerektirdiğinden pratik kullanımı sınırlıdır. Bu çalışmada, söz konusu zorlukları aşmak amacıyla daha ekonomik ve kullanıcı dostu bir yöntem olan SPR (Yüzey Plazmon Rezonans) temelli algılama sistemi geliştirilmiştir. Bu tür yaklaşımların ileride yaygınlaşması hem çevre hem de toplum sağlığı açısından olumlu etkiler yaratabilir.

Bu çalışmada, hedef bileşiklerin algılanmasında hem ekonomik hem de yüksek seçiciliğe sahip bir çözüm sunan SPR tabanlı sensör teknolojisi kullanılmıştır. Sensör yüzeyinde tanıma elemanı olarak moleküler baskılama tekniğiyle üretilmiş özel polimer yapılar yer almıştır. Bu yaklaşım, özgül tanıma kapasitesiyle dikkat çekerken, ileride gerçekleştirilecek kapsamlı araştırmalarla çevresel izleme ve halk sağlığı uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olabilir.

Mevcut tekniklerle karşılaştırıldığında daha yüksek hassasiyete sahip bir sensör sisteminin bilimsel çalışmalara kazandırılması, gıda örneklerinde pestisit tespitinin daha güvenli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede, pestisit etkisine bağlı olarak gelişebilecek bazı sağlık sorunlarının erken aşamada belirlenmesi mümkün hale gelmektedir. İleride bu tür yenilikçi çalışmaların literatürde daha fazla yer bulması, halk sağlığı açısından umut verici gelişmelere kapı aralayabilir.

Araştırma bulguları, geliştirilmiş MIP/SPR sensörünün yüksek seçicilik ve %100'e yakın doğrulukla başarılı bir şekilde üretildiğini kanıtlamaktadır. Yapılan uzun süreli dayanıklılık testleri, MIP esaslı SPR sensörünün zaman içinde kararlılığını koruduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca FAM kaplamalı SPR sensör çiplerinin üretim sürecine yönelik tekrar üretim denemeleri, bu sürecin tutarlılıkla yeniden gerçekleştirilebildiğini kanıtlamıştır. SPR tabanlı sistemlerde analitik performans açısından en kritik unsurlardan biri olan tekrarlanabilirlik, bu çalışmada adsorpsiyon, desorpsiyon ve rejenerasyon adımlarını içeren altı döngü sonunda başarılı biçimde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sensörün çoklu kullanımlarda dahi güvenilir sonuçlar verdiğini desteklemektedir. Gelecekte bu özelliklere sahip sensörlerin yaygın kullanımı,

pestisitlerin yol açtığı hastalıkların erken teşhisinde ve güvenli gıdaya erişimin artırılmasında önemli katkılar sunabilir.



KAYNAKÇA

- Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyauallah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, 10(7), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>
- Akashé, M.M., Pawade, U.V. & Nikam, A.V. (2018). Classification of pesticides: a review. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*, 9 (4), 144-150. <https://doi.org/10.7897/2277-4343.094131>
- Alhadrami H. A. (2018). Biosensors: Classifications, medical applications, and future prospective. *Biotechnology and applied biochemistry*, 65(3), 497–508. <https://doi.org/10.1002/bab.1621>
- Anastassiades M., Lehotay S.J., Stajnbaher D., & Schenck F.J. (2003). Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and“dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *J. AOAC Int.* 86, 412-431. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12723926/>
- Balbinot, S., Srivastav, A. M., Vidic, J., Abdulhalim, I., & Manzano, M. (2021). Plasmonic biosensors for food control. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 128-140.
- Bedair, A., Hamed, M., El Hassab, M., Kannouma, R. E., Abdelhameed, R. M., & Mansour, F. R. (2025). Dummy template molecularly imprinted polymer-based sensors in analytical and bioanalytical applications. *Talanta Open*, 100431.
- Bhalla, N., Jolly, P., Formisano, N., & Estrela, P. (2016). Introduction to biosensors. *Essays in biochemistry*, 60(1), 1–8. <https://doi.org/10.1042/EBC20150001>
- Birişik, N. (Ed.). (2018). Teoriden pratiğe kimyasal mücadele. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü. <https://bku.tarimorman.gov.tr>
- Butt M. A. (2025). Surface Plasmon Resonance-Based Biodetection Systems: Principles, Progress and Applications-A Comprehensive Review. *Biosensors*, 15(1), 35. <https://doi.org/10.3390/bios15010035>
- Caucheteur, C., Guo, T., & Albert, J. (2015). Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 407(14), 3883–3897. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-8411-6>
- Cemek, K., Ünal, B., Zenger, O., & Peşint, G. B. (2021). Gıda güvenliği ve sağlık alanında patojen mikroorganizmaların tespitine yönelik SPR biyosensör uygulamaları. *Artıbilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 50-63.
- Daş, Y. K., & AKSOY, A. (2016). Pestisitler. *Türkiye Klinikleri Veterinary Sciences-Pharmacology and Toxicology-Special Topics*, 2(2), 1-17.

- Delen, N., Durmuşoğlu, E., Güncan, A., Güngör, N., Turgut, C., & Burçak, A. (2005). Türkiye’de Pestisit Kullanımı, Kalinti ve Organizmalarda Duyarlilik Azalişi Sorunlari. *Türkiye Ziraat Mühendisligi*, 6, 3-7.
- Denizli, A., & Küfrevioğlu, Ö. İ. (2010). Manyetik polimerler: Protein kromatografisi ve yeni nesil polimerik sistemler. *Editörler: Denizli, A., Küfrevioğlu, Öİ, Pozitif Matbaacılık, Ankara*, 73-99.
- Dönmez, D., Isak, M. A., İzgü, T., & Şimşek, Ö. (2024). Green Horizons: Navigating the future of agriculture through sustainable practices. *Sustainability*, 16(8), 3505.
- Duan, Q., Liu, Y., Chang, S., Chen, H., & Chen, J. H. (2021). Surface Plasmonic Sensors: Sensing Mechanism and Recent Applications. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(16), 5262. <https://doi.org/10.3390/s21165262>
- Dünya Sağlık Örgütü. (2019). The WHO Recommended Classification of pesticides by hazard and guideliness to classification.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2023. Statement on the targeted risk assessment for famoxadone. *EFSA Journal* 2023; 21(3):7932, 12 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7932z>
- Erdoğan, B. Y. (2010). Samsun’da Yaygın Olarak Kullanılan Pestisitlerin Sağlığa Ve Çevreye Etkileri/The Health And Environmental Effects Of The Pesticides Commonly Used In Samsun. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 19(2), 28-35.
- Erdoğan, C. (2024). Türkiye’de ve Dünya’da bitki koruma ürünlerinin kullanımının değerlendirilmesi ve öneriler. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 27(2), 382-392.
- FAO. (2025). Pest and Pesticide Management. <https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/about/understanding-the-context/en/>
- FAO. (2024). FAOSTAT: Pesticides Use. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a8a8c2c8-ee36-42e8-a619-7e73c8daf8a6/content>
- Guan, G., Liu, B., Wang, Z., & Zhang, Z. (2008). Imprinting of Molecular Recognition Sites on Nanostructures and Its Applications in Chemosensors. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 8(12), 8291–8320. <https://doi.org/10.3390/s8128291>
- IARC. (2024). İnsanlarda yeterli veya sınırlı kanıta sahip kanser bölgelerine göre sınıflandırmaların listesi, IARC Monografıları Ciltler 1–136.
- Justino, C. I. L., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. A. P. (2016). Critical overview on the application of sensors and biosensors for clinical analysis. *Trends in analytical chemistry : TRAC*, 85, 36–60. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.04.004>
- Kadirsoy S., Atar, N., Yola, M.L. (2020). Molecularly imprinted QCM sensor based on delaminated MXene for chlorpyrifos detection and QCM sensor validation. *New Journal of Chemistry*. 44(16), 6524-6532. <https://doi.org/10.1039/d0nj00951b>

- Kumar, P., Kumar, R., Thakur, K., Mahajan, D., Brar, B., Sharma, D., ... & Sharma, A. K. (2023). Impact of pesticides application on aquatic ecosystem and biodiversity: a review. *Biology Bulletin*, 50(6), 1362-1375.
- Lv, M., Liu, Y., Geng, J., Kou, X., Xin, Z., & Yang, D. (2018). Engineering nanomaterials-based biosensors for food safety detection. *Biosensors & bioelectronics*, 106, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.01.049>
- Manap, R.Y., Güneç, E. & Doğan, E. (2023). Pesticides: Their classification, Toxicological effects, and Detection. *Journal of Ata-Chem*, 3(2), 9-23
- Misawa, N., Osaki, T., & Takeuchi, S. (2018). Membrane protein-based biosensors. *Journal of the Royal Society, Interface*, 15(141), 20170952. <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0952>
- Narsaiah, K., Jha, S. N., Bhardwaj, R., Sharma, R., & Kumar, R. (2012). Optical biosensors for food quality and safety assurance-a review. *Journal of food science and technology*, 49(4), 383–406. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0437-6>
- Özdemir, T., & Kiraz, E. D. E. (2022). Pestisitlerin çevre sağlığı üzerindeki etkisi. *City Health Journal*, 3(2), 18-23. <http://cityhealthj.org/index.php/cityhealthj/article/view/37>
- Öztürk, İ., & Tosun, N. (2004). Famoxadone ve cymoxanil etkili maddeli bir fungusitin domates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bitkisi üzerine fizyolojik etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 41(3). <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/59126>
- Ravindran, N., Kumar, S., M, Y., S, R., C A, M., Thirunavookarasu S, N., & C K, S. (2023). Recent advances in Surface Plasmon Resonance (SPR) biosensors for food analysis: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(8), 1055–1077. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1958745>
- Reyes-Calderón, A., Pérez-Urbe, S., Ramos-Delgado, A. G., Ramalingam, S., Oza, G., Parra-Saldívar, R., Ramirez-Mendoza, R. A., Iqbal, H. M. N., & Sharma, A. (2022). Analytical and regulatory considerations to mitigate highly hazardous toxins from environmental matrices. *Journal of hazardous materials*, 423(Pt A), 127031. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127031>.
- Rodrigues, M. B., da Silva, C. A. M., Chong-Silva, D. C., & Chong-Neto, H. J. (2025). Pesticides and human health. *Jornal de pediatria*, 101 Suppl 1(Suppl 1), S70–S76. <https://doi.org/10.1016/j.jpmed.2024.11.008>
- Saylan, Y., Akgönüllü, S., Çimen, D., Derazshamshir, A., Bereli, N., Yılmaz, F., & Denizli, A. (2017). Development of surface plasmon resonance sensors based on molecularly imprinted nanofilms for sensitive and selective detection of pesticides. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 241, 446-454. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400516316434>
- Sierotzki, H., & Scalliet, G. (2013). A review of current knowledge of resistance aspects for the next-generation succinate dehydrogenase inhibitor fungicides. *Phytopathology*, 103(9), 880–887. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-13-0009-RVW>
- Sternberg, J. A., Geffken, D., Adams, J. B., Jr, Pöstages, R., Sternberg, C. G., Campbell, C. L., & Moberg, W. K. (2001). Famoxadone: the discovery and

- optimisation of a new agricultural fungicide. *Pest management science*, 57(2), 143–152. [https://doi.org/10.1002/1526-4998\(200102\)57:2<143::AID-PS282>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1526-4998(200102)57:2<143::AID-PS282>3.0.CO;2-8)
- Sener, G., Ozgur, E., Yılmaz, E., Uzun, L., Say, R., & Denizli, A. (2010). Quartz crystal microbalance based nanosensor for lysozyme detection with lysozyme imprinted nanoparticles. *Biosensors & bioelectronics*, 26(2), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.06.003>
- Tarım ve Orman Bakanlığı, Gıda ve Kontrol Genel Müdürlüğü, 2025. https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Bitki_Koruma_Urunleri/Is_tatistik/Yillar_Itibariyla_BKU_Kullanım_Miktar_2006-2024.pdf
- Tiryaki, O., Canhilal, R., & Horuz, S. (2010). Tarım ilaçları kullanımını ve riskleri. *Erciyes üniversitesi fen bilimleri enstitüsü fen bilimleri dergisi*, 26(2), 154-169. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/236259>
- Tortora, F., Guerrero, V., Lettieri, G., Febbraio, F., & Piscopo, M. (2024). Prediction of Pesticide Interactions with Proteins Involved in Human Reproduction by Using a Virtual Screening Approach: A Case Study of Famoxadone Binding CRBP-III and Izumo. *International journal of molecular sciences*, 25(11), 5790. <https://doi.org/10.3390/ijms25115790>
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International journal of environmental research and public health*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184-3196. <https://doi.org/10.1039/C3CS35486F>
- Waard, M. D., Georgopoulos, S. G., Hollomon, D. W., Ishii, H., Leroux, P., Ragsdale, N. N., & Schwinn, F. J. (1993). Chemical control of plant diseases: problems and prospects. *Annual review of phytopathology*, 31(1), 403-421.
- Xiao, S., Cui, J., Yang, J., Hou, H., Yao, J., Ma, X., ... & Wang, P. (2024). Systematic health risks assessment of chiral fungicide famoxadone: Stereoselectivities in ferroptosis-mediated cytotoxicity and metabolic behavior. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135199>
- Yadav I. C., & Devi N. L. (2017). Pesticides classification and its impact on human and environment. *Environmental science and engineering*, 6(7), 140-158.
- Yılmaz, H., Düzenli, A., & Dağ, M. M. (2024). Dünya, Avrupa Birliği Ülkeleri ve Türkiye’de Pestisit Kullanımı ve Yasal Düzenlemeler. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 11(3), 315-330. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4157883>
- Yılmaz, E., Majidi, D., Ozgur, E., & Denizli, A. (2015). Whole cell imprinting based Escherichia coli sensors: A study for SPR and QCM. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 209, 714-721.
- Yola, M.L., Eren, T., Atar, N., (2015). A molecular imprinted SPR biosensor for sensitive determination of citrinin in red yeast rice. *Food Chemistry*. 184, 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.065>

- Yola, M. L., Uzun, L., Özeltin, N., & Denizli, A. (2014). Development of molecular imprinted nanosensor for determination of tobramycin in pharmaceuticals and foods. *Talanta*, *120*, 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.10.064>
- Zhao, L., Liu, Q., Jia, Y., Lin, H., Yu, Y., Chen, X., Liu, Z., Li, W., Fang, T., Jiang, W., Zhang, J., Cui, H., Li, P., Li, H., Hou, S., & Guo, L. (2023). The Associations between Organophosphate Pesticides (OPs) and Respiratory Disease, Diabetes Mellitus, and Cardiovascular Disease: A Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Toxics*, *11*(9), 741. <https://doi.org/10.3390/toxics11090741>
- Zirai Mücadele Merkez Araştırma Enstitüsü. (2015). Ülkemizde zirai mücadele girdilerinin değerlendirilmesi (Yayın No: 153). T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/zmmae/Belgeler/Sol%20Menu/Yayinlar/Ülkemizde%20Zirai%20Mücadele%20Girdilerinin%20Değerlendirilmesi.pdf>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve YAVAŞ KİREZ
Uyruğu : TC

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite	: İzmir Katip Çelebi Üniversitesi – Beslenme ve Diyetetik	2019
Yüksek Lisans	: Hasan Kalyoncu Üniversitesi – Beslenme ve Diyetetik Anabilim Dalı	Devam Ediyor..
Doktora	:-	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019-2020	Özel Likya Polikliniği- İZMİR	Diyetisyen
2020-Halen	Dyt. Feriha Kantemür Diyet Danışma Merkezi -ÇANAKKALE	Diyetisyen

UZMANLIK ALANI : Kişiye Özel Beslenme Planı , Online Diyet , Hastalıklarda Beslenme

YABANCI DİLLER :İngilizce

YAYINLAR

M.Yavaş Kirez & Ç.S. Meriç. Current Approaches To Screening And Detection Of Nutritional Status, Sözlü Sunum, “2. BİLSEL INTERNATIONAL AHLAT SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS”, 9-10 Aralık 2023

M.Yavaş Kirez &N. Otay Lüle. Emzirme Döneminde Besin Destekleri ve Anne Sütü Üzerine Etkileri, Sözlü Sunum, 4. ULUSLARARASI EGE SAĞLIK ALANLARI SEMPOZYUMU, 7-8 Mart 2024

M.Yavaş Kirez & M.L. Yola. A Novel Fomoxadone Fungicide Detection In Milk Samples By Surface Plasmon Resonance Based On Molecularly Imprinting Polymer, Sözlü Sunum, 8. ULUSLARARASI ANTALYA BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR VE YENİLİKÇİ ÇALIŞMALAR KONGRESİ, 25-27 Ocak 2025