

Enerji ve Akıllı Sistemler: Mühendislik Yaklaşımları

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



İKSAD
Publishing House

Enerji ve Akıllı Sistemler: Mühendislik Yaklaşımları

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

YAZARLAR

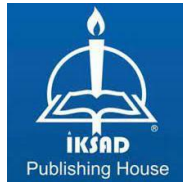
Prof. Dr. Ahmet Şükrü DEMİRCİ

Doç. Dr., Kenan ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Arife ŞİMŞEK

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN

Araş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT



Copyright © 2025 by iksad publishing house

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by

any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social

Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-309-9

Cover Design: İbrahim KAYA

Cover image prepared by GEMINI

September / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
------------	---

BÖLÜM 1

OPTİK YARIİLETKENLERLE GÜÇ DEVRELERİNDE KARARLILIK

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN , Doç. Dr., Kenan ALTUN.....	3
---	---

BÖLÜM 2

TAHİL BAZLI UNLU MAMULLERİN PROBİYOTİKLERLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE SON GELİŞMELER

Prof. Dr. Ahmet Şükrü DEMİRCİ.....	21
------------------------------------	----

BÖLÜM 3

PROBİYOTİK ve POSTBİYOTİK YAKLAŞIMLAR İLE MİKOTOKSİNLERİN BİYOLOJİK DETOKSİFİKASYONU

Araş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT

Prof. Dr. Ahmet Şükrü DEMİRCİ.....	39
------------------------------------	----

BÖLÜM 4

TOPRAK KİRLİLİĞİNİN ÇEVRESEL BOYUTU: TARIMSAL UYGULAMALAR VE FARMASÖTİK KALINTILAR

Dr. Öğr. Üyesi Arife ŞİMŞEK.....	51
----------------------------------	----

ÖNSÖZ

Mühendislik, teknolojik gelişmelerin yönünü belirleyen ve günlük yaşamın her alanına dokunan bir disiplindir. Enerji verimliliği, akıllı sistemler ve insan-makine etkileşimi gibi konular, hem endüstride hem de akademik dünyada giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kitap, elektrikli araçlarda hata tespitinden güç elektroniği devrelerinde kararlılığa, enerji depolama teknolojilerinden hibrit beyin-bilgisayar arayüzlerine kadar güncel ve uygulamaya dönük konuları kapsamaktadır.

Amacımız, mühendislik alanında çalışan araştırmacılar ve öğrenciler için hem temel bilgileri hem de yenilikçi yaklaşımları bir araya getiren bir kaynak sunmaktır. Kitapta yer alan bölümler, alanında uzman yazarların katkılarıyla hazırlanmış olup, disiplinler arası bir anlayışla derlenmiştir.

Bu eserde yer alan değerlendirme ve sonuçlar, ilgili bölümlerin yazarlarına aittir. Editoryal süreç, çalışmaların bilimsel bütünlük içinde sunulmasını amaçlamış; uygulamaya yönelik karar ve sorumluluklar ise doğal olarak okuyucu ve uygulayıcı kurumlara bırakılmıştır. Editör olarak katkıları ortak bir çerçevede birleştirerek tutarlı, erişilebilir ve faydaya odaklı bir anlatı sunmaya özen gösterdim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasına metinleri, verileri ve zamanı ile katkı veren tüm yazarlara; yapıcı geri bildirimleri için hakemlere, süreç boyunca destek sunan paydaşlara teşekkür ederim. Yayına hazırlık sürecindeki özenli iş birliği için IKSAD Yayınevi'ne ayrıca teşekkür ederim.

Okuyucuların bu kitaptan, araştırma ve uygulama çalışmalarında pratik bir başvuru kaynağı olarak yararlanmasını diliyorum; umarım burada derlenen bilgi birikimi, yeni projelere ve iş birliklerine kapı aralar.

Editörler

Doç. Dr. Kenan ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

BÖLÜM 1

OPTİK YARIİLETKENLERLE GÜÇ DEVRELERİNDE KARARLILIK

Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN¹, Doç. Dr., Kenan ALTUN²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214737>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas, Türkiye. didemaltun@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1964-3538.

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas, Türkiye. kaltun@cumhuriyet.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7419-1901.

1. Giriş

Güç elektroniği ve otomasyon sistemleri, modern endüstrinin temel bileşenlerindendir. Bu sistemlerde mikrodeneleyici tabanlı kontrol kartları, endüstriyel motorlar, ısıtıcılar ve diğer yüksek güçlü yüklerle etkileşimdedir. Ancak, bu yüklerin doğrudan düşük güçlü kontrol devreleriyle bağlanması, elektriksel arızalar, elektromanyetik girişim (EMI) ve sistem kararsızlığı gibi riskler doğurur. Optik yarıiletkenler, bu riskleri ortadan kaldırmak için galvanik izolasyon sağlayarak sistem güvenilirliğini ve kararlılığını artırır. Bu durum, hem sistem güvenliğini hem de uzun vadede üretim verimliliğini tehdit eder. İşte bu noktada, optik yarıiletkenlerin sunduğu izolasyon çözümleri büyük bir önem taşımaktadır (Sedra ve Smith, 2015; Horowitz ve Hill, 2015). Bu çalışmada, optik yarıiletkenlerin güç devrelerindeki rolünü, kontrol kartlarının korunmasındaki önemini ve gelecekteki teknolojik eğilimleri ele almaktadır.

Mikrodeneleyici kartları, düşük gerilim ve düşük akım düzeylerinde çalışan hassas sistemlerdir. Bir mikrodeneleyicinin tipik giriş/çıkış pinleri genellikle 3.3V veya 5V seviyelerinde çalışır ve maksimum akım kapasiteleri birkaç miliamper ile sınırlıdır. Buna karşın endüstriyel motorlar veya ısıtıcılar, yüzlerce volt ve on binlerce amper seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu nedenle, bu iki sistem arasında doğrudan bir bağlantı kurmak, mikrodeneleyici kartı üzerinde geri dönülemez hasarlara yol açabilir. Bu hasarlar, çoğu zaman kontrol kartının tamamının değiştirilmesini ve dolayısıyla yüksek maliyetli bakım süreçlerini beraberinde getirir (Blaabjerg vd., 2021).

Bununla birlikte, kontrol kartlarının güvenliğini sağlamak yalnızca doğrudan hasarlardan kaçınmak için değil, aynı zamanda sistem performansını optimize etmek için de önemlidir. Elektriksel izolasyonun olmadığı sistemlerde, elektromanyetik girişim (EMI, elektrik devrelerinde istenmeyen sinyallerin oluşturduğu parazit) ve radyo frekansı girişimi (RFI, yüksek frekanslı sinyallerin kontrol devrelerinde hatalara yol açan etkiler) gibi olumsuz etkiler kontrol kartlarının çalışma kararlılığını bozar. Özellikle darbe genişlik modülasyonu (PWM, motor sürücüleri ve güç kaynaklarında kullanılan bir anahtarlama tekniği) ile çalışan motor sürücüler veya hızlı anahtarlama yapan güç kaynakları, çevreye yoğun elektromanyetik gürültü yayar. Bu gürültü, doğrudan bağlı mikrodeneleyici girişlerinde yanlış tetiklemelere, zamanlama hatalarına ve veri kayıplarına neden olabilir (Johnson ve Graham, 2003). Optik yarıiletkenler, bu gibi riskleri ortadan kaldırmak için geliştirilmiş etkili bir

çözümdür. Optokuplörler ve fototransistörler, ışık yoluyla sinyal iletimi sağlayarak elektriksel devreler arasında tam bir izolasyon sağlarlar. Bir optokuplörün içinde yer alan LED ışık kaynağı ve foto-alıcı (genellikle bir fototransistör veya fotodiyot), giriş ve çıkış arasında yalnızca optik bir bağlantı kurar. Böylece herhangi bir yüksek gerilim, akım darbesi veya elektromanyetik parazit, mikrodenetleyici tarafına doğrudan ulaşamaz (Baliga, 2010).

Kontrol sistemlerinde optik izolasyon kullanımı, yalnızca devre güvenliğini artırmakla kalmaz. Diğer taraftan sistemin uzun vadeli verimliliğini ve bakım sürekliliğini de olumlu yönde etkiler. Arıza oranlarının düşmesi, üretim hattında beklenmedik duruş sürelerinin azalması anlamına gelir. Özellikle 7/24 çalışan endüstriyel tesislerde, kontrol kartlarındaki küçük bir arıza bile tüm üretim sürecinin aksamasına neden olabilir ve bu da ciddi ekonomik kayıplar doğurur (Kazimierczuk, 2014).

Bununla birlikte, optik yarıiletkenlerin modern tasarımlarda sunduğu düşük güç tüketimi, yüksek anahtarlama hızları ve uzun ömür gibi avantajlar da göz ardı edilemez. Günümüzde kullanılan yüksek hızlı optokuplörler, birkaç nanosaniye düzeyinde geçiş süreleri sunabilmekte ve milyonlarca anahtarlama çevrimi boyunca stabil performans sergileyebilmektedir. Bu özellikler, özellikle hızlı veri iletişiminin kritik olduğu otomasyon ve robotik uygulamalarında büyük önem taşımaktadır (Mohan vd., 2003).

Ayrıca, optik yarıiletkenler sayesinde kontrol kartları yalnızca yüksek güçlü yüklerden değil, aynı zamanda ani gerilim değişimlerinden de korunmuş olur. Özellikle motorların ani durdurulması veya yön değiştirmesi sırasında oluşan geri besleme akımları, doğru şekilde izole edilmezse mikrodenetleyiciler üzerinde ciddi zararlar oluşturabilir. Bu durumun önlenmesi, yalnızca kartın kendisini korumakla kalmaz, aynı zamanda sistem genelinde daha kararlı bir çalışma ortamı yaratır (Neamen, 2012).

Günümüzde, gelişmiş optokuplör teknolojileri, içerdikleri Schmitt tetikleyici devreleri ve entegre fotodiyotlar sayesinde giriş sinyallerinde parazitlere karşı daha dirençli hale getirilmiştir. Böylece hem dijital hem de analog sinyallerin güvenli iletimi mümkün olabilmektedir. Bu tür gelişmeler, özellikle medikal cihazlar, havacılık elektroniği ve otomotiv sektörü gibi hata toleransının çok düşük olduğu uygulamalarda optik yarıiletkenlerin vazgeçilmezliğini artırmıştır (Cheng ve Zou, 2023).

Sonuç olarak, mikrodenetleyici kartlarının güç devrelerinden izole edilmesi yalnızca arızalardan korunmak için değil, aynı zamanda daha güvenli, daha verimli ve daha uzun ömürlü sistemler kurabilmek için bir zorunluluktur. Optik yarıiletkenler, sağladıkları yüksek izolasyon seviyesi, hızlı yanıt süreleri, düşük güç tüketimi ve uzun ömür avantajları ile bu ihtiyaca ideal çözümler sunmaktadır. Özellikle geleceğin endüstriyel otomasyon ve güç elektroniği sistemleri, daha fazla optik izolasyon tabanlı tasarımlarla şekillenecektir. Bu bağlamda, optik yarıiletkenlerin önemi giderek daha fazla artacak ve bu teknolojilere yönelik araştırmalar derinleşecektir.

2. Optik Yarıiletkenler ve Kullanım Alanları

Optik yarıiletken teknolojisi, ışığın üretimi, algılanması ve kontrolü için kullanılan yarıiletken malzemeleri kapsar. Bu teknoloji, genellikle galyum nitrid (GaN), silikon karbür (SiC) ve safir gibi geniş bant aralığına sahip malzemelerle ilişkilendirilir. Bu malzemeler, yüksek voltaj dayanımı, düşük iletim kayıpları ve yüksek sıcaklık toleransı gibi özellikleriyle güç elektroniği uygulamaları için idealdir. Optik yarıiletken teknolojisi, yalnızca güç devrelerinin performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda optoelektronik cihazlarla entegrasyon sayesinde sistem tasarımında yeni olanaklar sunar.

2.1. Yarıiletken Malzemeler ve Temel Özellikleri

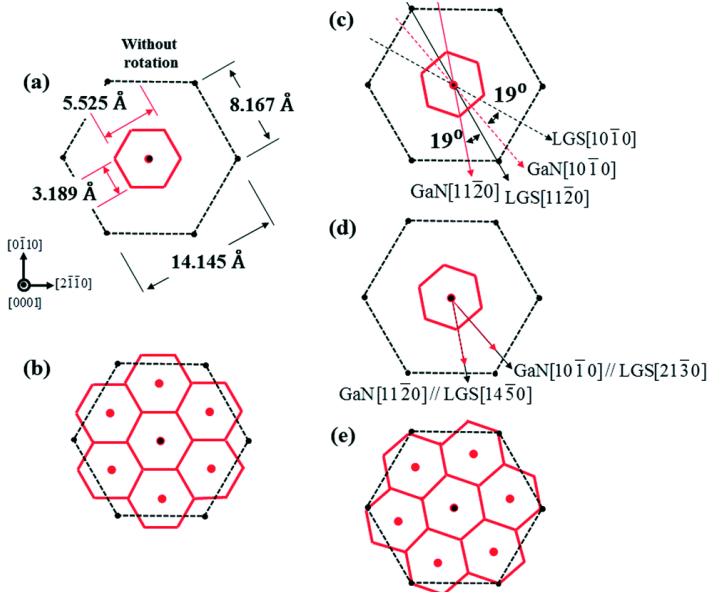
Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlik bakımından iletken ve yalıtkan malzemeler arasında yer alan, ısı, ışık ya da elektriksel alan gibi dış etkenlerle iletkenlik özelliklerini değiştirebilen özgün malzemelerdir. Modern elektronik teknolojisinin temel taşları olan yarıiletkenler, güç elektroniğinden iletişime, sağlık teknolojilerinden uzay uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu bağlamda, günümüzde özellikle geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler ön plana çıkmaktadır.

Bunlar arasında en dikkat çekenlerden biri olan Galliyum Nitrid (GaN), yüksek sıcaklık ve yüksek gerilim koşullarında çalışabilmesiyle bilinir. GaN, yaklaşık 3,4 eV genişliğinde bir bant aralığına sahiptir ve bu özelliği sayesinde yüksek gerilim dayanımı sunar. Ayrıca yüksek doyum hızı ve yüksek kırılma alanı değerleri, GaN'yi yüksek frekanslı ve yüksek güçlü uygulamalar için ideal kılar. Elektron hareketliliği silikon gibi geleneksel malzemelere kıyasla düşük olmakla birlikte, bu malzemenin diğer üstün elektriksel ve termal özellikleri,

onu güç elektroniği sistemleri için çok cazip bir seçenek haline getirmiştir. Termal iletkenlik kapasitesi de oldukça yüksektir, bu sayede GaN tabanlı cihazlar ısı yönetimi açısından avantaj sağlar.

Öte yandan, yarıiletken aygıtların üretiminde kullanılan alttaş malzemeler de performansı belirleyen temel unsurlardan biridir. Safir (Al_2O_3), bu anlamda geniş kullanım alanına sahip önemli bir alttaş malzemesidir. Safir kristalleri, yüksek mekanik dayanıklılık, mükemmel termal kararlılık ve olağanüstü elektriksel yalıtkanlık özellikleri ile öne çıkar. Erime sıcaklığı 2000°C 'nin üzerinde olan safir, kimyasal inert yapısı sayesinde agresif işlem ortamlarına da dayanıklıdır. Safir üzerine epitaksiyel olarak büyütülen GaN tabakaları, düşük kusur yoğunluğu ve yüksek kristal kalite sağlayarak optoelektronik aygıtların verimliliğini artırmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, safir üzerine MOCVD yöntemiyle büyütülen mavi LED yapıların yüksek performans sergilediğini göstermektedir (Altun, 2018).

Bu malzemelerin sunduğu elektriksel ve fiziksel avantajlar, güç elektroniği uygulamalarında hem performans artışı hem de uzun süreli güvenilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksek bant aralığına sahip yarıiletkenler sayesinde, cihazların çalışma sıcaklığı artmakta, anahtarlama hızları yükselmekte ve enerji kayıpları minimum seviyeye indirilebilmektedir.



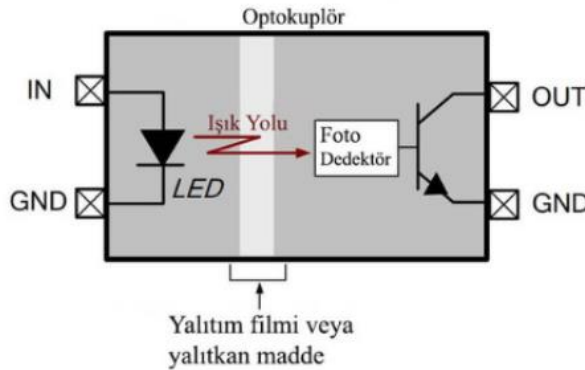
Şekil 1. Safir alttaş üzerinde GaN tabakası büyütülmesi.

Şekil 1’de Safir (Al_2O_3) alttaş üzerine GaN (Gallium Nitride) tabakasının epitaksiyel olarak nasıl büyütüldüğünü gösterilmektedir. GaN'nin safir alttaş üzerine büyütülmesi, kristal yapı uyumsuzluklarını azaltmak ve yüksek kaliteli yarıiletken tabakalar elde etmek için önemlidir. Bu yapı, özellikle yüksek performanslı LED'ler ve güç elektroniği uygulamaları için temel teşkil eder.

2.2. Optik Yarıiletkenler ve Çalışma Prensipleri

Optik yarıiletkenler, elektriksel sinyalleri ışık sinyallerine dönüştürerek bir başka ortamda elektriksel bağlantı kurmadan bilgi taşımayı mümkün kılan cihazlardır. Bu özellik, özellikle elektromanyetik girişim riskinin yüksek olduğu ortamlarda ya da elektriksel izolasyonun kritik olduğu sistemlerde optik yarıiletkenlerin kullanımını kaçınılmaz kılmıştır. Optokuplörler (optik izolatorler) bu teknolojinin en temel örneklerindendir. İç yapılarında bir ışık kaynağı (genellikle LED) ile bir ışık algılayıcı (fototransistör, fotodiyot, fototriyak) bulunur. LED'den yayılan ışık doğrudan algılayıcıya ulaşır ve böylece giriş ve çıkış devreleri arasında herhangi bir elektriksel temas olmadan sinyal iletimi sağlanır.

Optokuplörlerin başarısında kullanılan yarıiletken malzemenin kalitesi kritik rol oynar. GaN tabanlı LED'ler, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda daha hızlı anahtarlama kapasitesi ve düşük güç tüketimi ile önemli avantajlar sunar. GaAs tabanlı LED'ler ise kızılötesi spektrumda çalışarak daha uzun mesafelerde daha düşük kayıplı iletişim imkânı verir. Fototransistörler ise, algıladıkları ışık miktarına bağlı olarak kolektör akımını değiştirerek elektriksel çıkış sağlarlar. Şekil 2’de gösterildiği gibi gelen optik sinyal, elektriksel olarak güçlendirilir ve güvenilir veri aktarımı sağlanır.



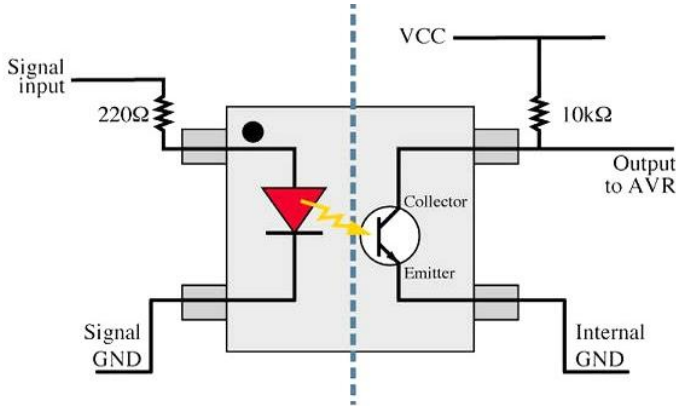
Şekil 2. Optik Yarıiletkenlerin Güç Devrelerindeki Kullanımı

2.3. Optik Yarıiletkenlerin Güç Devrelerindeki Kullanımı

Optik yarıiletkenlerin güç devrelerinde kullanımı, sistem güvenliğinin ve güvenilirliğinin artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Güç elektroniği devreleri, yüksek akım ve yüksek gerilim seviyelerinde çalıştıkları için, devre arızalarının mikrodenetleyici kartlarına zarar verme riski oldukça yüksektir. Bu tür durumlarda doğrudan bağlantılar üzerinden iletilen gerilim darbeleri, mikrodenetleyici üzerindeki hassas yapıları tahrip edebilir, veri işleme kapasitelerinde kayıplara veya tamamen devre dışı kalmalarına neden olabilir.

Bu bağlamda optokuplörler, mikrodenetleyici ile güç devresi arasındaki izolasyonu sağlayarak kritik bir görev üstlenir. Güç devresinde oluşabilecek aşırı gerilim, ters akım veya elektromanyetik girişim gibi olumsuzlukların mikrodenetleyici devresine doğrudan ulaşmasını önler. Bu izolasyon sayesinde kontrol kartları daha uzun ömürlü olurken, sistemlerin bakım maliyetleri düşmekte ve genel verimlilik artmaktadır.

Günümüzde elektrikli motorlar, endüstriyel ısıtıcılar, robotik sistemler gibi yüksek akım çeken uygulamalarda optik izolasyon bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu uygulamalarda kullanılan optokuplörler, hızlı anahtarlama yetenekleri sayesinde PWM (Pulse Width Modulation) tabanlı sürücü devrelerinde de sorunsuz çalışabilmektedir. Ayrıca yeni nesil GaN tabanlı optokuplörler, geleneksel silikon tabanlı çözümlere kıyasla daha düşük gecikme süreleri ve daha yüksek izolasyon gerilimleri sunarak sistem performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 3'te gösterildiği gibi sürücü tarafından optik sinyal ile yüksek voltajlı bir sürücü devresi tetiklenebilir.



Şekil 3. Mikrodenetleyici ve yüksek güçlü yük arasında optokuplör izolasyonu.

2.4. Optik Yarıiletkenlerin Sınırlamaları

Optik yarıiletkenler, sağladıkları avantajlara rağmen bazı sınırlamalara sahiptir. GaN tabanlı optokuplörlerin üretim maliyetleri, silikon tabanlı çözümlere göre daha yüksektir, bu da yaygın kullanımını kısıtlayabilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda LED verimliliğinin azalması, uzun süreli kullanımda izolasyon kalitesini etkileyebilir. Bazı uygulamalarda optokuplörlerin fiziksel boyutları, entegre devre tasarımlarını zorlaştırabilir. Bu sınırlamaların aşılması için SiC ve hibrit malzemeler gibi yeni teknolojiler üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir.

2.5. Gelecek Perspektifi: Yüksek Performanslı Optik Yarıiletkenler

Gelişen teknoloji ile birlikte, optik yarıiletkenlerin performans beklentileri de artmaktadır. Daha düşük güç tüketimi, daha yüksek anahtarlama hızları, daha küçük boyutlar ve daha yüksek sıcaklık dayanımı gibi kriterler, yeni nesil yarıiletkenlerin geliştirilmesine yön vermektedir. GaN ve safir gibi gelişmiş malzemelerin sağladığı yüksek bant aralığı, termal kararlılık ve kimyasal direnç gibi avantajlar, optik yarıiletken teknolojilerinin daha da ileriye taşınmasına olanak sağlamaktadır.

Yapılan araştırmalar, safir gibi yüksek kaliteli alttaşların kullanılmasıyla üretilen GaN tabanlı optik elemanların daha düşük hata oranlarıyla çalıştığını ve daha uzun ömürlü olduğunu göstermektedir. Bu durum özellikle güç elektroniği uygulamalarında, yüksek güvenilirlik ve düşük bakım maliyeti gereksinimleri için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Önümüzdeki yıllarda, safir tabanlı GaN teknolojisinin hem güç elektroniği hem de haberleşme teknolojilerinde daha yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

3. Kontrol Kartlarında Arıza Türleri ve Optik İzolasyonun Önemi

Elektronik kontrol kartları, endüstriyel otomasyon sistemlerinden medikal cihazlara kadar birçok uygulamada, düşük güçlü kontrol birimleri ile yüksek güçlü yüklerin entegrasyonunda merkezi bir rol üstlenmektedir. Bu kartlar, genel itibarıyla mikrodenetleyici tabanlı bir çekirdekten, çeşitli sürücü devrelerinden ve güç elektroniği ara yüzlerinden oluşur. Ancak kontrol kartlarının uzun süreli güvenilirliği ve işlevselliği, maruz kaldıkları elektriksel,

termal ve mekanik streslerin bir sonucu olarak ciddi şekilde tehdit altındadır. Özellikle yüksek güçlü yüklerin doğrudan mikrodenetleyici sistemlere bağlanması, çeşitli arıza mekanizmalarını tetiklemekte ve sistem performansını olumsuz etkilemektedir (Horowitz ve Hill, 2015; Baliga, 2010).

Kontrol kartlarında ortaya çıkan başlıca arıza türleri arasında aşırı gerilim darbeleri, elektromanyetik girişim (EMI), termal aşırı yüklenme ve korozyon kaynaklı izolasyon kaybı yer almaktadır. EMI, mikrodenetleyici girişlerinde yanlış tetiklemelere neden olabilir (Chen ve Gaskill, 2023). Yüksek sıcaklıklarda difüzyon süreçleri, yarıiletken performansını düşürür (Wang vd., 2022). Özellikle endüktif yüklerin anahtarlanması sırasında meydana gelen ani gerilim artışları, kart üzerindeki MOSFET, IGBT ve mikrodenetleyici giriş/çıkış pinlerinde geri dönüşümsüz fiziksel tahribatlara yol açabilmektedir (Mohan vd., 2003). Bu tip arızaların temel nedeni, yük devresinden kaynaklanan yüksek enerjili geçişlerin kontrol devresine doğrudan iletilmesidir. Bu tür darbeler, yarı iletkenlerin kırılma gerilimini aşarak kalıcı kısa devrelere veya açık devre hatalarına neden olabilir. Özellikle Baliga (2010) çalışmasında belirtildiği gibi, silikon ve GaN tabanlı güç elemanlarının dahi yüksek kırılma alanlarına rağmen bu tip geçici etkilere karşı sınırlı dayanıklılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Termal kaynaklı arızalar ise daha çok uzun dönemli çalışma koşullarında ön plana çıkmaktadır. Yarı iletken cihazlar, sürekli olarak sınırlarına yakın sıcaklıklarda çalıştıklarında, iç yapılarında atomik düzeyde difüzyon süreçleri başlar ve bu da komponentlerin performansını zamanla düşürür (Jespen ve Pecht, 2021). Isıl genleşme ve daralma döngüleri, PCB lehim bağlantılarında mikroskobik çatlaklara sebep olurken, devre izleri üzerinde metal yorulmasına yol açmaktadır. Ayrıca, nem ve kirlilik gibi çevresel faktörlerin etkisiyle yüzey akımları artmakta ve bu da düşük seviyeli kaçak akımlar veya kısa devreler oluşmasına neden olmaktadır (Black, 1969).

Bu noktada, optik izolasyonun kontrol kartlarının güvenilirliğini artırmada oynadığı rol son derece kritiktir. Optik izolasyon, sinyal iletimi sırasında fiziksel temasın kesilmesi prensibine dayanır. Yani veri, bir optokuplörün içindeki LED tarafından ışığa dönüştürülür, ardından bu ışık bir fotodedektör tarafından algılanır ve tekrar elektriksel sinyale çevrilir. Bu yöntem sayesinde, mikrodenetleyici kart ile yüksek güçlü yük devresi arasında doğrudan bir elektriksel bağlantı bulunmaz. Optokuplörler, bu yapıları

sayesinde hem aşırı gerilim darbelerine hem de elektromanyetik girişimlere karşı oldukça etkili bir koruma sağlamaktadır (Paul ve Hardin, 2023).

Optik izolasyonun sağladığı en büyük avantajlardan biri, farklı toprak potansiyellerine sahip sistemler arasında güvenli veri alışverişini mümkün kılmasıdır. Özellikle endüstriyel tesislerde, büyük motorlar, transformatörler ve uzun kablolama hatları nedeniyle oluşan topraklama potansiyel farkları, kontrol kartlarına zarar verebilecek akımlar oluşturabilmektedir. Optik izolasyon, bu potansiyel farkların doğrudan kontrol devresine yansımaları engelleyerek hem cihaz ömrünü artırır hem de kullanıcı güvenliğini sağlar (Mohan vd., 2003; Horowitz ve Hill, 2015).

Bu tür koruma sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermek adına, tipik bir uygulama örneği üzerinden konuyu somutlaştırmak mümkündür. Şekil 3'de görüldüğü üzere, bir mikrodenetleyici (STM32) tarafından sürülen bir röle modülü, 4N35 tipi bir optokuplör üzerinden izole edilmiştir. Bu konfigürasyonda mikrodenetleyici yalnızca optokuplörün LED'ini sürerken, yük tarafı (220V AC ile çalışan bir ısıtıcı) tamamen bağımsız bir güç kaynağından beslenmektedir. Böylece hem yük devresinden kaynaklanabilecek geçici etkilerden mikrodenetleyici korunmakta hem de olası arızalar sistemin geri kalanına yayılmadan lokalize edilmektedir.

Sonuç olarak, kontrol kartlarında arıza risklerini minimize etmek ve uzun dönemli sistem güvenilirliği sağlamak için optik izolasyonun entegre edilmesi artık bir tasarım opsiyonu değil, zorunluluk halini almıştır. Özellikle güç elektroniği içeren modern endüstriyel sistemlerde, doğru seçilmiş bir optokuplör ile sistem izolasyonunun sağlanması, arıza oranlarını ciddi ölçüde azaltmakta ve bakım maliyetlerinde önemli tasarruflar sağlamaktadır. Bununla birlikte, yeni nesil GaN ve SiC tabanlı optik izolasyon teknolojilerinin de daha yüksek anahtarlama hızları ve daha iyi elektromanyetik uyumluluk özellikleri sunduğu literatürde vurgulanmaktadır (Baliga, 2010; Paul ve Hardin, 2023).

4. Optik Yarıiletkenlerin Sağladığı Kararlılık ve Güvenilirlik

Optik yarıiletkenler, güç elektroniği ve kontrol sistemleri tasarımında hem kararlılık hem de güvenilirlik açısından kritik roller üstlenmektedir. Optokuplörler, fototransistörler, fototriyistler gibi optik yarıiletken aygıtlar, mikrodenetleyici gibi hassas kontrol birimleri ile yüksek güçlü yükler arasında hem galvanik izolasyon sağlayarak hem de elektriksel etkileşimleri minimize

ederek sistem performansını doğrudan artırmaktadır (Baliga, 2010; Paul ve Hardin, 2023).

Özellikle mikrodenetleyiciler gibi düşük güçlü lojik sistemler, yüksek voltaj darbeleri, ani akım değişimleri ve elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı son derece hassastır. Geleneksel röle tabanlı izolasyon yöntemleri, mekanik aşınma ve sınırlı anahtarlama hızları nedeniyle modern elektronik sistemlerin gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Buna karşın, optik yarıiletken teknolojileri, hem temas gerektirmeyen bir anahtarlama sağlamakta hem de elektromanyetik parazit oluşturmada çok daha hızlı bir veri ve kontrol sinyali iletimine imkân vermektedir (Horowitz ve Hill, 2015).

Optik izolasyonun sistem kararlılığı üzerindeki etkileri çok yönlüdür. Öncelikle, optokuplörler sayesinde giriş ve çıkış tarafları arasında yüksek izolasyon voltajı (tipik olarak 2,5 kV–5 kV arası) sağlanmaktadır. Bu yüksek izolasyon voltajı, kontrol kartının yük devresinden kaynaklanabilecek aşırı voltaj darbelerinden korunmasını garanti altına alır. Böylece, mikrodenetleyicinin çalışması sırasında voltaj dalgalanmalarından kaynaklanan resetlenme, latch-up veya kalıcı hasar gibi olumsuzlukların önüne geçilir (Jespen ve Pecht, 2021).

Güvenilirlik boyutunda ise optik yarıiletkenler, mekanik temaslı elemanların aksine, hareketli parça içermediklerinden dolayı uzun süreli kullanımlarda aşınmaya uğramazlar. Bu özellik, endüstriyel otomasyon sistemlerinde yıllarca bakım gerektirmeden güvenilir çalışmayı mümkün kılmaktadır. Nitekim yapılan uzun süreli hızlandırılmış yaşlandırma testlerinde, kaliteli optokuplörlerin ortalama arıza öncesi süresinin (MTTF) 1 milyon saatten fazla olduğu raporlanmıştır (Baliga, 2010).

Optik yarıiletkenlerin termal performansı da sistem güvenilirliğini doğrudan etkileyen bir diğer faktördür. Safır altlık üzerine büyütülen GaN tabanlı LED yapılarının, yüksek termal iletkenlikleri ($\sim 1.3 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$) sayesinde çalışma sıcaklıklarının etkin bir şekilde yönetilebildiği gösterilmiştir (Altun, 2018). Bu durum, LED'in verimli çalışmasını ve optokuplör içerisindeki fotodedektör kısmının kararlı yanıt vermesini sağlar. Termal denge, optik aygıtın zamanla bozulan ışık verimi (lumen depreciation) problemini minimize eder ve izolasyon kalitesinin düşmesini engeller.

Dahası, optik yarıiletkenlerin sunduğu elektriksel özellikler, sistemlerdeki kararsızlık kaynaklarını azaltır. Özellikle düşük kapasitanslı

optokuplörlerin kullanılması, hızlı anahtarlama uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Düşük giriş-çıkış kapasitansı (<1 pF seviyesinde) ve yüksek Common-Mode Rejection Ratio (CMRR $> 10^5$) değerleri sayesinde, özellikle motor sürücüler ve inverter sistemlerinde yükten kaynaklı gürültülerin kontrol devresine yansması etkin bir şekilde engellenmektedir (Paul ve Hardin, 2023; Mohan vd., 2003).

Öte yandan, optik yarıiletken izolasyonunun yalnızca doğrudan koruma değil, aynı zamanda hata yönetimi ve teşhis süreçlerine de katkıda bulunduğu unutulmamalıdır. İzole edilen sinyaller üzerinden gerçekleştirilen hata izleme sistemleri (fault monitoring), röle kontaklarından farklı olarak çok daha düşük seviyeli sinyallerin izlenmesine imkân tanır. Böylece arıza öncesi semptomlar (izolasyon direncindeki düşüşler veya geçici akım yükselmeleri) erken evrede tespit edilerek bakım faaliyetleri planlanabilir (Jespen ve Pecht, 2021). Örnek bir uygulama olarak, bir elektrikli araç batarya yönetim sisteminde (BMS) optokuplörlerin kullanımı incelenebilir. BMS, batarya hücrelerinin voltajını izler ve aşırı gerilim veya kısa devre gibi hataları tespit eder. Optokuplörler, yüksek voltajlı batarya hücrelerinden mikrodenetleyiciye sinyal iletiminde galvanik izolasyon sağlayarak hem güvenliği artırır hem de elektromanyetik gürültüyü azaltır (Zhang ve Wang, 2023).

Sonuç olarak, optik yarıiletken teknolojileri, kontrol kartlarında hem kararlılığın hem de uzun dönemli güvenilirliğin sağlanmasında vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Modern elektronik sistemlerde optik izolasyon kullanımı, yalnızca mevcut standartları karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda sistem ömrünü uzatarak toplam sahip olma maliyetlerini düşürmektedir. Özellikle yeni nesil GaN tabanlı optik cihazların, daha yüksek anahtarlama hızları ve artırılmış termal dayanım değerleriyle birlikte yakın gelecekte güç elektroniği alanında daha fazla benimsenmesi beklenmektedir.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Optik yarıiletkenlerin güç devrelerinde izolasyon sağlamadaki kritik rolü, kontrol kartlarının güvenilirliğini artırmadaki etkileri ve farklı uygulama alanlarındaki potansiyeli detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Optik izolasyon, yüksek voltaj darbeleri ve elektromanyetik girişimi önleyerek sistem kararlılığını artırırken, GaN ve SiC gibi yeni malzemeler daha yüksek anahtarlama hızları ve termal dayanım sunmaktadır. Ancak, maliyet ve

entegrasyon zorlukları gibi sınırlamalar, gelecekteki araştırmalar için önemli bir odak noktasıdır. Optik yarıiletken teknolojileri, özellikle güç elektroniği sistemlerinde mikrodenetleyici tabanlı kontrol kartları ile yüksek güçlü yükler arasındaki iletişimde izolasyon sağlama açısından kritik önem taşımaktadır. Bu teknolojilerin uygulama alanları yalnızca geleneksel motor kontrolü veya ısıtıcı devreleri ile sınırlı kalmayıp, günümüzde yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araçlar, tıbbi cihazlar, endüstriyel otomasyon, askeri ve havacılık uygulamaları gibi çok daha geniş bir yelpazeye yayılmıştır (Baliga, 2010; Horowitz ve Hill, 2015).

Özellikle güneş enerjisi invertörleri, rüzgâr türbinleri ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan güç dönüştürücü devreler, yüksek voltaj ve akım seviyelerinde çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde mikrodenetleyiciler, yük paylaşımı, akım koruması ve veri iletişimi gibi görevler üstlenmektedir. Optik izolasyon burada yalnızca güvenli bir kontrol yolu oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda hızlı anahtarlama gerektiren senaryolarda, elektromanyetik paraziti minimize ederek enerji verimliliğini de artırır (Mohan vd., 2003). Elektrikli araç (EV) teknolojileri, optik yarıiletkenlerin gelecekteki kullanım potansiyelinin en yüksek olduğu diğer bir alanı oluşturmaktadır. Bir EV içerisinde batarya yönetim sistemleri (BMS), motor sürücüler, şarj kontrolörleri ve enerji geri kazanım sistemleri gibi alt sistemler arasında güvenli ve güvenilir iletişim büyük önem taşımaktadır. Bu noktada, GaN tabanlı optik aygıtların sunduğu yüksek hızlı anahtarlama kabiliyetleri ve düşük güç tüketimi, araç içi ağların daha verimli çalışmasına olanak sağlamaktadır (Jespen ve Pecht, 2021). Tıbbi cihazlarda, MRI makineleri veya implant edilebilir tıbbi cihazlar gibi ortamlarda, hasta güvenliği açısından izolasyon standartları son derece katıdır. Optik yarıiletken izolasyonu sayesinde, cihaz içerisindeki düşük güçlü veri işleme birimleri ile yüksek voltaj üniteleri arasındaki izolasyon kolaylıkla sağlanabilmekte ve böylece hasta güvenliği önemli ölçüde artırılabilmektedir (Paul ve Hardin, 2023).

Endüstriyel otomasyon sistemlerinde ise PLC'ler (Programmable Logic Controllers), servo motor sürücüler ve robotik sistemler gibi birçok farklı alt sistemin güvenilir ve uzun ömürlü çalışması, büyük oranda doğru izolasyon tekniklerinin kullanımına bağlıdır. Yüksek hızlı üretim hatlarında saniyede binlerce anahtarlama işlemi gerçekleştirilirken, optokuplörler düşük gecikme

süreleri ve yüksek frekans yanıtları ile sistem stabilitesini korumaktadır (Horowitz ve Hill, 2015).

Gelecek öngörülerini açısından değerlendirildiğinde, optik yarıiletken teknolojilerinde üç temel eğilim öne çıkmaktadır. Birincisi, GaN (Galyum Nitrür) ve SiC (Silisyum Karbür) gibi geniş bant aralıklı yarıiletken malzemelerin kullanımının artmasıdır. Bu malzemeler sayesinde, optik aygıtlar daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek, daha yüksek anahtarlama frekanslarına ulaşacak ve daha düşük kayıplarla sistem verimliliğini artıracaktır (Baliga, 2010). İkincisi, entegre optoelektronik sistemler kavramıdır. Gelecekte mikrodenetleyici sistemleri ve optik izolasyon birimleri, ayrı ayrı modüller yerine tek bir çip üzerinde entegre edilecektir. Bu yaklaşım, sistem hacmini küçültürken aynı zamanda güvenilirlik ve sinyal bütünlüğünü de artıracaktır (Mohan vd., 2003). Üçüncüsü ise, yapay zeka destekli sistemlerin daha fazla devreye girmesiyle, optik izolasyon katmanlarının hem veri toplama hem de anlık karar verme süreçlerinde daha aktif roller üstleneceğidir. Özellikle prediktif bakım (predictive maintenance) algoritmalarıyla çalışan akıllı kontrol sistemlerinde, optik izolasyon birimleri hem koruma hem de bilgi kaynağı rolü üstlenmeye başlayacaktır (Jespen ve Pecht, 2021).

Sonuç olarak, optik yarıiletken teknolojileri bugün güç elektroniği sistemlerinde güvenlik, kararlılık ve verimlilik açısından vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Gelecekte bu teknolojinin daha da entegre, daha hızlı ve daha enerji verimli hale geleceği öngörülmektedir. Bu gelişmeler, kontrol kartı tasarımcılarına daha yüksek güvenlik seviyeleri, daha uzun ömürlü sistemler ve daha düşük maliyetli çözümler sunacaktır.

KAYNAKLAR

- Altun, D. (2018). Safır alttaşı üzerine MOCVD ile büyütülen mavi LED yapısının elektriksel karakterizasyonu (Doktora tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi).
- Baliga, B. J. (2010). *Fundamentals of power semiconductor devices* (2nd ed.). Springer.
- Blaabjerg, F., Wang, H., & Ma, K. (2021). *Power electronics for renewable energy systems, transportation, and industrial applications* (2nd ed.). Wiley.
- Black, J. R. (1969). Electromigration—A brief survey and some recent results. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 16(4), 338–347.
- Chen, Q., & Gaskill, D. K. (2023). Electromagnetic interference mitigation in power electronics. *Journal of Power Electronics*, 23(2), 189–200.
- Cheng, K. W. E., & Zou, Y. (2023). *Optoelectronic devices and systems*. Springer.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The art of electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Jespen, T. C., & Pecht, M. (2021). Reliability assessment of advanced packaging for electronics. *Microelectronics Reliability*, 124, Article 114298.
- Johnson, H. W., & Graham, M. (2003). *High-speed digital design: A handbook of black magic*. Prentice Hall.
- Kazimierzczuk, M. K. (2014). *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. Wiley-IEEE Press.
- Khan, M. A., Skromme, B. J., Gaskill, D. K., & Chen, Q. (2015). High performance GaN-based optoelectronics. *Journal of Applied Physics*, 117(11), Article 112801.
- Mishra, U. K., Parikh, P., & Wu, Y.-F. (2002). AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications. *Proceedings of the IEEE*, 90(6), 1022–1031.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: Converters, applications, and design* (3rd ed.). Wiley.
- Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor physics and devices* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

- Paul, C. R., & Hardin, K. B. (2023). *Electromagnetic compatibility: Principles and applications* (3rd ed.). Wiley.
- Wang, H., Blaabjerg, F., & Ma, K. (2022). Reliability of power electronic systems under harsh environments. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(5), 5123–5135.
- Zhang, L., & Wang, Z. (2023). Battery management systems in electric vehicles: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(4), 3456–3468.

BÖLÜM 2

TAHİL BAZLI UNLU MAMULLERİN PROBIYOTİKLERLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE SON GELİŞMELER

Prof. Dr. Ahmet Şükrü DEMİRCİ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214767>

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. ademirci@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5252-8307

1. GİRİŞ

Son yıllarda toplum, gıda tüketimi ile kişisel sağlık arasındaki mevcut ilişkinin daha fazla farkına varmıştır. Buna bir yanıt olarak, gıda bilimcileri ve endüstrisi sadece daha besleyici gıdaların değil, aynı zamanda tüketicisine ekstra sağlık yararı sağlayan gıdaların tasarımı ve geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır, bunlar fonksiyonel gıdalar olarak bilinmektedir (Siro vd., 2008). Günümüz tüketici pazarında sağlıklı beslenme bir önceliktir ve bu da bu tür ürünlere yönelik talebin artmasına yol açmaktadır. İnsan sağlığını desteklemek için bağırsak mikrobiyotası üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Probiyotik gıdalar, sağlığa faydaları nedeniyle tüketiciler arasında popülerdir (Areppally vd., 2022).

Probiyotikler, yeterli miktarda tüketildiklerinde bağırsak mikrobiyal dengesini koruyarak konakçıya sağlık açısından fayda sağlayan canlı mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (FAO/WHO, 2002). Probiyotiklerin sağlığa faydaları suşa bağlı olup, bunların tıbbi, terapötik, farmasötik, kozmetik ve gıda endüstrileri alanında birçok potansiyel uygulamaları bulunmaktadır. Özellikle *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* ticari olarak en çok kullanılan probiyotiklerdir ve her ikisi de bağırsak mikroplarının bir kısmını oluşturmaktadır (Arrieta vd., 2014). Bağırsak mikrobiyomu oral probiyotik alımıyla desteklenebilmektedir. Tüketici probiyotiklerden gıda ürünleri (fermente edilmiş veya edilmemiş) veya diyet takviyeleri (toz, kapsül veya tablet formlarında) şeklinde yararlanabilmektedir. Bu ürünlerin sağlık yararları sağlamak için tüketim sırasında en az 10^7 kob/mL veya g son ürün canlı sayısına sahip olması gerekmektedir (Yao vd., 2020). Probiyotiklerin gıda yoluyla tüketimi, tıbbi tedaviden ziyade sağlığı iyileştirmek için yeni ve uygun maliyetli bir yöntemdir ve bu da araştırmacıları yenilikçi yeni probiyotik fonksiyonel gıdalar geliştirmeye teşvik etmiştir.

Potansiyel fonksiyonel gıdalar oluşturmak için probiyotikler çeşitli gıda ürünlerine dahil edilmişlerdir. Özellikle probiyotik süt bazlı gıdalar yaygın olarak geliştirilmiştir. Ancak bu ürünlerin laktoz intoleransı, soğuk depolama ihtiyacı, süt proteinlerine karşı alerjenlik, yüksek yağ ve kolesterol içeriği gibi bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar göz önüne alındığında, probiyotik unlu mamullerin yenilikçi bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmasıyla birlikte çeşitli süt ürünü olmayan probiyotik ürünler geliştirilmiştir (Areppally vd., 2022; Mani-Lopez vd., 2023). Bununla birlikte, pişirme sırasında

kullanılan yüksek sıcaklıklar nedeniyle tahıl bazlı unlu mamullere probiyotik eklenmesi zor bir uygulamadır. Probiyotiklerin tahıl bazlı unlu mamullere dahil edilmesine yönelik en uygun yöntemleri belirlemek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Ana stratejiler arasında mikrokapsüllenmiş probiyotikler, probiyotik içeren yenilebilir filmler, spor oluşturan bakteriler ve pişirme sonrasında probiyotik eklenmesi yer almaktadır. Çeşitli çalışmaların sonuçları, prebiyotikler veya probiyotikler kullanılarak fonksiyonel unlu mamuller geliştirmenin fizibilitesini göstermiştir. Bu çalışmalarda, probiyotiklerin tahıl bazlı unlu mamullere dahil edilmesinin hacim, spesifik hacim, tekstür gibi çeşitli teknolojik parametrelerin yanı sıra lezzet ve aroma gibi duysal parametreleri de iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Seyedain-Ardabili vd., 2016). Probiyotiklerin etkinliği, gıda uygulamalarında kullanım için güvenli olmalarına ve suş türüne bağlıdır (Şekil 1).

Bu derleme, tahıl bazlı unlu mamul kategorisindeki probiyotik ürünleri ön plana çıkarmakta ve probiyotik unlu mamullerle ilgili bilimsel literatürü ve araştırmaları özetlemektedir. Ayrıca mikrokapsülleme, spor oluşturan bakteriler, yenilebilir filmler ve pişirme sonrasında hücrelerin doğrudan eklenmesi gibi probiyotik tahıl bazlı fırınlanmış gıdaların geliştirilmesine yönelik ana stratejilerin gözden geçirilmesi amaçlanmıştır. Pişirmeden önce hücrelerin doğrudan eklenmesiyle hücre canlılığı da gözden geçirilmiştir. Probiyotiklerin gıdalardaki fizikokimyasal ve duysal etkileri de tartışılmıştır.

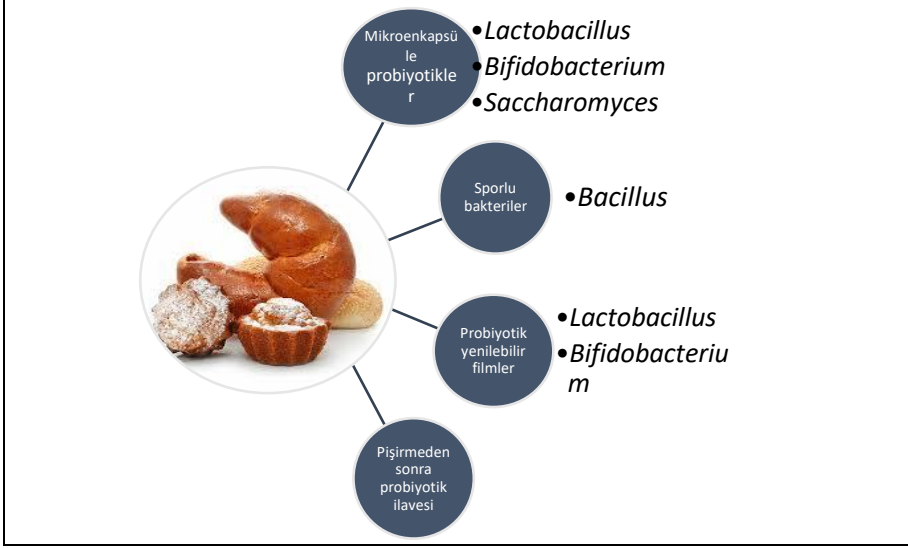


Şekil 1. Gıda uygulamalarında probiyotik güvenliğinin değerlendirilmesi (Arepally vd., 2022).

Tahıl bazlı unlu mamullerde probiyotikler

Rekabetçi bir pazarda unlu mamullerin artan popülaritesiyle birlikte, pazar fırsatlarına yanıt olarak yeni ürünler geliştirilmekte ve çeşitli marka isimleri altında pazarlanmaktadır. Probiyotikler, besinsel faydaları arttırmak için unlu mamullere yeterli miktarda eklenebilir. Unlu mamullerin gıda matrisi, probiyotiklerin büyümelerini teşvik etmek için adeta yakıt görevi gören prebiyotikler de içermektedir (Shori, 2016). Vegan tüketici pazarının büyümesi, gıda endüstrisini probiyotik gıdalar geliştirmek için yeni gıda matrisleri aramaya teşvik etmiştir (Pimentel vd., 2021). Bu arayışta, tahıllar, psödotahıllar, arpa, darı, yulaf, pirinç, sorgum, kinoa, mısır ve meyveler yer almakta olup, bunlar içerisinde unlu mamuller uygun ve ilgi çekici matrislerdir (Shori, 2016). Bununla birlikte, proses koşulları probiyotiklerin unlu mamullere dahil edilmesi için, uygulanabilirliklerinin önündeki en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Pişirme, ürüne bağlı olarak farklı sıcaklık/zaman kombinasyonlarında çalıştırılan çeşitli pişirme fırını türleriyle (Cappelli vd., 2021) elde edilebilen geleneksel, mikrodalga, kızılötesi destekli mikrodalga, buhar ve vakumlu pişirme gibi farklı teknolojiler kullanılarak genellikle 160 ila 250 °C arasında yüksek sıcaklık uygulanmasını gerektirmektedir.

Probiyotiklerin farklı şekillerde (Şekil 2) unlu mamüllere ilavesine yönelik bilgiler alt başlıklar halinde verilmiştir.



Şekil 2. Tahıl bazlı fırınlanmış gıdalarda probiyotik takviyesi stratejileri (Mani-Lopez vd. 2023).

Tahıl bazlı fırınlanmış gıdalara doğrudan probiyotik ilavesi

Probiyotik hücrelerinin ısıya duyarlı olduğu iyi bilinmektedir. Genel olarak, artan sıcaklıklar termal inaktivasyon oranını desteklerken, nem içeriğinin azaltılması ise yavaşlatmaktadır (Foerst ve Kulozik, 2012). Pişirme sırasında, ekmeğin yüzeyinde (kabuğunda) başlayan ısı transferi nedeniyle kabukta iç kısımdan daha yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Probiyotiklerin (canlı hücreler) hamur ürünlerinde pişirildikten sonra canlı kalmasına yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur. Genel olarak bu çalışmalarda, kullanılan probiyotiklerde önemli canlılık kayıpları ($3,3-6,7 \log_{10}$ kob/g) gözlenmiştir ve canlı kalanlar gerekli probiyotik dozlarını ($> 10^7$ kob) sağlamak için düşük kalmıştır. Pişirme sırasında bu ürünlerdeki probiyotik canlılığını korumak veya sonrasında bakteri takviyesi yapmak için stratejiler geliştirmek gerekmektedir. Tahıl bazlı gıdaların depolanması sırasında probiyotiklerin canlılığının incelenmesi de kritik öneme sahiptir. Zhang vd. (2018), polietilen (PE) torbalarda (30 g'lık parçalar, 175 °C, 8 dakika) paketlenmiş ekmeğin probiyotik (*L. rhamnosus* P8) canlılığını 25 °C ve %55 bağıl nemde beş günlük depolama süresince değerlendirmiştir. Pişirme ve iki günlük depolama sonrasında benzer sayılar

kaydedilmiştir (kabuk için $\sim 5 \log_{10}$ kob/g, ekmek içi için $3-4 \log_{10}$ kob/g); üç günlük depolama sonrasında kabuk ve iç kısımda bakteri üremesi gözlenmiştir. Lag fazında (2 gün), hücreler hücresel ısı hasarından kurtulmuş ve ekmeğe adapte olmuştur. Beş günün sonunda kabuk için $8 \log_{10}$ kob/g ve ekmek içi için $5,94 \log_{10}$ kob/g canlı hücre rapor edilmiştir. Buna karşılık, 4°C 'de saklanan keklerde *L. plantarum* ATCC 8014, on gün sonra yalnızca $0,3 \log_{10}$ kob/g geri kazanılmış ve 14 gün sonra $0,6 \log_{10}$ kob/kek azalmıştır (Dong vd., 2020b). Kap keklerdeki önemli oranda canlılık kaybı depolama sıcaklığı ile ilişkilendirilebilir. Ekmek (Zhang vd., 2018) veya keklerde bol miktarda besin maddesi bulunduğundan bakterilerin yeniden gelişimi için uygundur; ancak düşük sıcaklıklar geri kazanımlarını geciktirebilir. Probiyotiğin depolama sırasında ekmekte gelişme kabiliyeti, tüketimden önce canlı sayısını artırmak için bir avantaj olabilir. Genel olarak, ürünlerin fizikokimyasal özellikleri probiyotik hücrelerden etkilenmemiştir. Probiyotik olarak *B. lactis* Bb12'nin ekmeğe dahil edilmesi, pişirme işlemi sırasında veya kısa süreli depolama sonrasında (3 gün) ekmeğin fizikokimyasal özelliklerini (nem içeriği, aw, pH) değiştirmemiştir (Zhang vd., 2014). Başka bir çalışmada, *L. plantarum* P8 eklenen ekmeğin pH ve titre edilebilir asitliği, pişirme sonrasında kontrolden önemli ölçüde farklı ($p < 0,05$) bulunmuştur (Zhang vd., 2018).

Mikroenkapsüle probiyotiklerin eklenmesi

Mikroenkapsülasyonun genel tanımı; 'Bir bileşiğin veya sistemin immobilizasyonu, korunması, kontrollü salınımı, yapılandırılması ve işlevselleştirilmesi için bir malzeme içine hapsedilmesi' şeklindedir. Mikroorganizmaların konakçıya olan yararlı etkilerini korumak ve arttırmak için mikroenkapsülasyon uygulaması, organizmanın üretim sürecinde ve üst gastrointestinal yolda hayatta kalabilmesi için bir strateji haline gelmiştir (Barajas-Álvarez vd., 2021). Genel olarak, karşılaşılan engellere karşı hapsedilen malzemenin üzerinde koruyucu bir tabaka sağlayan ve dış koruyucu tabaka yırtıldığında çekirdek malzemeyi serbest bırakan fizikokimyasal veya mekanik bir işlemdir. Ayrıca olumsuz tat ve aromayı maskeleyen avantajı sunmakta, taşıma ve depolamayı kolaylaştırmaktadır (De Prisco ve Mauriello, 2016).

Probiyotik kapsülleme, hücreleri olumsuz koşullardan koruyarak proses sırasında meydana gelebilecek yaralanma veya hücresel hasarı

engellemektedir. Gıda endüstrisinde kullanılacak ürünlerde taşıyıcı veya duvar malzemesi gıda sınıfında olmalıdır. Ayrıca, prebiyotik olarak işlev görebilecek fenolik asitler, flavonoidler ve betasiyaninler içeren bir gıda matrisinin kullanılması, kapsülleme sırasında ve sonrasında probiyotiklerin canlılığını artırmaya yardımcı olmaktadır (De Prisco ve Mauriello, 2016). Enkapsüle probiyotikleri üretmek için sprey kurutma, sprey şoklama, ekstrüzyon, dondurarak kurutma ve emülsiyon gibi çeşitli mikroenkapsülasyon teknikleri kullanılmıştır (Frakolaki vd., 2021). Ancak kullanılan teknik hücrelere zarar vermemeli ve uygulama için mekanik olarak stabil olmalıdır.

Mikroenkapsülasyonun tahıl bazlı fırınlanmış ürünler (TBFÜ)'e eklenen probiyotikler üzerindeki koruyucu etkisini değerlendirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. İki veya daha fazla biyopolimer veya çift mikroenkapsülasyon kullanılan mikrokapsüller, probiyotiklerin pişirme sırasında hayatta kalmasını artırmaktadır (Ezekiel vd., 2020; Penhasi vd., 2021). Mikrokapsül oluşturmak için en çok kullanılan biyopolimerler polisakkaritlerdir, bunu basit mikrokapsüllerin kaplaması olarak lipidler ve proteinler takip etmektedir. Yapılan çalışmalarda, mikroenkapsülasyonun probiyotiklerin canlı kalmasını iyileştirdiği; ancak, pişirme sırasında önemli kayıplar olduğunu göstermektedir ($> 3,6 \log_{10}$ kob/g). TBFÜ'e eklenen mikrokapsülenmiş probiyotikler depolama sırasında yeniden çoğalabilmiştir. Bununla birlikte, mikrobiyal geri kazanım mikrokapsüllerin içindeki besin mevcudiyeti ile sınırlıdır. Soğutulmuş (4°C) depolama sırasında *L. acidophilus* canlılığı (ekmek kreması içinde) kapsülleme malzemesine bağlı olarak aljinat içinde $0,5 \log_{10}$ kob/ekmek azalmış, aljinat ksantan gam veya aljinat-maltodekstrin içinde sabit kalmış ve aljinat-ksantan gam-maltodekstrin içinde ise $0,5 \log_{10}$ kob/ekmek artmıştır (Thang vd., 2019).

Mikroenkapsülasyon ayrıca simüle gastrointestinal koşullar sırasında probiyotikler üzerinde koruyucu bir etki göstermiştir. Dong vd. (2020a), aljinat veya aljinat + maltodekstrin, pektin ve maltodekstrin / pektin içinde mikrokapsülenmiş *L. plantarum*'un canlılığını değerlendirmiştir. Simüle mide sıvısında iki saat sonra, aljinat-pektin ve/veya maltodekstrin ile formüle edilen mikrokapsüllerde $2-3 \log_{10}$ kob/g probiyotik canlı kalmıştır.

Mikrokapsüllerin dahil edilmesinin TBFÜ'in fizikokimyasal özelliklerini değiştirmemesi beklenmektedir. Bununla birlikte bu durum mikrokapsül boyutuna, mikrokapsül sayısına ve mikrokapsüllerin bileşimine bağlıdır.

Aljinat, aljinat + cassava nişastası veya kitosan ile kaplanmış mısır dirençli nişasta mikrokapsülleri, hamura %1 mikrokapsül eklendiğinde beyaz tava ekmeğinin ağırlığını, hacmini, özgül hacmini ve bileşimini (yağ, kül, protein, lif) değiştirmemiştir; ancak ekmekte nem artışı ve karbonhidrat içeriğinde azalma gözlenmiştir (Ezekiel vd., 2020). Hamur probiyotik mikrokapsüllerle zenginleştirildiğinde ekmeğin renk değişimi kaplama malzemesine bağlıdır. Örneğin, tragakant gamından probiyotik mikrokapsüllerin eklenmesi L* indeksini azaltmış ve glutensiz ekmeği koyulaştırmış, sago nişastasından elde edilen mikrokapsüller ise ekmeğin parlaklığını artırmıştır. Buna karşılık, tragakant gam-sago nişastası mikrokapsülleri kontrol ekmeği ile karşılaştırıldığında parlaklığı değiştirmemiştir (Ghasemi vd., 2022). Mikrokapsüllerin eklenmesi, tekstürdeki değişiklikler nedeniyle TBFÜ'nin duyuusal özelliklerini değiştirerek tüketicinin beğenisini azaltabilmektedir. Seyedain-Ardabili vd. (2016) hamburger ekmeği ve beyaz ekmeği %1 probiyotik mikrokapsül ile formüle etmiş, lezzet ve tekstürün kontrol ekmeğine benzer olduğunu bulmuştur.

Probiyotiklerin yenilebilir kaplamalara dahil edilmesi

Yenilebilir kaplama, gıda ürününün yüzeyinde bir film oluşturmak için birbirine karışabilen veya lamine olabilen, genellikle biyopolimerlerden (polisakkaritler, proteinler ve/veya lipidler) oluşan ince bir malzeme tabakasıdır. Yenilebilir kaplama, mekanik hasara ve fiziksel, kimyasal ve/veya mikrobiyal bozulmaya karşı koruma sağlamakta ve sonuç olarak raf ömrünü uzatmakta ve gıda kalitesini korumaktadır (Gregirchak vd., 2020; Safeer Abbas vd., 2023). Yenilebilir bir kaplama, biyoaktif bileşenler olarak mikrobiyal hücreleri içerebilen polimerik bir matristir. Ekmek üzerindeki probiyotik kaplamalar, pişirme işlemi sırasında canlılık kaybını önlemek için genellikle pişirme işleminden sonra veya kısmen pişmiş ekmek üzerine uygulanmaktadır. Bununla birlikte, kaplamayı birkaç dakika boyunca ısıtma havası kullanarak kurutmak için hafif bir ısı işlem uygulanmalıdır. Termal stresi azaltmak ve hücrelerin ozmotik değişikliklere adaptasyonunu sağlamak için alternatif bir dehidrasyon tekniği, uzun süre (24 saat) düşük sıcaklıkta (25 °C) hava kullanmaktır (Semwal vd., 2022). Dolayısıyla, bu adım endüstriyel amaçlar için proses hattındaki değişiklikleri temsil edebilir.

Probiyotik yenilebilir filmler pişirme veya kısmen pişirme sonrasında TBFÜ üzerine uygulanmış ve yüksek canlı sayıları rapor edilmiştir. Soukoulis vd. (2014) iki probiyotik yenilebilir kaplama (aljinat veya aljinat artı peynir altı suyu proteini konsantresi ve *L. rhamnosus* GG formüle etmiş, ekmek yüzeyine uygulamış, iki sıcaklıkta (10 dakika boyunca 60 °C veya 2 dakika boyunca 180 °C) kurutmuş, PE torbalarda paketlemiş ve yedi gün boyunca depolamıştır. 24 saat sonra, tüm kaplamalarda hayatta kalma oranlarında düşüş (0.5 - 1.5 log₁₀ kob/g kabuk) gözlenmiştir. Benzer probiyotik kayıpları (~1 log₁₀ kob/ekmek) 24 saatlik depolama sonrasında Altamirano- Fortoul vd. (2012) tarafından nişasta (%5) ve *L. acidophilus*'un probiyotik mikrokapsülleri ile formüle edilen kaplamalarda $1.15-1.7 \times 10^6$ kob/ekmek nihai konsantrasyonuna ulaşıldığı rapor edilmiştir. Diğer bir çalışmada, *L. rhamnosus* GG kaplamaya (metilselüloz (MC), mısır nişastası, peynir altı suyu konsantresi ve soya fasulyesi yağı) dahil edildiğinde ve 25 °C ve %55 bağıl nemde depolandığında 48 saat boyunca sadece ~10⁶ kob/g seviyesinde canlı kalmıştır (Qandashtani vd., 2020).

Yenilebilir filmler TBFÜ'nün fizikokimyasal özelliklerini değiştirmemelidir. Bu durum, film oluşturucu süspansiyonun bileşimine (biyopolimer, plastikleştirici ve probiyotik hücre sayısı), kurutma sıcaklığına ve filmin kalınlığına bağlıdır. Probiyotik film (peynir altı suyu konsantresi - aljinat) ile kaplanan tava ekmeğinin renk özellikleri, kaplanmamış ekmeğe göre daha yüksek parlaklığa ve daha düşük kırmızı renk parametresine (a*) sahip belirlenmiştir. Buna karşın, aljinat probiyotik film renk parametrelerini değiştirmemiştir (Soukoulis vd., 2014). Ekmek üzerine mikro kapsüllenmiş *L. acidophilus* içeren nişasta kaplamaları, kabuk görünümü, koku, kabuk rengi, gevreklik ve iç sertliği gibi duyuşsal özellikleri değiştirmemiştir (Altamirano- Fortoul vd., 2012). Probiyotik kaplamalı (aljinat, peynir altı suyu, gliserol ve süt) ekmeğin duyuşsal özellikleri (doku, renk, tat ve aroma) kaplamasız ekmeğe kıyasla değişmemiştir (Gregirchak vd., 2020).

Sporlu bakterilerin kullanılması

Bacillus coagulans, *Bacillus subtilis* gibi probiyotik özellikleri olduğu bilinen ve ısıya dayanıklı spor oluşturan bakterilerin probiyoti akviyesi olarak TBFÜ'de kullanılması farklı bir strateji olarak karşımıza çıkmaktadır. Spor oluşturan bakteriler ısıya, düşük su aktivitelerine ve diğer stres faktörlerine

karşı dayanıklıdırlar ama bu direnç suşlar arasında bile değişiklik gösterdiğinden, belirli gıda ve üretim süreçlerinde hayatta kalmalarını değerlendirmek gereklidir. Ayrıca, sporlar çimlenip koruyucu kabiliyetlerini kaybedebileceğinden ve pişirme sırasında önemli canlılık kayıplarına neden olabileceğinden hamur fermentasyon süresini dikkate almak önemlidir (Jao vd., 2011). Jao vd. (2011) sekiz tahıllı unlu gıdanın (krizantem kurabiyesi, yumurtalı kek, ay çöreği, muffin, polo ekmeği, sodalı kurabiye, pandispanya ve tost) hamuruna eklenen *B. coagulans* GanedenBC30'un buzdolabında (15 gün) veya oda sıcaklığında (6 gün) depolama sırasında hayatta kalmasını incelemiştir. Buzdolabında saklama koşullarında, 15 gün sonra canlı sayısındaki düşüşler az olmuştur ($\leq 0,68 \log_{10}$ kob/g) ve probiyotik bileşen aracı canlılığı etkilememiştir. Oda sıcaklığında depolanan unlu mamullerde 0 ile $2,16 \log_{10}$ kob/g arasında canlılık kayıpları gözlenmiştir. Soares vd. (2019), hamura bileşen olarak eklenen üç spor oluşturan bakterinin (*B. subtilis* PXN 21, *B. coagulans* GBI-306086 ve *B. coagulans* MTCC 5856) canlılığını test etmiş ve ekmek 25°C 'de yedi gün boyunca saklanmıştır. Yedi gün sonra, *B. coagulans* sayısı sabit kalırken ($7 \log_{10}$ kob/g), *B. subtilis* sayısı $\sim 1 \log_{10}$ kob/g azalmıştır. Spor oluşturan bakterilerin simüle edilmiş gastrointestinal sistem koşullarında hayatta kalması, sporların asit pH, safra tuzları ve enzimlere karşı dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Spor oluşturan bakterilerle (*B. subtilis* PXN 21, *B. coagulans* GBI-306086 ve *B. coagulans* MTCC 5856) desteklenen ekmekler, pişirme ve 25°C 'de 7 günlük depolama sonrasında simüle edilmiş gastrointestinal sistem koşulları altında canlı kalma sürelerini belirlemek için değerlendirilmiştir. Test edilen probiyotikler taze pişmiş ekmekte %83,5 ile %96,2 arasında, depolamadan sonra ise %91,9 oranında hayatta kalmıştır.

Pişirme sonrası probiyotik takviyesi

Çoğu probiyotik bakterinin ısıya duyarlılığına bağlı olarak, pişirme işleminden sonra ekmek kek, tahıl barları gibi ürünlere probiyotikler çeşitli dolgular veya preparatlar (krema, marmelatlar veya çikolata) içerisinde eklenebilir. Zanjani vd. (2012) *L. casei*'yi serbest hücreler halinde, aljinat veya aljinat-nişasta içinde mikrokapsüllenmiş olarak krema dolgulu bir keke eklemiş ve bir ay boyunca 4°C ve 25°C 'de canlılığı değerlendirmiştir. Başlangıçtaki sayılar 5×10^{11} kob/g iken, 25°C 'de depolamanın sonunda serbest hücreler $9,15 \log_{10}$ kob/g azalmış, aljinat ve aljinat-nişasta mikrokapsülleri için kayıplar

sırasıyla 5,61 ve 4,18 $\log_{10}$ kob/g olmuştur. 4 °C'de canlılık azalması, serbest ve kapsüllenmiş hücreler için 25 °C'dekinden bir $\log_{10}$ kob/g daha düşük olmuştur. Beklendiği gibi, mikrokapsüllenmiş hücreler ve depolama süresi probiyotik canlılığını belirlemiştir. Dadgar vd. (2014) malt lifi (%10 veya %20) eklenmiş mısır gevreklerini, 10^7 - 10^8 kob/mL seviyelerinde tuzlu su çözeltisi (*L. plantarum* PTCC 1745 veya *L. reuteri* PTCC 1655) içinde yeniden süspanse edilmiş serbest hücrelerin (%2,5 veya %5) doğrudan ilavesiyle zenginleştirmiştir. İki hafta 20 °C'de (dondurucu poşetinde veya alüminyum folyoda) saklandıktan sonra, sayımlar her iki bakteri için de $\sim 3 \times 10^8$ kob/g düzeyinde kalmıştır. aw önemli bir artış olmadan hafifçe değişmiş ($p < 0.05$) ve duyuşsal özellikler (tat, koku ve genel kabul edilebilirlik) kontrol mısır gevreklerine göre benzer puanlarla ($p > 0.05$) almıştır.

Sonuç

Potansiyel fonksiyonel unlu mamuller, fiziksel kalitelerinden veya duyuşsal kabullerinden ödün vermeden prebiyotikler ve probiyotikler için taşıyıcı sistemleri olarak kullanılabilir. Probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotik tüketimi insan sağlığıyla yakından ilişkilidir. Fonksiyonel unlu mamullerin geliştirilmesi ve günlük beslenmeye dahil edilmesi, insan sağlığının korunması ve iyileştirilmesi için bir alternatif sunmaktadır. Bununla birlikte, bu ürünlerin ilaç yerine alınmaması gerektiğini unutmamak önemlidir. En iyi kullanımları, tıbbi bir tedaviden ziyade bir önleme olarak hareket ederek tüketicinin sağlığını iyileştirmeye yardımcı olacak şekilde düzenli olarak alınmalarıdır. Başarılı bir fonksiyonel unlu mamul geliştirmek için, sadece kanıtlanmış bir prebiyotik, probiyotik veya sinbiyotik etkiye sahip olması değil, aynı zamanda ihtiyaç duyulan fiziksel kalite özelliklerine ulaşması ve düşük veya hiç reddedilmeden tüketilmesi için iyi bir duyuşsal kabul görmesi gerekmektedir.

Probiyotiklerin tahlı bazlı ürünelere dahil edilmesine yönelik çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bunlar içerisinde; spor oluşturan bakterilerin, pişirme öncesinde bu ürünelere ilavesi en iyi yaklaşımlardan biridir. Mikrokapsüllenmiş probiyotikler, belirli karışımlar veya kapsülleyici katmanları için TBFÜ'e eklenmeye uygundur, çünkü canlılık pişirme ve depolama sırasında kalır. Bununla birlikte, TBFÜ üretiminde mikroenkapsülasyon adımları dikkate alınmalıdır. Yenilebilir filmler yoluyla probiyotik ilavesi genellikle fırınlamadan sonra gerçekleşir ancak filmin kurumasını sağlamak için ekstra

kurutma, fırınlama veya zaman gerektirmelidir. Probiyotik mikrokapsüller ve yenilebilir filmler TBFÜ'nün fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilir; etkileri, oluşumda kullanılan biyopolimerlere, mikrokapsüllerin sayısına veya film kalınlıklarına ve bunların dahil edilmesinde kullanılan işleme bağlıdır. Son olarak, probiyotiklerin pişirildikten sonra TBFÜ'e kaplama veya dolgu yoluyla eklenmesi, probiyotik canlılığı ile ilgili endişeler olmaksızın ilginç bir seçenektir.

KAYNAKÇA

- Altamirano-Fortoul, R., Moreno-Terrazas, R., Quezada-Gallo, A., & Rosell, C. M. (2012). Viability of some probiotic coatings in bread and its effect on the crust mechanical properties. *Food Hydrocolloids*, 29, 166–174.
- Arepally, D., Reddy, R. S., Goswami, T. K., & Coorey, R. (2022). A review on probiotic microencapsulation and recent advances of their application in bakery products. *Food and Bioprocess Technology*, 15, 1677–1699.
- Arrieta, M. C., Stiemsma, L. T., Amenyogbe, N., Brown, E. M., & Finlay, B. (2014). The intestinal microbiome in early life: Health and disease. *Frontiers in Immunology*, 5, 427.
- Barajas-Alvarez, P., Gonzalez-Avila, M., & Espinosa-Andrews, H. (2021). Recent advances in probiotic encapsulation to improve viability under storage and gastrointestinal conditions and their impact on functional food formulation. *Food Reviews International*, 1–22.
- Cappelli, A., Lupori, L., & Cini, E. (2021). Baking technology: A systematic review of machines and plants and their effect on final products, including improvement strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 115, 275–284.
- Dadgar, M., Khosravi-Darani, K., Tofighi, A., & Khanbeigi-Dogahe, M. (2014). Effect of storage in the fortified probiotic corn flakes prepared by *L. plantarum* and *L. reuteri*. *Nutrition and Food Sciences Research*, 1(1), 41–48.
- De Prisco, A., & Mauriello, G. (2016). Probiotication of foods: A focus on microencapsulation tool. *Trends in Food Science & Technology*, 48, 27–39.
- Dong, L. M., Luan, N. T., & Thuy, D. T. K. (2020a). Enhancing the viability rate of probiotic by co-encapsulation with prebiotic in alginate microcapsules supplemented to cupcake production. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 48(2), 113–120.
- Dong, L. M., Luan, N. T., & Thuy, D. T. K. (2020b). The viability of encapsulated *Lactobacillus plantarum* during cupcake baking process, storage, and simulated gastric digestion. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(6), 1157–1161.

- Ezekiel, O. O., Okechie, I. D., & Adedeji, O. E. (2020). Viability of *Lactobacillus rhamnosus* GG in simulated gastrointestinal conditions and after baking white pan bread at different temperatures and tie regimes. *Current Microbiology*, 77, 3869–3877.
- FAO/WHO, Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization. (2002). *Guidelines for the evaluation of probiotics in food. Report of a joint FAO/WHO working group on drafting guidelines for the evaluation of probiotics in food, London Ontario, Canada, April 30 and May 1, 2002*. Geneva, Switzerland: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy; World Health Organization (WHO).
- Foerst, P., & Kulozik, U. (2012). Modelling the dynamic inactivation of the probiotic bacterium *L. paracasei* ssp. *paracasei* during a low-temperature drying process based on stationary data in concentrated systems. *Food Bioprocess and Technology*, 5, 2419–2427.
- Frakolaki, G., Giannou, V., Kekos, D., & Tzia, C. (2021). A review of the microencapsulation techniques for the incorporation of probiotic bacteria in functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(9), 1515–1536.
- Ghasemi, L., Nouri, L., Nafchi, A. M., & Al-Hassan, A. A. (2022). The effects of encapsulated probiotic bacteria on the physicochemical properties, staling, and viability of probiotic bacteria in gluten-free bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(3), Article e16359.
- Gregirchak, N., Stabnikova, O., & Stabnikov, V. (2020). Application of lactic acid bacteria for coating of wheat bread to protect it from microbial spoilage. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75, 223–229.
- Jao, C.-L., Huang, S.-L., Wu, S.-C., & Kuo-Chiang, H. (2011). The study on SFLAB GanedenBC30 viability on baking products during storage. *Procedia Food Science*, 1, 1601–1609.
- Mani-Lopez, E., Ramírez-Corona, N., Lopez-Malo, A. (2023). Advances in probiotic incorporation into cereal-based baked foods: Strategies, viability, and effects—A review. *Applied Food Research* 3, 100330.
- Penhasi, A., Reuveni, A., & Baluashvili, I. (2021). Microencapsulation may preserve the viability of probiotic bacteria during baking process and

- digestion: A case study with *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* in bread. *Current Microbiology*, 78, 576–589.
- Pimentel, T. C., da Costa, W. K. A., Barao, C. E., Rosset, M., & Magnani, M. (2021). Vegan probiotic products: A modern tendency or the newest challenge in functional foods. *Food Research International*, 140, 110033.
- Safeer Abbas, M., Afzaal, M., Saeed, F., Asghar, A., Jianfeng, L., Ahmad, A., Ullah, Q., Elahi, S., Ateeq, H., Shah, Y. A., Nouman, M., & Shah, M. A. (2023). Probiotic viability as affected by encapsulation materials: Recent updates and perspectives. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1324–1350.
- Semwal, A., Ambatipudi, K., & Navani, N. K. (2022). Development and characterization of sodium caseinate based probiotic edible film with chia mucilage as a protectant for the safe delivery of probiotics in functional bakery. *Food Hydrocolloids for Health*, 2, Article 100065.
- Seyedain-Ardabili, M., Sharifan, A., & Tarzi, B. G. (2016). The production of synbiotic bread by microencapsulation. *Food Technology and Biotechnology*, 54(1), 52–59.
- Shori, A. B. (2016). Influence of food matrix on the viability of probiotic bacteria: A review based on dairy and non-dairy beverages. *Food Bioscience*, 13, 1–8.
- Siro' I, Ka'polna E, Ka'polna B, Lugasi A (2008) Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance—a review. *Appetite* 51:456–467.
- Soares, M. B., Martinez, R. C. R., Pereira, E. P. R., Balthazar, C. F., Cruz, A. G., Ranadheera, C. S., & Sant'Ana, A. S (2019). The resistance of *Bacillus*, *Bifidobacterium*, and *Lactobacillus* strains with claimed probiotic properties in different food matrices exposed to simulated gastrointestinal tract conditions. *Food Research International*, 125, Article 108542.
- Soukoulis, C., Yonekura, L., Gan, H.-H., Behboudi-Jobbehdar, S., Parmenter, C., & Fisk, I. (2014). Probiotic edible films as a new strategy for developing functional bakery products: The case of pan bread. *Food Hydrocolloids*, 39, 231–242.
- Qandashtani, R. A., Salehi, E. A., Sani, A. M., Sangatash, M. M., & Safari, O. (2020). Investigation on quality properties of traditional bilk bread

- covered with probiotics and soybean oil edible coating. *Acta Alimentaria*, 49(2), 144–153.
- Thang, T. D., Quyen, L. T. H., Hang, H. T. T., Luan, N. T., Thuy, D. T. K., & Dong, L. M. (2019). Survival survey of *Lactobacillus acidophilus* in additional probiotic bread. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 7(4), 588–592.
- Yao, M., Xie, J., Du, H., McClements, D. J., Xiao, H., & Li, L. (2020). Progress in microencapsulation of probiotics: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 857–874.
- Zhang, L., Huang, S., Ananingsih, V. K., Zhou, W., & Chen, X. D. (2014). A study on *Bifidobacterium lactis* Bb12 viability in bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 122, 33–37.
- Zhang, L., Taal, M. A., Boom, R. M., Chen, X. D., & Schutyser, M. A. I. (2018). Effect of baking conditions and storage on the viability of *Lactobacillus plantarum* supplemented to bread. *LWT – Food Science and Technology*, 87, 318–325.
- Zanjani, M. A. K., Tarzi, B. G., Sharifan, A., Mohammadi, N., Bakhoda, H., & Madanipour, M. M. (2012). Microencapsulation of *Lactobacillus casei* with calcium alginate-resistant starch and evaluation of survival and sensory properties in cream-filled cake. *African Journal of Microbiology Research*, 6(26), 5511–5517.

BÖLÜM 3

PROBİYOTİK ve POSTBİYOTİK YAKLAŞIMLAR İLE MİKOTOKSİNLERİN BİYOLOJİK DETOKSİFİKASYONU

Araş. Gör. Muhammed Talha AKBULUT¹

Prof. Dr. Ahmet Şükrü DEMİRCİ²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214771>

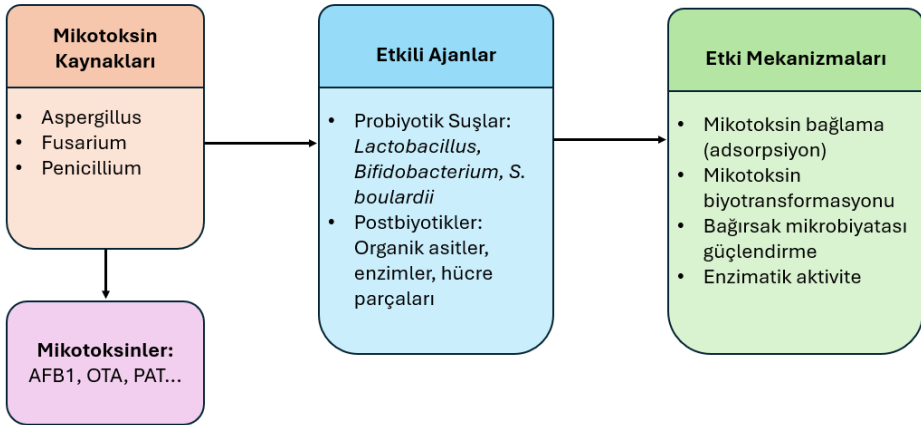
¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. talhaakbulut@nku.edu.tr, orcid id: 0009-0008-0513-2981

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. ademirci@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5252-8307

1. GİRİŞ

Mikotoksinler, *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium* cinsi mantarlar tarafından doğal olarak üretilen, insanlar ve hayvanlar için toksik maddeler olarak kabul edilen ikincil metabolitlerdir. Gıdalarda bulunan başlıca mikotoksinler aflatoksinler, okratoksinler, fumonisinler, trikotesenler ve zearalenona'dır (Tola ve Kebede, 2016). Bunlar sıklıkla fındık, mısır, pirinç gibi tahıl ürünlerinde bulunur. Çalışmalar, bunların toksijenik, nefrotoksik, hepatotoksik, kanserojen, immünosüpresif ve mutajenik özelliklerini göstermiştir. Çoğu mikotoksin insan ve hayvan sağlığı için önemli bir risk oluşturmaktadır (da Rocha vd., 2014).

Son yıllarda, probiyotik ve postbiyotik bileşenlerin mikotoksinlerin biyolojik degradasyonundaki rolü üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Özellikle postbiyotiklerin, canlı hücre içermemeleri, stabiliteyi ve güvenilirlikleri sayesinde alternatif bir biyolojik detoksifikasyon stratejisi olarak değerlendirilmeleri önem kazanmaktadır. Bu araştırmada probiyotik ve postbiyotiklerin mikotoksin ve özellikle aflatoksin biyodegradasyonundaki potansiyeli incelenmiş ve etki mekanizmaları ortaya koyulmuştur (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Probiyotik ve postbiyotiklerin mikotoksinlere etki mekanizmaları.

2. Probiyotik ve Postbiyotik Kavramı

Probiyotik kavramı, yoğurttaki canlı mikroorganizmaların tüketilmesinin bağırsak florasına faydalı olduğunun keşfedilmesiyle ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) tarafından, yeterli düzeyde alındığında konakçıya yarar sağlayan mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (Reque ve Brandelli, 2021). Bu kapsamda, sağlık açısından faydalı etkileri bulunan spesifik suşların izolasyonu amacıyla *Lactobacillus casei*, *L. paracasei*, *L. rhamnosus*, *L. acidophilus*, *L. gasseri*, *L. johnsonii*, *L. plantarum*, *L. reuteri*, *L. crispatus*, *L. fermentum*, *Bifidobacterium bifidum*, *B. adolescentis*, *B. lactis*, *B. breve*, *B. infantis*, *B. longum*, *Saccharomyces boulardii* ve *S. cerevisiae* gibi türler incelenmiştir (Vinderola ve Ritieni, 2014). *Bifidobacterium* ve *Lactobacillus* türleri insan bağırsağında doğal olarak bulunur; bu yüzden bazı suşlar, sindirim sistemine dayanıklı ve sağlığa yararlıdır. Bu nedenle de probiyotik takviyesi, bağırsak dengesini iyileştirmek amacıyla bağırsak mikrobiyotasını geçici olarak faydalı bakterilerle desteklemeyi hedeflemektedir. Ayrıca, *Lactobacillus* cinsine ait probiyotik suşlar; fermente süt ürünleri, kakao taneleri, peynirler, soslar ve tahıl bazlı fermente gıdalar gibi çeşitli besinlerden izole edilebilir (Farnworth, 2008). Ancak, bifidobakteriler oksijene karşı düşük toleransa sahip oldukları için bu gıdalarda doğal olarak bulunmazlar.

Probiyotik bakterilerin farmasötik preparatlar ve fermente gıdalar yoluyla tüketilmesi sağlık açısından olumlu etki sağlamaktadır. Bunlardan bazıları, bağırsak mikrobiyota aktivitesinin düzenlenmesi, laktoz intoleransının hafifletilmesi, bağırsak mukozal bağışıklığının güçlendirilmesi ve bağırsak hareketliliğinin hızlandırılması olarak söylenebilir. Ayrıca, probiyotiklerin hipokolesterolemik etkiye sahip olduğu, ishal ve solunum yolu enfeksiyonlarının iyileşme süresini azalttığı, inflamatuvar bağırsak hastalığı ve kesecik iltihabını önleyebildiği bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, kolon kanseri riskinin azalması, *Helicobacter pylori* ve bağırsak patojenlerinin inhibisyonu ile alerjinin tedavisi ve önlenmesi gibi etkiler de klinik çalışmalarla desteklenmektedir (Socol vd., 2010; Sanders vd., 2014). Bildirilen etki mekanizmaları ise şunlardır:

- Enteropatojenlerle besin maddeleri için rekabet,
- Mevcut şekerlerin asitlere biyolojik dönüşümü, bağırsak pH'sını düşürerek patojenleri inhibe etme,

- Vitamin ve bütirik asit üretimi ile enterositler için bağırsak bariyerini destekleyen bir enerji kaynağı sağlama,
- Yapışma bölgeleri için rekabetçi dışlama ile bağırsak epitelinin bariyer fonksiyonunu koruma (Oelschlaeger, 2010).

Bağırsak sağlığına verilen önemle birlikte probiyotikler muazzam bir pazar potansiyeline ulaşmıştır. Ancak yeni bilimsel kanıtlar, probiyotiklerin sağlık yararlarının doğrudan canlı bakterilerle ilişkili olmadığını göstermektedir. Canlı bakterilerin metabolitleri veya bakteriyel bileşenleri de sağlık açısından son derece faydalıdır. Bu nedenle, probiyotiklerin faydalı etkileri bakterilerin kendisine, metabolitlerine veya hücre lizatlarına dayandırılmaktadır. Bu faktörler ise ISAPP tarafından resmi olarak "postbiyotikler" olarak adlandırılmıştır (Liang ve Xing, 2023). Postbiyotik, "sonra" anlamına gelen "post" ve "yaşam" anlamına gelen "bios" kelimelerinden türetilmiş bir terimdir. Postbiyotik terimi, mikroorganizmalar canlı olmadığı veya etkisiz hale getirildiğinde üretilen maddeleri ifade eder. Bir postbiyotigi oluşturan mikroorganizmalar cansız, sağlam hücreler veya hücre duvarları gibi yapısal parçalar olabilir. Postbiyotiklerin antimikrobiyal, antioksidan, anti-inflamatuar, anti-proliferatif ve immünomodülasyon gibi biyoaktivitelere sahip olduğu gösterilmiştir. Dahası, çok sayıda çalışma postbiyotiklerin hastalık tedavisi için önemli potansiyelini ortaya koymuştur (Vinderola vd., 2022).

3. Probiyotiklerin Mikotoksin Biyodegradasyonundaki Rolü

Probiyotikler, mikotoksinleri bağlayarak, metabolize ederek ve bağırsak mikrobiyotasını güçlendirerek bu toksinlerin emilimini ve toksik etkilerini azaltmaktadırlar. El-Nezami (1998)'ye ait tez çalışmasında bir dizi in vitro çalışma ile, farklı laktik asit bakterisi suşlarının, başta aflatoksinler olmak üzere, mikotoksinleri bağlama kapasitesi rapor edilmiştir. Bu çalışma probiyotiklerin mikotoksinler üzerindeki biodegradasyon etkilerinin belirlenmesinde öncü olmuştur. Aflatoksin B1'i (AFB1) bağlama yeteneği, 5 laktobasil suşu, *Propionibacterium freudenreichii ssp. shermanii JS* ve bir *Escherichi coli* suşu için belirlenmiştir. Suşlar, 5 μM 'lik bir mikotoksin çözeltisinde (10^{10} kob/mL) süspanse edilmiştir. Aflatoksin bağlanmasının hızlı ve stabil olduğu gösterilmiştir ancak, hücrelerin yalnızca yüksek konsantrasyonlarda ($>2 \times 10^9$ kob/mL) mevcut olduğunda AFB1

degradasyonunun etkili olduğu bildirilmiştir. Ayrıca canlı ve ısıyla inaktive edilmiş hücrelerin benzer AFB1 degradasyonu sağlamasıyla bağlanmanın hücre canlılığından bağımsız olduğu da gösterilmiştir (Vinderola ve Ritieni, 2014). Bu da postbiyotiklerin de probiyotikler gibi mikotoksin biyodegradasyonunda etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Çizelge 3.1’de probiyotiklerle mikotoksin biyodegradasyonuna ilişkin bazı çalışmalara yer verilmiştir. Haskard vd. (2000) *Lactobacillus rhamnosus strain gg* (LGG) hücrelerinin AFB1’i bağlama kapasitesi üzerine çalışmalarında da canlı ve cansız LGG’lerin benzer etkiler gösterdiği görülmüştür. Çalışmada ürenin etkisinin, hidrofobik etkileşimlerin bağlanmasında önemli bir rol oynayabileceği bildirilmiştir. Ancak, pH’ın 2,5’ten 8,5’e artmasının AFB1 bağlanması üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır. Öte yandan Peltonen vd. (2001), tarafından laktokok, laktobasil ve bifidobakteriyi kapsayan 20 suş içeren bir çalışmada bağlanmanın suşlara göre oldukça değişkenlik gösterebileceği öne sürülmüştür. Çalışmada AFB1 bağlanması %5 ile %50 arasında değişkenlik göstermiştir. Yalnızca aflatoksinle değil diğer mikotoksinlerle de çalışmalar mevcuttur. Fuchs vd. (2008), gıdalarda patulin (PAT) ve okratoksin (OTA) detoksifikasyonu amacıyla 30 farklı laktik asit bakterisi (LAB) suşu ile denemeler yapmıştır. *Lactobacillus acidophilus* OTA’da %95’lik bir azalmaya, *Bifidobacterium animalis* ise PAT seviyelerinde %80 oranında azalma sağlamıştır. Bu bulgular, belirli probiyotik suşlarının iki toksini detoksifiye edebildiğini ve insanları ve hayvanları bu bileşiklerin olumsuz sağlık etkilerine karşı korumak için yararlı olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Probiyotiklerin mikotoksinler üzerine etkileri.

Hedef Mikotoksin	Probiyotik	Bulgular	Kaynak
AFB1	LGG	≈%70-80 bağlama	Haskard vd., 2000
AFB1 PAT	<i>E. faecium</i> (M74 ve EF031)	≈%20-30 AFB1 ≈%15-45 PAT azalma	Topcu vd., 2010
AFB1	Laktokok, laktobasil ve bifidobakteriyi içeren 20 suş	≈%5-50 bağlama	Peltonen vd., 2001
PAT OTA	30 farklı LAB suşu	<i>L. acidophilus</i> ile OTA’da %95’lik, <i>B. animalis</i> PAT’de %80 oranında azalma	Fuchs vd., 2008

4. Postbiyotiklerin Mikotoksin Biyodegradasyonundaki Rolü

Postbiyotikler, probiyotik mikroorganizmaların metabolik ürünlerinden veya hücresel bileşenlerinden elde edilen, canlı hücre içermeyen, biyolojik olarak aktif maddelerdir. Bu bileşikler arasında organik asitler, enzimler, bakteriyosinler, ekzosellüler polisakkaritler, hücre duvarı fragmentleri ve biosülfaktanlar yer almaktadır. Postbiyotiklerin mikotoksinlere karşı etkisi hem fiziko-kimyasal bağlanma hem de biyotransformasyon yoluyla ortaya çıkmaktadır. Postbiyotiklerin mikotoksinleri bağlama kapasitesi, özellikle aflatoksinler gibi küçük ve hidrofobik bileşiklerin gastrointestinal sistemdeki biyoyararlanımını azaltmada önemlidir. Peptidoglikan, teikoik asitler ve lipoteikoik asitler gibi hücre duvarı bileşenleri, yüzeylerindeki negatif yüklü gruplar aracılığıyla AFB1 gibi mikotoksinleri adsorbe edebilir. Bu bağlanma işlemi genellikle geri dönüşümlü olup, mikotoksinlerin sistemik dolaşıma geçmeden dışkı yoluyla atılımını destekler (Khani vd., 2024). Serrano-Niño vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, *Lactobacillus acidophilus* kaynaklı postbiyotiklerin, aflatoksin M1'in %19–25'ini bağlayabildiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Haskard vd. (2000), *L. rhamnosus* süpernatantlarının AFB2a'yı pH'ya bağımlı şekilde bağlayabildiğini bildirmiştir.

Postbiyotiklerin içerdiği enzimler, mikotoksinlerin kimyasal yapısını değiştirerek toksisitelerini azaltabilir. AFB1'in toksik etkileri çoğunlukla furan halkasındaki çift bağa ve kumarin lakton halkasına bağlıdır (Wu vd., 2021). Aflatoksin oksidaz (AFO) gibi postbiyotik kökenli enzimler, bu bölgeleri hedef alarak AFB1'i daha az toksik türevlerine dönüştürür. Örneğin, AFO enzimi AFB1'i 8,9-dihidrodiol formuna dönüştürerek mutajenitesini azaltmaktadır. Laccase enzimi ise AFB1'i AFQ1 ve epi-AFQ1 gibi toksisitesi düşürülmüş bileşiklere dönüştürebilmektedir (Wang vd., 2019). *Bacillus licheniformis*'ten elde edilen CotA laccase enzimi, insan hepatositlerinde apoptoz indüksiyonuna yol açmadan AFB1'i parçalayabilmiştir (Guo vd., 2020).

Bacillus ve *Lactobacillus* türlerinden elde edilen postbiyotik süpernatantların AFB1'i %46–95 arasında değişen oranlarda parçaladığı bildirilmiştir. Bir çalışmada, *Bacillus velezensis* kaynaklı süpernatantlar %94 oranında biyodegradasyon sağlayarak toksisitesi azaltılmış yeni bileşikler üretmiştir. Benzer şekilde, *Saccharomyces cerevisiae* süpernatantı, Aflatoksin M1'i %60 oranında dönüştürerek detoksifikasyon sağlamıştır (Khani vd., 2024).

Sadece aflatoksinler değil, aynı zamanda diğer mikotoksinler üzerinde de postbiyotiklerin etkisi araştırılmıştır. *Lactobacillus spp.*, *Saccharomyces cerevisiae* ve *Bacillus subtilis* gibi mikroorganizmaların kültür süpernatanlarının enniatin, beauverisin ve alternariol gibi toksinleri metabolize ederek toksisitesini azalttığı gösterilmiştir. Bu çalışmalar, postbiyotiklerin geniş spektrumlu detoksifikasyon potansiyeline sahip olduğunu desteklemektedir (Lazaro vd., 2024). Postbiyotiklerin mikotoksinler üzerine etkileri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Postbiyotiklerin mikotoksinler üzerine etkileri.

Hedef Mikotoksin	Postbiyotik Kaynağı	Bulgular	Kaynak
AFM1	<i>Lactobacillus acidophilus</i> postbiyotiği	%19–25 bağlama oranı	Serrano-Niño vd., 2013
AFB2a	<i>Lactobacillus rhamnosus</i> süpernatanı	AFB2a bağlama potansiyeli	Haskard vd., 2000
AFB1	Aflatoksin oksidaz enzimi	AFB1 → 8,9-dihidrodiol dönüşümü	Wu vd., 2021
AFB1	Laccase enzimi (<i>B. licheniformis</i> , CotA)	AFQ1 ve epi-AFQ1 dönüşümü, toksisite azalması	Guo vd., 2020; Wang vd., 2019
AFB1	<i>Bacillus velezensis</i> süpernatanı	%94 biyodegradasyon, toksisite azalması	Khani vd., 2024
AFM1	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> süpernatanı	%60 dönüşüm	Khani vd., 2024
Enniatin, BEA, Alternariol	<i>Lactobacillus</i> , <i>Saccharomyces</i> , <i>Bacillus</i>	Toksisite azaltımı gösterilmiştir	Lazaro vd., 2024

5. Sonuç

Mikotoksinler hem insan hem de hayvan sağlığı üzerinde ciddi toksik etkiler oluşturan ve gıda güvenliğini tehdit eden bileşiklerdir. Bu toksinlerin gıda ve yemlerden uzaklaştırılması amacıyla fiziksel ve kimyasal yöntemlerin yanı sıra biyolojik stratejiler de giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen probiyotik ve postbiyotik ajanlar, mikotoksinlerin biyodegradasyonunda etkili potansiyele sahip biyolojik araçlar olarak öne çıkmaktadır. Probiyotik bakteriler; mikotoksinleri bağlama, metabolize etme ve bağırsak mikrobiyotasını dengeleyerek toksik etkileri azaltma yönüyle çalışmalarda başarılı sonuçlar vermektedir. Öte yandan, canlı hücre içermeyen postbiyotiklerin, özellikle enzimatik aktivite, hücre duvarı bileşenleri ve metabolitler yoluyla mikotoksinleri detoksifiye edebildiği gösterilmiştir. Hem probiyotikler hem de postbiyotikler, bağırsak bariyer fonksiyonlarını güçlendirme, inflamasyonu azaltma ve oksidatif stresi baskılama gibi dolaylı yollarla da mikotoksin kaynaklı zararların azaltılmasında rol oynamaktadır. Ancak bu biyolojik ajanların etkili olduğu suşların ve koşulların detaylı olarak tanımlanması, doz-yanıt ilişkilerinin ortaya konması ve in vivo doğrulamalarla desteklenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, probiyotik ve postbiyotik uygulamalar, mikotoksin kontrolünde umut vadeden, sürdürülebilir ve güvenli biyolojik stratejiler olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- da Rocha, M. E. B., Freire, F. D. C. O., Maia, F. E. F., Guedes, M. I. F., & Rondina, D. (2014). Mycotoxins and their effects on human and animal health. *Food Control*, 36(1), 159-165.
- Farnworth, E. R. T. (2008). *Handbook of fermented functional foods*. CRC press.
- Fuchs, S., Sontag, G., Stidl, R., Ehrlich, V., Kundi, M., & Knasmüller, S. (2008). Detoxification of patulin and ochratoxin A, two abundant mycotoxins, by lactic acid bacteria. *Food and Chemical Toxicology*, 46(4), 1398-1407.
- Guo, Y., Qin, X., Tang, Y., Ma, Q., Zhang, J., & Zhao, L. (2020). CotA laccase, a novel aflatoxin oxidase from *Bacillus licheniformis*, transforms aflatoxin B1 to aflatoxin Q1 and epi-aflatoxin Q1. *Food Chemistry*, 325, 126877.
- Haskard, C., Binnion, C., & Ahokas, J. (2000). Factors affecting the sequestration of aflatoxin by *Lactobacillus rhamnosus* strain GG. *Chemico-Biological Interactions*, 128(1), 39-49.
- Khani, N., Noorkhajavi, G., Soleiman, R. A., Raziabad, R. H., Rad, A. H., & Akhlaghi, A. P. (2024). Aflatoxin biotransformation strategies based on postbiotics. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 16(5), 1673-1686.
- Lázaro, Á., Vila-Donat, P., & Manyes, L. (2024). Emerging mycotoxins and preventive strategies related to gut microbiota changes: probiotics, prebiotics, and postbiotics—a systematic review. *Food & Function*.
- Liang, B., & Xing, D. (2023). The current and future perspectives of postbiotics. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(6), 1626-1643.
- Oelschlaeger, T. A. (2010). Mechanisms of probiotic actions—a review. *International Journal of Medical Microbiology*, 300(1), 57-62.
- Peltonen, K., El-Nezami, H., Haskard, C., Ahokas, J., & Salminen, S. (2001). Aflatoxin B1 binding by dairy strains of lactic acid bacteria and bifidobacteria. *Journal of Dairy Science*, 84(10), 2152-2156.
- Reque, P. M., & Brandelli, A. (2021). Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 1-10.

- Sanders, M. E., Lenoir-Wijnkoop, I., Salminen, S., Merenstein, D. J., Gibson, G. R., Petschow, B. W., Nieuwdorp, M., Tancredi, D. J., Cifelli, C. J., Jacques, P., & Pot, B. (2014). Probiotics and prebiotics: prospects for public health and nutritional recommendations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1309(1), 19-29.
- Serrano-Niño, J. C., Cavazos-Garduño, A., Hernandez-Mendoza, A., Applegate, B., Ferruzzi, M. G., San Martin-González, M. F., & García, H. S. (2013). Assessment of probiotic strains ability to reduce the bioaccessibility of aflatoxin M1 in artificially contaminated milk using an in vitro digestive model. *Food Control*, 31(1), 202-207.
- Soccol, C. R., Vandenberghe, L. D. S., Spier, M. R., Medeiros, A. B. P., Yamaguishi, C. T., Lindner, J. D. D., Pandey, A., & Thomaz-Soccol, V. (2010). The potential of probiotics: a review. *Biotechnol.* 48 (4) 413–434.
- Tola, M., & Kebede, B. (2016). Occurrence, importance and control of mycotoxins: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1191103.
- Topcu, A., Bulat, T., Wishah, R., & Boyacı, I. H. (2010). Detoxification of aflatoxin B1 and patulin by *Enterococcus faecium* strains. *International journal of food microbiology*, 139(3), 202-205.
- Vinderola, C. G., & Ritieni, A. (2014). Role of probiotics against mycotoxins and their deleterious effects. *Journal of Food Research* 4(1), 10.
- Vinderola, G., Sanders, M. E., & Salminen, S. (2022). The concept of postbiotics. *Foods*, 11(8), 1077.
- Wang, X., Bai, Y., Huang, H., Tu, T., Wang, Y., Wang, Y., Luo, H., Yao, B., & Su, X. (2019). Degradation of aflatoxin B1 and zearalenone by bacterial and fungal laccases in presence of structurally defined chemicals and complex natural mediators. *Toxins*, 11(10), 609.
- Wu, Y., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: Applications and mechanisms. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 647-661.

BÖLÜM 4

TOPRAK KİRLİLİĞİNİN ÇEVRESEL BOYUTU: TARIMSAL UYGULAMALAR VE FARMASÖTİK KALINTILAR

Dr. Öğr. Üyesi Arife ŞİMŞEK¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.17214789>

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kenevir Araştırmaları Enstitüsü , Gıda, Yem ve İlaç Anabilim Dalı, Samsun, Türkiye. arife.simsek@omu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-7177-1764

1. GİRİŞ

Toprak, karasal ekosistemlerin temelini oluşturan ve tarımsal faaliyetler için kritik öneme sahip bir kaynaktır (He vd., 2023). Ancak, endüstriyel ve kentsel atık sular, katı atıklar, pestisitler, gübreler (Xue vd., 2020), hayvan dışkıları, biyolojik kalıntılar ve atmosferik serpinti (Guan vd., 2019) gibi çeşitli kirleticiler nedeniyle giderek daha fazla tehdit altındadır (Fang vd., 2025). Bu tür kirleticiler, topraktaki element konsantrasyonlarının doğal arka plan seviyesini aşmasına yol açarak difüzyon bölgeleri (An vd., 2023) oluşturmakta ve bu süreç, toprak kirliliğinin temelini meydana getirmektedir (Cai vd., 2023).

Toprak kirliliği, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda tarımsal üretimi ve buna bağlı olarak toplumsal ve ekonomik yapıyı da tehdit eden çok boyutlu bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Tarımda yoğun biçimde kullanılan kimyasal girdiler, özellikle pestisitler ve gübreler, toprak yapısının bozulmasına ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olmaktadır (Fang vd., 2025). Toprakta biriken bu kimyasallar, tarımsal verimliliği azaltmakta, gıda güvenliğini riske atmakta ve ekosistem işleyişini olumsuz etkilemektedir (Nuruzzaman vd., 2025). Ayrıca, bu kirleticilerin yer altı sularına taşınması, su kaynaklarının kalitesini bozarak yalnızca ekosistem sağlığı için değil, aynı zamanda insan sağlığı için de ciddi riskler oluşturmaktadır (Tongesayi ve Tongesayi, 2015; Muralikrishna ve Manickam, 2017).

Toprak kirliliği, tarımsal sürdürülebilirliği, dolayısıyla üretim süreçlerini de zorlaştırmaktadır. Pestisitler ve kimyasal gübreler, topraktaki organik madde miktarını ve biyolojik aktiviteyi azaltmakta; bu durum, verimlilik kayıplarına yol açmaktadır (Khmelevtsova vd., 2023). Ayrıca, bu kimyasallar toprakta birikerek mikroorganizmaların yaşam döngüsünü bozmakta, toprak sağlığını olumsuz etkilemekte ve toprağın fiziksel özelliklerini değiştirerek su tutma kapasitesini düşürmektedir (Alengebawy vd., 2021). Bu süreçler uzun vadede tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini ciddi biçimde tehdit etmektedir.

Toprak kirliliği tarımsal girdilerle sınırlı değildir. İnsan kaynaklı ilaç kullanımı ve atıkların yanlış bertaraf edilmesi, toprakta kalıcı kirleticilerin birikimine neden olmaktadır (Pérez-Lucas ve Navarro, 2024). Bu ilaçların içerdiği aktif bileşenler doğrudan ekosisteme karışarak ekolojik dengeyi bozmakta, gıda zinciri üzerinden insan sağlığını tehdit etmekte ve özellikle antibiyotiklerin toprağa sızmasıyla antibiyotik direncinin artmasına zemin hazırlamaktadır (De Santiago-Martín vd., 2020). Bu durum, yalnızca

hastalıkların tedavisini zorlaştırmakla kalmayıp, aynı zamanda su ve toprak kaynaklarına bağımlı olan bitki ve hayvanların sağlığını da olumsuz yönde etkilemektedir.

Bununla beraber günümüzde kimyasal ilaçların kontrolsüz ve aşırı kullanımı, toprak kirliliğini küresel bir sorun haline getirmiştir. Kirli topraklar, bitkilerin besin alımını zorlaştırarak verim kayıplarına yol açmakta, biyolojik çeşitliliği azaltmakta ve ekosistem dengesini bozmaktadır (Alengebawy vd., 2021; FAO, 2024). Bunun sonucunda, çevre dostu tarım yöntemlerinin benimsenmesi, organik üretim modellerinin teşvik edilmesi ve atık yönetimi politikalarının etkin şekilde uygulanması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Lori vd.,2017).

Sonuç olarak, toprak kirliliği tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini ve çevresel dengenin korunmasını tehdit eden çok boyutlu bir sorun niteliği taşımaktadır. Tarımsal ve insani kaynaklı kimyasal yüklerin azaltılması, çevre dostu üretim uygulamalarının yaygınlaştırılması ve ilaç atıklarının doğru şekilde yönetilmesi, gelecekte sürdürülebilir tarımın sağlanabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir (Chojnacka, 2024; Nwankwo vd.,2025).

Bu çalışma, tarımsal açıdan kritik öneme sahip olan toprak kirliliği sorununu çok boyutlu bir perspektifle ele almak ve özellikle farmasötik kaynaklı kirleticilerin tarımsal ekosistemler üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktır. Toprak kirliliğinin türleri, kaynakları ve tarımsal uygulamalarla ilişkisi; kirliliğin, tarımsal verimlilik, su kaynakları ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Farmasötik kirleticilerin toprağa geçiş yolları, topraktaki davranışları ve kalıcılıkları ele alınmakta; bu maddelerin tarımsal üretim, gıda zinciri ve mikrobiyal ekosistem üzerindeki potansiyel riskleri tartışılmaktadır. Farmasötik kirleticilerin yönetimine ilişkin mevcut ulusal ve uluslararası düzenlemeler incelenmekte, iklim değişikliğinin bu kirleticilerle etkileşimi ve gelecekte ortaya çıkabilecek olası riskler tartışılmaktadır. Çalışmanın genel amacı, toprak kirliliği ve farmasötik kalıntılar konusundaki mevcut bilimsel bilgiyi derleyerek, bilgi boşluklarını ortaya koymak, çevre dostu tarımsal uygulamalara ışık tutmak ve sürdürülebilir tarım politikaları için bilimsel bir temel sağlamaktır.

2. TOPRAK KİRLİLİĞİ

Toprak kirliliği, herhangi bir kimyasal veya yabancı maddenin doğal toprak ortamındaki normal konsantrasyonunu aşacak şekilde birikmesi hâlidir; bu durum, mikroorganizmalar, bitkiler ve hayvanlar dahil olmak üzere hedef olmayan organizmalar için zararlı etkiler doğurabilir (Rodríguez-Eugenio vd., 2018).

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ile Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP), toprak kirliliğinin insan sağlığı, gıda güvenliği ve ekosistem hizmetleri üzerindeki olumsuz etkisine dair kapsamlı bir değerlendirme ortaya koymuştur. Bu değerlendirmeye göre, toprak kirliliği küresel gıda sistemlerini tehdit etmekte; iklime bağlı sera gazı salınımlarını artırabilmekte, biyolojik çeşitliliği düşürebilmekte ve içme suyu kaynaklarını kirlitebilmektedir (FAO, 2021). Ayrıca, bu sorun Birleşmiş Milletler'in Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nde belirtilen yoksulluğun azaltılması (SDG 1), açlığın sona erdirilmesi (SDG 2) ve iyi sağlık (SDG 3) gibi önemli hedeflerin gerçekleştirilmesini de doğrudan etkiler (FAO ve UNEP. 2021)

UNESCO'nun da işaret ettiği üzere, hâlihazırda dünyadaki toprakların yaklaşık %75'i jeomorfolojik ve kimyasal açıdan bozulmuş durumdadır. Bu oran, mevcut eğilimler devam ederse 2050 itibarıyla %90'a kadar yükselebilir. Bu düzeyde bir bozulma, hem ekosistem dayanıklılığı hem de tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından ciddi alarm zillerini çalmaktadır (Le Monde,2024).

Toprak kirliliği, yalnızca çevresel bozulmanın bir göstergesi değil, aynı zamanda gıda güvenliği, halk sağlığı ve tarımsal sürdürülebilirlik açısından çok boyutlu bir tehdit unsuru haline gelmiştir. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan pestisitler, kimyasal gübreler, ağır metaller ve farmasötik atıklar gibi çeşitli kirleticiler, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Christou vd., 2017; Li vd., 2024). Kirli topraklarda yetişen ürünlerin hem verim hem de kalitesi düşmekte, bu da çiftçi gelirlerini azaltmakta ve tüketici sağlığını tehdit etmektedir. Özellikle arsenik, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metaller, toprakta biyoyararlanabilir formda birikerek bitki dokularına geçmekte, bu da insanlarda nörotoksisite, karsinojenite ve immün sistem bozuklukları gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Rashid vd., 2023).

Mikroplastikler ve kalıcı organik kirleticiler (POPs), toprağın mikrobiyal dengesini bozarak azot döngüsü ve organik madde dönüşümü gibi temel

ekolojik süreçleri sekteye uğratmaktadır (Zhang vd., 2024). Ayrıca, toprak kirliliği çoğunlukla yalnızca lokal değil, bölgesel ve küresel ölçekte yayılan bir sorundur; örneğin, yakın zamanda yapılan küresel bir araştırma, dünya genelindeki tarım arazilerinin yaklaşık %17'sinde toksik metal kirliliğinin güvenli eşikleri aştığını ve bu durumun yaklaşık 1,4 milyar insanı dolaylı yoldan etkilediğini ortaya koymuştur (Hou vd., 2025).

Bu çok katmanlı riskler, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda tarımsal üretim sistemlerinin geleceği açısından da bütüncül önlemler gerektirmektedir. Hem izleme hem de rehabilitasyon stratejileri, bu kirliliğin kontrol altına alınmasında kritik rol oynamaktadır.

2.1. Toprak Kirliliği Türleri ve Kaynakları

Toprak kirliliği, toprağın doğal yapısının bozulması ve kirleticilerle kirlenmesiyle ortaya çıkar. Tarım sektörü, toprak sağlığını iyileştirme amacıyla kullanılan çeşitli yöntemlerle bağlantılıdır. Ancak, tarımsal faaliyetlerin bir sonucu olarak toprakta oluşan kirleticiler, toprak ekosistemlerine ciddi zararlar verir. Tarımda kullanılan kimyasal gübreler, pestisitler ve herbisitler, toprağa zarar vererek biyolojik çeşitliliği ve verimliliği olumsuz etkileyebilir (Nuruzzaman vd., 2025). Tarımsal alanlarda kullanılan ilaçlar ve kimyasallar toprak kirliliği yaratabilir ve bu da tarım ürünlerinin kalitesini düşürür. Özellikle ağır metaller ve organik kirleticiler, topraklarda birikerek ekosistem bozulmasına neden olur (Xiang vd., 2021).

Toprak kirliliği, farklı kirleticilerden kaynaklanabilir. Bunlar arasında kimyasal, fiziksel ve biyolojik kirleticiler yer alır. Kimyasal kirlilik, özellikle tarımda kullanılan pestisitler, sentetik gübreler ve ağır metallerdir. Bu maddeler, toprağa zarar vererek ekosistem sağlığını bozar ve bitki büyümesini engeller. Ağır metallerin, özellikle kurşun, kadmiyum ve arsenik gibi metallerin topraklarda birikmesi, gıda güvenliğini tehdit eden ciddi bir sorundur (Qin vd., 2020). Tarımsal faaliyetler, özellikle aşırı gübre ve ilaç kullanımından kaynaklanan kimyasal kirliliği artırabilir. Fiziksel kirlilik, toprak erozyonu, kompaksiyonu ve sıkışması gibi sorunları içerir. Erozyon ve toprağın sıkışması, suyun toprağa sızmasını engelleyerek bitkilerin suya ulaşmasını zorlaştırır ve bu da tarımsal verimliliği etkiler (Sun vd., 2020). Biyolojik kirlilik ise zararlı mikroorganizmalar ve patojenler ile ilgilidir. Kirli topraklar, sağlıklı tarım

koşullarına neden olarak, ekosistem içinde patojenlerin çoğalmasına ve toprağın sağlığının bozulmasına yol açabilir (Gao vd., 2020).

2.2. Tarımsal Uygulamalar ve Kirlilik İlişkisi

Gübre Kullanımı

Büyüyen küresel nüfus ve iyileştirilmiş gıda kalitesi arzusu, aynı veya daha küçük alanlarda gıda üretimine olan talebin artmasına yol açmıştır. Sentetik gübrelerin kullanımı gıda üretimini önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, sentetik gübre kullanımı 1960 ile 2000 yılları arasında dünya tahıl üretiminin iki katına çıkmasına neden olmuştur (Tilman vd., 2002). Ancak, gübre uygulamasının agronomik ve ekonomik verimliliği genellikle zayıftır ve gübrenin aşırı kullanımı düşük besin kullanım verimliliği nedeniyle ürün verimliliğini azaltır (Hossain vd., 2005 ; Zhu vd., 2005). Kullanılmayan gübreler çevresel sorunlara yol açabilir (Vitousek vd., 2009 ; Withers vd., 2014). Genellikle azot, fosfor ve potasyum, gübre olarak toprağa eklenen en temel besin maddeleridir. Bunlar arasında potasyum, azot ve fosfora kıyasla daha düşük miktarlarda gereklidir ve toprakta daha uzun süre tutulur. Ancak potasyum bitkiler tarafından hızla emilir ve bu nedenle daha az çevresel tehdit oluşturur.

Pestisit Uygulamaları

Gıda mahsulleri böcekler, yabani otlar, nematodlar, virüsler, mantarlar, akarlar ve kemirgenler dahil olmak üzere 60.000'den fazla zararlı türünün tehdidi altındadır (Zhang vd., 2011). Tarımsal zararlılardan korumak için her yıl mahsullere büyük miktarlarda pestisit uygulanmaktadır. Özellikle böcek ilaçları, mantar ilaçları ve herbisitler olmak üzere pestisit kullanımı yılda 3 milyon tonu aşmaktadır (Zhang, 2018; Nuruzzaman vd., 2025).

Pestisitler, özellikle organoklorlu pestisitler, uzun bozunma süreleri nedeniyle ciddi bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Hem yüksek organizmalar hem de orada yaşayan mikroorganizmalar üzerinde sitotoksik etkilere sahip organik ve inorganik bileşiklerle bağlar oluşturabilirler. Toprakta, pestisitlerin etkili bozunması, organizmalar yalnızca bunları metabolize edip parçalayabildiğinde değil, aynı zamanda kirlenmiş ortamda hayatta kalabildiğinde meydana gelir. Bozunma hızı çeşitli faktörlere bağlıdır, örneğin kalıntının fizikokimyasal özellikleri, toprağın karakteristiği, iklim faktörleri (sıcaklık, yağış ve nem) ve pestisitleri parçalayabilen

mikroorganizma sayısı. Gianfreda ve Rao (2010) tarafından daha önce tartışıldığı gibi, topraktaki pestisitler nispeten yüksek çözünürlüğe, düşük kalıcılığa ve nispeten yüksek biyoyararlanıma sahip olmalı, bu da oldukça hızlı bir şekilde bozunmalarını sağlayacaktır. Ancak, parçalayan organizma veya hücre dışı enzim ve kimyasal maddeler, etkileşime girebilmek için birbirine yeterince yakın yerleştirilmelidir; Sıcaklık, pH ve toprak özellikleri açısından çevresel koşullar, parçalayıcı organizmaların çoğalmasına veya parçalayıcı enzimlerin katalitik etkisine izin vermelidir (Verma vd., 2014 ; Gianfreda ve Rao, 2010). Tüm bu koşullar karşılanmazsa, pestisitler parçalanmaz. Uzun süre toprakta birikerek kalıcılıklarını korurlar ve hem biyolojik toprak aktivitesini hem de enzim toprak aktivitesini olumsuz etkilerler (Wołejko vd.,2020).

Hayvancılık Atıkları ve Sulama Uygulamaları

Hayvancılık atıkları, toprağa azot (N), fosfor (P), potasyum (K) gibi önemli besin maddeleri sağlasa da, bu atıkların bilinçsiz bir şekilde depolanması veya aşırı uygulanması çevresel sorunlara yol açabilir. Örneğin, Hacısalihoğlu vd. (2022) çalışmasında, hayvansal gübrelerin taşınan besin maddeleri nedeniyle su ve toprak kirliliğine neden olabileceği, özellikle fazla uygulandığında taban suyu nitrat ve fosfor seviyelerinde artışa yol açtığı belirtilmektedir (Hacısalihoğlu, 2022). Avrupa ve İrlanda örneklerinde yapılan araştırmalar, hayvansal gübreleri (slurry) kullanmanın, topraktaki mikroorganizma popülasyonunu etkileyip verimlilik kazandırabileceği gibi; yanlış veya aşırı uygulandığında toprak asidifikasyonuna, ağır metal (ör. Cu, Zn, Cd) birikimine ve antimikrobiyal direncin artışına neden olabileceğini göstermektedir (Silva vd., 2025). Öte yandan, Rusya'daki bir deneysel çalışmada, hayvansal atıklarla sulama uygulamalarının (arasından arıtım geçmesi şartıyla) toprakta humus, azot ve aktif fosfor miktarını artırabileceği, su kapasitesini ve tohum çimlenmesini olumlu yönde etkileyebileceği kaydedilmiştir; ancak bu uygulamanın tuz birikimini de etkilediği ve uzun vadede dikkatli kullanılması gerektiği vurgulanmıştır (Mukhametov vd.,2022). Sonuç olarak, hayvancılık atıkları ve sulama uygulamaları, toprak verimliliğini artırma potansiyeline sahip olmakla birlikte; doğru yönetilmediğinde toprak yapısında bozulmaya, kirliliğe ve ekolojik bozulmalara yol açabilir.

2.3. Toprak Kirliliğinin Tarımsal Verim Üzerindeki Etkileri

Toprak kirliliği, tarımsal verimliliği hem doğrudan hem de dolaylı olarak olumsuz etkileyen önemli bir çevresel sorun olarak öne çıkmaktadır. Kirli topraklarda bitkilerin besin maddelerini alma yeteneği azalmakta, bu da büyüme ve verim üzerinde ciddi kısıtlamalara yol açmaktadır.

Toprak Asitliği ve Tuzluluk (Salinite)

- Global ölçekte yapılan araştırmalar, toprak asitliği nedeniyle tarımsal verimin ortalama %13,7 oranında düştüğünü, sebze ürünlerinde bu oranın %33, mısır ve buğdayda ise yaklaşık %18 civarında gerçekleştiğini göstermektedir (Du vd., 2024). Bu etki, koklama sistemi ve besin alımındaki bozulma nedeniyle kök gelişiminde ve besin elementlerinin (N, P, K, Ca) emiliminde azalma olarak yansımaktadır (Du vd., 2024).
- Tuzluluk da ciddi bir sorundur: FAO'nun raporuna göre dünya genelinde 1,4 milyar hektar alan tuzluluk sorunu yaşamakta; bazı bölgelerde verim kayıpları %70'e kadar çıkabilmektedir (FAO, 2024).
- Türkiye özelinde ise Iğdır Ovası'nda yapılan çalışmada topraktaki salinitenin yükselmesi, ficus ve kök biyomasında %90'a varan azalmalara neden olmuş, besin elementlerinin (Ca, K, P, Fe) alımını engellemiş ve iyonik dengesizlikle birlikte oksidatif stres göstergelerinde ciddi yükselmeler gözlenmiştir (Özden vd., 2025).

Ağır Metaller ve Kimyasal Kirleticiler

- Ağır metaller, bitki gelişimini doğrudan etkileyerek verim düşüşlerine neden olmaktadır. Örneğin, pirinç tarımında kadmiyum (Cd) stresi, pano ve spikelet verimliliğini olumsuz etkileyerek kalite ve miktar açısından zarar yaratmaktadır (Xia vd.,2024).
- Ek olarak, dünya genelinde tarım alanlarının %14–17'si bir veya birden fazla toksik metal (arsenik, kadmiyum, kurşun vb.) bakımından güvenli sınırları aşmakta; bu durum yaklaşık 242 milyon hektarlık alanda, 900 milyon–1,4 milyar kişiyi insan sağlığı ve verim açısından risk altına almaktadır (URL-1).

Toprak Düzenleyiciler ve Verim Artışı (Pozitif Müdahale)

- Olumsuz etkilerin tersine, toprak asidik ve tuzlu koşullarına yönelik müdahaleler de verim artışına katkı sağlamaktadır. Örneğin; humik ve fulvik asitlerin tuzlu topraklardaki arpa verimi üzerindeki olumlu etkileri 2024 yılında BMC Plant Biology'de yayımlanan bir çalışmada gösterilmiştir (Alsudays vd., 2024).
- Ayrıca, organik toprak düzenleyicilerin (örneğin gübre, kompost, biochar) tuzlu-alkalik topraklardaki verim üzerindeki etkisini incelediği araştırmada, verim artışının %36,5'lara ulaştığı ve topraktaki tuzluluğun, pH ve tuz içeriğinin azaldığı, ve besin içeriklerinin arttığı belirtilmiştir (Li vd., 2024).

Toprak Asitliğine yönelik Düzenleyiciler

- Araştırmalara göre, kireç, biyo-karbon (biochar), hayvan gübresi ve saman gibi düzenleyiciler, asidik topraklarda pH'ı ve verimi önemli ölçüde artırmaktadır. Örneğin, verim artışları %29–57 arasında değişmekte; pH artışı da yaklaşık %12–17 civarındadır (Zhang vd., 2023).

2.4. Toprak Kirliliği ile Su Kaynakları Arasındaki Etkileşim

Toprak kirliliği, su kaynaklarıyla doğrudan etkileşim hâlinindedir ve bu etkileşim, hem su hem de toprak ekosistemlerinin kalitesi üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Tarımsal faaliyetlerde yaygın olarak kullanılan kimyasal gübreler ve pestisitler, sulama suyu yoluyla topraktan yüzey ve yer altı su kaynaklarına geçebilir; bu durum suyun kimyasal bileşimini bozarak su kalitesinde ciddi düşüşlere yol açabilir (Singh ve Craswell, 2021). Sulama sırasında kullanılan kirlı su, toprak profiline sızarak yer altı su kaynaklarını kontamine edebilir ve bu da özellikle içme suyu güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturur (Rashid vd.,2023).

Toprakta biriken kimyasal maddeler, özellikle nitrat ve fosfat gibi tarımsal kaynaklı besin elementleri, sulama suyu aracılığıyla taşınarak yüzey sularına ulaşabilir ve bu süreç su kirliliğini artırabilir (Turner vd., 2012). Bu tür kirleticiler, su kalitesini düşürmekle kalmayıp aynı zamanda sucul ekosistemlerin sağlığını da tehdit eder. Sulama uygulamaları ile taşınan bu kirletici unsurlar, yerel su kaynaklarının ekolojik dengesini bozabilir ve dolaylı

olarak tarımsal verimliliği olumsuz yönde etkileyebilir (Malakar vd., 2019). Toprak ve su kirliliğinin birleşik etkisi, çevresel sürdürülebilirliği tehdit ederek ekosistem hizmetlerinde bozulmalara yol açmaktadır.

2.5. Toprak Kirliliğinin Biyolojik Çeşitlilik Üzerindeki Etkileri

Toprak biyoçeşitliliği, toprak yüzeyinin altındaki yaşamın karmaşıklığını ifade eder; bu yaşam, bakteriler, mantarlar, protozoalar, böcekler, solucanlar ile diğer omurgasız ve omurgalı organizmaları kapsar (Adhikari ve Hartemink, 2016). Bu karmaşık yapı, flora ve fauna arasındaki dinamik etkileşimlerle bir biyolojik aktivite ağı oluşturarak ekosistemin sürdürülebilirliğine katkı sağlar. Toprak biyoçeşitliliği, bitki artıklarının ayrıştırılması, toprak direncinin güçlendirilmesi ve üst toprak bitki örtüsünün gelişimi gibi temel işlevlerde rol oynar. Aynı zamanda, topraktaki organizma çeşitliliği toprak sağlığını ve verimliliğini destekler; nitekim toprak sistemi, küresel toplam biyoçeşitliliğin yaklaşık %25'inden fazlasını barındırmaktadır (Bach vd.,2020).

Toprak kirliliği, bu biyolojik çeşitliliği doğrudan tehdit eden önemli bir çevresel sorundur. Toprakta biriken kimyasal maddeler, mikroorganizmalar ve diğer toprak faunası üzerinde toksik etkiler yaratabilir (Gao vd., 2020). Tarımsal kimyasalların aşırı ve kontrolsüz kullanımı, toprak faunasının yapısını bozarak bazı zararlı türlerin aşırı çoğalmasına neden olabilir (Huang vd., 2019). Bu durum, biyoçeşitliliğin azalmasına, dolayısıyla toprak sağlığının bozulmasına ve bitki gelişiminin olumsuz etkilenmesine yol açar. Kirlenmiş topraklarda mikroorganizma çeşitliliği azalmakta ve bu da toprak ekosistem işlevlerinin zayıflamasına neden olmaktadır (Dhuldhaj vd., 2023). Ayrıca, azalan biyoçeşitlilik, bitkilerin zararlılara karşı direnç kapasitesini düşürerek tarımsal verimliliği olumsuz etkiler.

Küresel düzeyde toprak biyoçeşitliliği hâlâ göz ardı edilen bir alan olmaya devam etmektedir. Biyoçeşitlilik Sözleşmesi'ne taraf olan ülkelerin çoğu, toprakları veya yer altı biyoçeşitliliğini doğrudan koruyan politikalar geliştirmemiştir (Guerra vd., 2021). Yer üstü biyoçeşitliliğini korumayı amaçlayan korunan alanlar, toprak altındaki organizmalar için yeterli koruma sağlamayabilir (Cameron vd., 2018). Örneğin, Ciobanu vd. (2019), korunan alanların nematod çeşitliliğini koruma konusunda etkisiz olduğunu ortaya

koymuştur. Bazı dolaylı “koruma taşmaları” yaşansa da, toprak biyoçeşitliliğindeki kayıpların ve gecikmiş müdahaleler sonucu oluşabilecek öngörülemeyen etkilerin önlenmesi için, bu alana özel koruma stratejilerine acilen ihtiyaç vardır.

2.6. Tarımsal Çevre Yönetimi ve Kirlilikle Mücadele

Toprak kirliliğiyle mücadele, entegre ve sürdürülebilir çevre yönetimi stratejileri gerektirmektedir. Kimyasal gübre ve pestisit kullanımının sınırlandırılması, sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamında toprağın korunmasına katkı sağlar (Nuruzzaman vd.2025). Bunun yanında, organik tarım doğal gübre ve yöntemlerin kullanımını teşvik ederek toprak sağlığını iyileştirme potansiyeline sahiptir (Zhang vd., 2020). Erozyonun önlenmesi ve toprak sağlığının korunması için geliştirilen koruyucu uygulamalar (Gao vd., 2020) hem ekosistem sağlığını korur hem de tarımsal verimliliği artırır. Aynı zamanda biyolojik kontrol yöntemleri ve yenilikçi tarım teknikleri, toprak kirliliğiyle mücadelede önemli araçlar olarak öne çıkmaktadır (Jiang vd., 2019). Kirli toprakların yeniden verimli hale getirilmesi amacıyla toprak yenileme ve rehabilitasyon teknikleri etkili çözümler sunar (Wu vd., 2018).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, aşağıdaki sürdürülebilir ve yenilikçi yaklaşımların bu stratejilere ek olarak uygulanmasını önermektedir:

- **Biyolojik kökenli gübreler ve mikrobiyal uygulamalar:** Mikroorganizmalarla zenginleştirilmiş biyolojik toprak katkıları, kimyasal yükü azaltır ve toprağın biyolojik işlevselliğini destekler (URL-2).
- **Yeşil teknolojiler ve döngüsel ekonomi:** Endüstriyel atıkların, dolomit ve çelik cürufırları gibi minerallerle kombinasyonu, kirli toprakların restorasyonunda kaynak geri kazanımına dayalı çözümler sağlar (Ghisman vd.2025).
- **Fito ve biyoremediasyon teknikleri:** Bitkisel (phytoremediation) ve mikrobiyal temelli (bioremediation, mycoremediation) yöntemler, doğal ve çevre dostu çözümler sunar. Özellikle ağır metaller ve organik kirleticilere karşı etkilidir (Lavanya vd., 2024; Ghisman vd., 2025).
- **Nano-teknoloji temelli uygulamalar:** Nanomadde ve nano-kompozitler, kontaminantları etkili ve seçici bir şekilde immobilize

edip giderme imkânı tanır. Ancak uzun vadeli çevresel risk analizleri gereklidir (Ghisman vd., 2025).

- **Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yaklaşımları:** Phytoeksraksiyon ve kimyasal stabilizasyon gibi stratejilerin kapsamlı çevresel etkileri LCA analizleriyle değerlendirilmelidir, böylece restorasyon uygulamalarının toplam ekolojik ayak izi göz önünde bulundurulabilir (Jin vd., 2021)
- **Organik toprak iyileştiricileri ve sürdürülebilir tarım:** Kompost, çiftlik gübresi ve biochar gibi organik katkılar kombine edildiğinde toprak yapısını iyileştirir, mikrobiyal faaliyeti artırır ve tarımsal verimliliği yükseltir (Chowdary, 2024).
- **Karbon çiftçiliği ve rejeneratif tarım yaklaşımları:** Ekim nöbeti, minimal sürüm ve organik maddeyi artırmaya yönelik yöntemler, toprak sağlığını destekleyip karbon tutulumu sağlar ve iklim değişikliği ile mücadeleyi destekler (Cammarata vd., 2025).
- **Genetik olmayan mikrobiyal simbiyoz geliştirme:** Bazı bitki genotiplerinde köklerin mikrobiyal ortaklarla simbiyotik ilişkisini güçlendiren doğal mutasyonlar, daha az gübreye ihtiyaç duyan bitki çeşitlerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir (Brar vd.2024).

2.7. Toprak Kirliliğinin Gelecekteki Riskleri ve Projeksiyonlar

Toprak kirliliği, günümüzde küresel çevre sorunları arasında ön sıralarda yer almakta olup, gelecekte tarımsal üretim üzerindeki etkileriyle daha da belirgin hale gelecektir. Tarım, gıda üretiminin temelini oluşturmakta; bu bağlamda, toprak sağlığı, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, toprakta biriken kirleticiler giderek artmakta ve bu durum, tarımsal verimlilik üzerinde doğrudan tehdit oluşturmaktadır (Wan vd.,2024). Toprak kirliliğinin temel kaynakları arasında endüstriyel atıklar, kimyasal gübreler, pestisitler ve ağır metaller yer almakta; bu kirleticiler, hem tarım arazilerinin hem de çevresel ekosistemlerin sağlığını olumsuz etkilemektedir (Rashid vd.,2023). Mevcut eğilimler, gelecekte bu kirleticilerin daha geniş alanlara yayılabileceğini ve tarımsal üretimi yerel düzeyin ötesinde küresel ölçekte tehdit edebileceğini göstermektedir (Gao vd., 2020).

Toprak kirliliğinin gelecekteki etkileri yalnızca bitki gelişimini sınırlandırmakla kalmayacak, aynı zamanda tarımda kullanılan su kaynaklarının da kirlenmesine yol açacaktır. Sulama suyu, birçok bölgede tarımsal üretimin temel unsurlarından biridir. Ancak, kirliliği topraklardan gelen akışkanlar ve süzüntüler, sulama sularına toksik maddelerin karışmasına neden olabilir. Bu tür kirlilik, hem bitkilerin sağlığını hem de ürün kalitesini olumsuz etkileyerek ürün kayıplarına ve insan sağlığı üzerinde potansiyel risklere yol açabilir (Zhang vd., 2020). Bu bağlamda, gelecekte su yönetimi ve sulama tekniklerinin daha dikkatli ve çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda planlanması gerekmektedir (Liu vd., 2019).

Ayrıca, toprak kirliliği biyolojik çeşitlilik üzerinde de yıkıcı etkilere sahiptir. Toprakta yaşayan mikroorganizmalar, bitkilerin besin alımı ve toprak verimliliği açısından temel işlevler üstlenmektedir. Ancak, kirlenmelerin yoğunluğu arttıkça bu mikroorganizmaların popülasyonları azalmakta ve toprak biyolojik çeşitliliği ciddi oranda azalmaktadır (Chen vd., 2019). Bu durum, ekosistem hizmetlerinin bozulmasına ve uzun vadede toprakların tarımsal açıdan işlevsiz hale gelmesine yol açabilir.

Kimyasal maddelerin toprakta birikimi yalnızca mikroorganizma ve bitki sağlığı açısından değil, aynı zamanda insan sağlığı açısından da ciddi tehditler barındırmaktadır. Özellikle ağır metallerin toprakta birikmesi, bitkiler tarafından absorbe edilerek gıda zincirine katılmalarına neden olur. Bu durum, tüketici sağlığını tehdit eden önemli bir risk faktörüdür (Gao vd., 2020). Ayrıca, gelecekte kimyasal gübre ve pestisit kullanımının sınırlandırılması gündeme geldiğinde, bu sınırlama tarımsal verimlilik üzerinde de baskı oluşturabilir (Zhao vd., 2021). Bu bağlamda, biyolojik ve organik gübrelerin önemi artmakta ve sürdürülebilir tarım uygulamaları içinde daha fazla yer bulmaktadır.

Toprak kirliliğinin gelecekteki etkilerinin azaltılması yalnızca yerel ya da ulusal yönetimlerin aldığı önlemlerle sınırlı kalmamalı; tarım sektörünün çevre dostu uygulamaları benimsemesi ve sürdürülebilir yöntemlerin yaygınlaştırılması da öncelikli hale gelmelidir (Keesstra vd., 2018). Organik tarım, agroekolojik yaklaşımlar ve çevresel etkisi düşük üretim sistemleri, gelecekte toprak sağlığını korumada etkin rol oynayabilir. Bu kapsamda, çevre politikalarının güçlendirilmesi, toplumsal farkındalık düzeyinin artırılması ve çiftçilerin desteklenmesi kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, verimli sulama yöntemleri ve etkin toprak koruma tekniklerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir

tarım politikalarının başarısı açısından belirleyici olacaktır (Mondaca vd.,2024).

3. FARMASÖTİK KAYNAKLI TOPRAK KİRLİLİĞİ VE TARIM ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak, sürdürülebilir tarımın temel dayanağını oluşturur. Toprak yalnızca endüstriyel kimyasallar ve pestisitlerle değil, aynı zamanda farmasötik kalıntılarla da kirlenmektedir. Antibiyotikler, analjezikler, hormonlar ve antidepresanlar gibi farmasötik maddeler, hem insan hem de hayvan kullanımının yaygınlığı nedeniyle çevreye yayılarak toprak kirliliğine neden olmaktadır (Kümmerer vd., 2009).

Farmasötik bileşiklerin büyük bir kısmı atık su arıtma tesislerinde parçalanmadan çıkmakta ve hayvan dışkısıyla birlikte tarım alanlarına taşınmaktadır (Jechalke vd., 2014). Özellikle veteriner tıbbında kullanılan antibiyotiklerin, hayvanların sindirim sisteminden neredeyse değişmeden atılması toprağa yayılmalarını kolaylaştırmakta; bu da toprağın mikrobiyal dengesi ve dolayısıyla verimliliği üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Toprak mikroorganizmaları, bitkilerin azot fiksasyonu, fosfor mobilizasyonu ve organik madde dönüşümü gibi kritik ekosistem işlevlerini yerine getirmesi açısından hayati öneme sahiptir. Ancak farmasötik kalıntılar, bu organizmaların büyümesini ve aktivitesini baskılayarak toprak sağlığını düşürmektedir. Örneğin, topraktaki antibiyotiklere maruz kalan mikroorganizma toplulukları, metabolik çeşitlilik kaybı yaşamakta ve çeşitli karbon kaynaklarını kullanma kapasitelerinde azalma gözlemlenmektedir (Pino-Otín vd.,2017; Cycon vd.,2019).

Gerçek dünyada da görüldüğü üzere, özellikle antibiyotik, NSAID ve β -bloker sınıfı ilaçlar, toprak mikroflorasının fonksiyonel çeşitliliğini ve biyokütlesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Pino-Otín vd., 2017). Ayrıca, antibiyotik varlığı, nitrifikasyon ve denitrifikasyon gibi kritik toprak süreçlerinde azalmaya yol açabilir (Cycon vd., 2019).

Antibiyotik kalıntıları yalnızca mikrobiyal topluluk değil, aynı zamanda ARG (antibiyotik direnç genleri) yayılımında da risk oluşturmaktadır. Küçük, subletal konsantrasyonlar dahi direnç genlerinin seçilmesine ve yatay gen transferine zemin hazırlayabilir, bu da toprağın direnç deposu haline gelmesine yol açar (Zhao vd., 2019).

Bitkiler ise bu farmasötik maddeleri köklere alarak bünyelerinde biriktirebilirler. Örneğin, marul, buğday ve domates gibi temel tarım ürünlerinde antibiyotik kalıntıları tespit edilmiştir (Christou vd., 2017). Bu tür kalıntıların gıdaya geçmesi, hem tüketici sağlığı açısından risk oluşturmakta hem de antibiyotik direncinin toplum içinde yayılmasına katkı sağlamaktadır (Boxall vd., 2012).

Ek olarak, farmasötiklerin kök gelişimini engelleyebileceği, klorofil sentezini bozabileceği ve bitkilerin genel büyüme hızlarını düşürebileceği bilimsel verilerle desteklenmiştir. Bu etkiler, verim ve kalite kayıplarına yol açarak tarımsal üretimde doğrudan verim düşüşüne neden olmaktadır.

Toprak faunası da bu kirlilikten etkilenmektedir; toprak solucanları, nematodlar ve diğer omurgasızlar zarar görmekte, organik madde dönüşümü ve toprak yapı bütünlüğünde ciddi bozulmalar meydana gelmektedir (Boxall vd., 2012).

Yoğun hayvansal gübre ve atığın kullanıldığı tarım alanlarında, farmasötik kirlilik daha yaygın olup, toprak mikrobiyal topluluklarda dirençli bakteri oranlarının artışıyla beraber sürdürülebilir tarımsal sistemler tehdit altına girmektedir (Tasho & Cho, 2016). Ayrıca, toprakta antibiyotik direncine sahip bakterilerin ortaya çıkması, hem ekosistem hem de halk sağlığı bakımından önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

Bu riskleri azaltmak için, antibiyotik ve diğer farmasötik ürünlerin kullanımına yönelik sıkı düzenlemeler gereklidir. Organik tarım uygulamaları ve biyolojik mücadele yöntemleri, kimyasal girdileri azaltarak toprak sağlığını koruma potansiyeli taşır. Ayrıca ileri arıtma teknolojilerinin yaygın kullanımı ve gübrelerin farmasötik kalıntılardan arındırılması da kritik önlemler arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, farmasötik kaynaklı toprak kirliliği, modern tarımın karşı karşıya olduğu ciddi bir sorundur. Bu kirliliğin ekosistem sağlığı, gıda güvenliği ve halk sağlığı üzerindeki etkileri, bilimsel, yönetsel ve teknolojik düzeyde kapsamlı çözümlerin eş zamanlı uygulanmasını gerektirmektedir.

3.1. Farmasötik Kirleticilerin Kaynakları ve Toprağa Yayılımı

Son yıllarda insan ve veteriner ilaçlarının tüketimi önemli ölçüde artmıştır. ^{5, 8} İlaç üretim laboratuvarlarının atıkları , atık su arıtma tesislerinin

ilaçları tamamen ortadan kaldıramaması nedeniyle ^{7,9} Son kullanma tarihi geçmiş/kullanılmayan ilaçların yetersiz bertaraf uygulamaları ¹⁰ ve evcil hayvanlar da dahil olmak üzere hayvancılıkta kullanılan veteriner ilaçlarının katı besiyerlerine sızması ¹¹ , çevreye ulaşan ilaç kalıntılarının miktarında artışa katkıda bulunmuştur . Bugüne kadar, çok çeşitli çevresel matrislerde yaklaşık 1000 farklı ilaç tespit edilmiştir. 12 (Abajo vd,2024).

İlaçlar ve kişisel bakım ürünleri (PPCP'ler), kentsel kanalizasyon, evsel atık su, çöplük alanları, endüstriyel atık su , hastane atık suyu ve kentsel veya konut kanalizasyonu dahil olmak üzere çeşitli yollarla çevreye salınır (Ramprasad ve Philip, 2018 ; Yoo vd., 2018). Son çalışmalar, ibuprofen gibi bazı PPCP'lerin yüksek hareketliliğini göstererek derin toprak katmanlarına sızmalarını sağlamıştır (Shu vd., 2023). Bu PPCP'ler ayrıca yeraltı suyuna sızarak toprak ve tortularda birikmelerine yol açabilir. Tersine, bisfenol A gibi bazı PPCP'ler güçlü adsorpsiyon sergiler ve toprakta uzun süreler boyunca kalabilir (Zi vd., 2023). Tetrasiklinler ve siprofloksasin dahil olmak üzere pozitif yüklü antibiyotikler, elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler nedeniyle doğal topraklarda minimum göç oranları gösterir ve bu da toprak profillerinde uzun süreli kalmalarıyla sonuçlanır (Dai vd., 2020). Dahası, PPCP'lerin topraktaki transferi toprak tipinden etkilenir. Menahem vd. (2016), Gd-DTPA ve ROX iyonlarının kumlu toprağa kıyasla topraklarda daha dağınık göç özellikleri gösterdiğini gözlemledi ;bu, toprağın karmaşık gözenek yapısına, bol miktarda adsorbanlara ve aktif mikrobiyal aktiviteye atfedilebilir . Sonuç olarak, PPCP'lerin topraktaki kaderi karmaşıklık ve değişkenlik ile karakterize edilir ve toprak ortamlarındaki davranışlarını anlamamızı geliştirmek için daha kapsamlı araştırmalar gerektirir.

3.2. Toprakta Farmasötik Kalıntıların Davranışı

Çeşitli antropojenik aktiviteler, ilaçların ve PPCP'lerin çevrede bulunmasına katkıda bulunur. Bunlar arasında, son kullanma tarihi geçmiş veya kullanılmayan ilaçların uygunsuz şekilde atılması, üretim ünitelerinden, sağlık tesislerinden ve veterinerlik tedavilerinde kullanılan ilaçlardan kaynaklanan atıklar yer alır (Grossberger vd.,2014).

Dünya, nüfus artışı, kentleşme, artan yaşam standartları ve artan gıda talebi gibi faktörler nedeniyle şu anda önemli bir su sıkıntısıyla karşı karşıyadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, arıtılmış atık su giderek daha fazla

sulama amaçlı kullanılmaktadır. Ancak bu uygulama, tarım alanlarına yeni ortaya çıkan endişe verici kimyasalların karışmasına ve kirliliğin daha da artmasına neden olabilir (Borgman vd.,2014).

Geleneksel atık su arıtma yöntemleri genellikle tüm farmasötik bileşikler etkili bir şekilde gidermede başarısız olur ve bu da bunların düşük (ng/mL) ile yüksek ($\mu\text{g/mL}$) seviyelerde atık sulara ve biyolojik katılarda kalmasına neden olur (Sui vd.,2011; Vanderford, 2006). Biyolojik katıların ve arıtılmış atık suyun araziye uygulanması gibi yaygın tarımsal uygulamalar, bu farmasötiklerin toprakta yaygın olarak bulunmasına ve bazen mg/kg konsantrasyonlarına ulaşmasına yol açmıştır (Carter vd.,2014). Bitkiler bu kimyasalları emerek besin zincirine girmelerine ve hem hayvanlar hem de insanlar için sağlık riskleri oluşturmalarına olanak tanıyabilir (Christou vd.,2017; Sallach vd.,2015). Örneğin, karbamazepin ve metaboliti, arıtılmış atık suyla sulanan çiftlikten taze yeşilliklerin tüketilmesinden sonra insan idrar örneklerinde tespit edilmiştir (Paltiel vd.,2016). Bu kimyasalların bitkiler tarafından emilimi, toprak kirliliği seviyeleri, sorpsiyon ve bozunma süreçleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir ve bu faktörler, bu maddelerin temel besinlerle birlikte emilim için kullanılabilirliğini belirler (Li vd., 2018). İlginç bir şekilde, birçok durumda, metabolitler ana bileşiklerinden daha yüksek konsantrasyonlarda birikebilir (LeFevre vd., 2015, 2017). Terleme süreçleri de bu kimyasalların bitkiler içinde taşınmasında önemli bir rol oynar (Dodgen vd., 2015). Bir diğer önemli endişe ise antibiyotiklerin atık su arıtma tesislerinde ve kirlenmiş topraklarda antibiyotiğe dirençli bakteriler üretme ve yayma ve en sonunda tüketicilere ulaşma potansiyelidir (Manaia vd.,2018; Pina vd.,2020).

Sistemik meta-analizler, karbamazepine ve sulfamethoxazole gibi ilaçların özellikle marul, kır lülesi ve kabak gibi ürünlerde yüksek biyolojik faktörleri (BCF) gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum bitki türü ve ilaç özelliklerine bağlı olarak değişim arz etmekte olup, bazı bileşikler tarımsal sistemlerde birikime yol açabilmektedir (Sleight vd.,2023).

Farmasötiklerin toprak üzerindeki etkisi yalnızca bitki alımıyla sınırlı kalmaz; bu bileşikler topraktaki besin döngüsünü düzenleyen mikroorganizmaları baskılayarak, karbon ve azot döngüsünde bozulmaya neden olabilir. Örneğin, karbon ve azot çevrimindeki biyokimyasal süreçlerin bozularak bitki besin erişiminde azalma olduğu rapor edilmiştir (Liv d.,2024).

Ayrıca, bazı farmasötiklerin toprak pH'ını değiştirdiğine ve toprak faunasını (örneğin toprak solucanları) doğrudan etkilediğine dair kanıtlar mevcuttur (Hammad vd.,2018).

Yine, bitkilerde farmasötik birikimi üzerine yapılmış çalışmalarda; özellikle marul, ıspanak, turp ve domates gibi sebzelerde bu kalıntıların yaprak, kök ve tohum gibi organlara geçiş yaptığına dair veriler ortaya konmuştur (Nwankwo vd.,2025). Bu durum, gıda güvenliği açısından önemli tehditler oluşturmakta, halk sağlığı ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından kaygı yaratmaktadır.

3.3. Tarımsal Verim ve Gıda Zinciri Üzerindeki Etkiler

Farmasötik maddeler, özellikle antibiyotikler ve psikiyatrik ilaçlar, tarımsal verim ve gıda zincirine önemli çevresel etkilerle entegre olabilir. Hayvan gübreleri, atık sular ve biyosolidlerin tarımsal arazilere uygulanması, bu bileşenlerin toprağa taşınmasına ve bitkiler tarafından emilmesine neden olur. Örneğin, sülfanamidler ve tetrasiklin gibi antibiyotikler topraktaki organizmalara toksik etki gösterebilir, böylece toprak verimliliğini azaltabilir ve gıda zincirine nüfuz edebilir (URL-3). Ayrıca yapılan bir çalışmada, soğan, turp ve ıspanak gibi sebzelerde çeşitli farmasötik kalıntıların biriktiği ve bu durumun hem bitkilerin sağlığına hem de gıda zincirini tüketen canlılara olumsuz etkileri olabileceği belirtilmiştir (Menacherry vd.,2023). Geniş kapsamlı bir derlemede de, antibiyotiklerin toprağa taşınması ve bitkiler tarafından emilerek birikmesi; bunun sonucunda mahsullerin veriminde düşüşler ve gıda güvenliği açısından potansiyel risklerin ortaya çıkması vurgulanmıştır (Pan ve Chu,2017). İsrail'de yürütülen saha çalışmasına göre, geri kazanılmış atık su ile sulanan tarım arazilerinde binlerce tarladan alınan toprak, su ve ürün örneklerinde farmasötikler tespit edilmiştir; özellikle yapraklı sebzelerde örneklemelerin neredeyse tamamında ilaç kalıntıları bulunmuş, bu da bu bileşenlerin gıda zincirine geçiş riskini açıkça göstermektedir (Mordechay vd., 2021). Sonuç olarak, farmasötiklerin tarımda yaygın şekilde toprağa ve bitkilere taşınması, hem tarımsal verim hem de gıda güvenliği açısından ciddi etkiler doğurmakta, bu nedenle bu etkilere yönelik kapsamlı değerlendirmeler ve yönetim stratejileri geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.4. Antibiyotik Direnci ve Mikrobiyal Ekosistem Üzerine Etkiler

Toprak kirliliği, özellikle antibiyotikler, ağır metaller ve çeşitli kimyasal kirleticilerin birikimi aracılığıyla mikrobiyal ekosistemlerde antibiyotik direncini teşvik eden ciddi bir risk oluşturmaktadır. Terrestrial ekosistemler, toprak dirtozumunda resistom oluşumu ve dirençli bakterilerin yayılması açısından kritik bir rol oynar; özellikle agroekosistemlerde antimikrobiyal direnç taşıyan bakteri oranı oldukça yüksektir (Symochko vd., 2023). Benzer şekilde, tarımda kullanılan hayvan gübreleri ve çamur (slurry), antibiyotik kalıntıları ve antibiyotik dirençli bakterileri toprak ortamına taşıyarak direncin yerleşmesini kolaylaştırabilir; düşük konsantrasyonlarda bile bu maddeler antibiyotik direncine seçim baskısı uygulayabilir (Elder vd., 2022). Metagenomik analizler, petrol, maden atıkları veya diğer kimyasal kirleticilerle kontamine edilmiş ortamlarda, özellikle çoklu antibiyotik direncine neden olabilen efflux pompa genlerinin ve mobil genetik elementlerin (örneğin *intI1* ve *IS26*) yaygınlaştığını göstermiştir (Subirats vd., 2023). Ağır metal kirliliği de benzer şekilde topraktaki mikrobiyal topluluklarda antibiyotik direncini artırabilir; İsveç'teki bir orman zemininde yapılan çalışmada, bakır kirlenmesinin bakteriyel topluluklarda bakır toleransını artırmasının yanı sıra tetrasiklin direncinin de yükselmesine aracılık ettiği saptanmıştır (Rabow vd., 2022). Ayrıca, fiziko-kimyasal toprak parametreleri, özellikle tarım alanı topraklarında mobil genetik elementlerin ve direnç genlerinin bolluğu ile doğrudan ilişkilidir; topraktaki ağır metal içeriği, alüminyum, azot ve magnezyum gibi faktörler ARG ve MGE yoğunluğunu pozitif şekilde etkilemektedir (Szadziul vd., 2025). Sonuç olarak, toprak kirliliği sadece topraktaki mikrobiyal çeşitliliği bozmakla kalmaz, aynı zamanda antibiyotik direncinin gelişmesine ve yayılmasına zemin hazırlayarak çevresel ve halk sağlığı açısından uzun vadeli tehditler oluşturur.

3.5. Gelecekteki Riskler ve Bilgi Boşlukları

İlaç kullanımındaki küresel artış, özellikle insan ve hayvan sağlığı yönünden önemli faydalar sunsa da, çevresel etkileri —özellikle toprak ekosistemleri üzerinde— giderek daha büyük bir sorun haline gelmektedir. Bu ilaçların önemli bir kısmı metabolize edilmeden vücuttan atılır ve atık su sistemlerine karışır (Boxall vd., 2012). Atık su arıtma tesislerinin çoğunlukla

bu bileşenleri tamamen uzaklaştıramaması nedeniyle, sulama suyu, kanalizasyon çamurları (biyokatı) ve hayvansal gübreler yoluyla bu kalıntılar tarım arazilerine taşınmaktadır. İlaç tüketimindeki artış, bu kirliliğin yaygınlığını ve yoğunluğunu ciddi ölçüde artırma potansiyelindedir.

Toprak ekosistemlerinde uzun süre kalıcı (persistant) kalabilen antibiyotikler, hormonlar ve diğer farmasötikler; mikrobiyal çeşitliliğin azalmasına, azot fiksasyonu gibi kritik süreçlerin yavaşlamasına yol açabilir. Bu tür bozulmalar, bitki büyümesi ve tarımsal verimliliği doğrudan düşürür (Tasho & Cho, 2016).

Geleceğe yönelik senaryolarda, bu maddelerin tarımsal ürünlerde daha yoğun bir şekilde birikeceği ve gıda güvenliği ile halk sağlığını olumsuz etkileyeceği öngörülmektedir. UTOPIC veritabanına göre, carbamazepine ve sulfamethoxazole gibi ilaçların bitkilerde yaygın olarak biriktiği ve özellikle marul, domates, havuç, turp gibi ürünlerde rastlanabileceği ortaya konmuştur. Marul, domates, havuç ve turp en sık incelenen bitkiler arasında yer almaktadır (Sleight vd.,2023).

Ayrıca son çalışmalardan biri, karbamazepine gibi kalıcı bileşiklerin toprakta uzun süre dayanabileceğini ve ilerleyen iklim değişikliği, su kıtlığı ile birleştiğinde, geri kazanılmış atık su kullanımının yaygınlaşarak kalıntı riskini daha da artıracağını belirtmektedir. Bu durum özellikle gelişmekte olan ve altyapısı zayıf bölgelerde daha ciddi bir sorun haline gelebilir (Gworek vd.,2021).

Farmasötik kirliliğinin bir başka kritik yönü de, toprakta antibiyotik direnç genlerinin (ARG) yayılmasına katkıda bulunmasıdır. Bu, yalnızca tarımsal sistemlerde biyogüvenlik riskine değil, aynı zamanda küresel halk sağlığı açısından ciddi bir tehdide işaret eder.

Bu kapsamlı sorunla başa çıkmak için önerilen çözüm yaklaşımları arasında:

- Gelişmiş biyolojik arıtma sistemleri,
- Doğada daha hızlı bozunan (“yeşil”) ilaç formlarının geliştirilmesi,
- Sürdürülebilir atık yönetimi politikalarının hayata geçirilmesi,
- İlaç kalıntılarının çevresel etkilerine dair bilimsel araştırmaların artırılması yer almaktadır (Pérez-Lucas ve Navarro, 2024).

Sonuç olarak, ilaç bazlı toprak kirliliği, gelecekte tarımsal üretimde verim ve kalite düşüşlerinden toprak sağlığı bozulmasına ve gıda güvenliği

tehditlerine kadar geniş bir yelpazede sorun yaratabilecek ciddi bir çevresel risk teşkil etmektedir. Bu nedenle çevre koruma, halk sağlığı ve tarımsal sürdürülebilirlik odaklı bütüncül yaklaşımlarla önlem alınması elzemdir.

3.6. Ulusal ve Uluslararası Düzenlemeler

Toprakta farmasötik kirleticilerle ilgili düzenlemeler, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde hâlen gelişim aşamasındadır. Uluslararası çerçevede, Kirlenmeye Kalıcı Farmasötik Kirleticiler (EPPP) kavramı dâhilinde ele alınmakta ve bu kirleticilerin yönetimi stratejik yaklaşımlarla ele alınmaktadır. Örneğin, 2022 yılında AB tarafından yenilenmiş “EU Öncelikli Maddeler Listesi”ne, makrolid antibiyotikler, diklofenak, sülfametoksazol ve venlafaksin gibi belirli farmasötikler dahil edilmiştir. Bu adım, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Sürdürülebilir Kimyasallar Stratejisi kapsamında temiz su hedeflerine katkı sağlamaktadır (Perez-Lucas vd., 2024).

Daha geniş perspektifte, SAICM (Strategic Approach to International Chemicals Management) küresel düzeyde kimyasalların çevresel zarara yol açabilecek etkilerini yönetmeyi amaçlayan, BM destekli uluslararası bir çerçevedir. EPPP konusu, SAICM içerisinde tanınmış bir önceliktir; ancak mevcut uygulamalarda düzenleyici boşluklar ve zayıf koordinasyon dikkat çekicidir (Miettinen vd., 2021).

Ulusal düzeyde ise, bazı ülkelerin mevcut düzenlemeleri modern kirleticileri yeterince kapsayamaması sorunu sürmektedir. Örneğin Birleşik Krallık, tarım arazilerine uygulanan kanalizasyon çamurlarında (biosolids) bulunan farmasötikler, PFAS ve mikroplastikler gibi yeni nesil kirleticileri düzenleyen güncel mevzuata sahip değildir. Mevcut 1989 tarihli düzenlemeler yalnızca ağır metallerle odaklıyken; İsviçre, Almanya gibi ülkeler bu uygulamaları yasaklamış ya da önemli ölçüde sınırlandırmıştır. Türkiye’de ise toprak kirliliği konusundaki hukuki çerçeve, genel olarak “Çevre Kanunu” ve “Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (2001)” ile sağlanmaktadır. Buna göre tehlikeli atıkların kontrolü ve toprakta kirlenmeye neden olan faaliyetlerin sorumluluğun gerektirdiği önlem ve yaptırımları belirlenmiştir.

3.7. İklim Değişikliği, Toprak ve Farmasötik Etkileşimleri

İklim değişikliği, toprak karbon/azot döngüsündeki değişiklikler yoluyla topraktaki mikrobiyal profilleri etkileyebilir (Naylor vd., 2020). Bu da atmosfere sera gazı emisyonuna ve mikrobiyal veya bitki

biyokütlesinde karbon immobilizasyonuna yol açabilir; bununla birlikte toprak ısınması ve artan CO₂ gibi ek yan etkilerle birlikte gelir (Sulman vd., 2014). Buna paralel olarak, iklim değişikliği genetik değişiklikleri ve bazı türlerin yok oluşunu etkileyerek yeraltı türlerinin biyolojik çeşitliliğini etkiler (Idris vd., 2022). Dahası, toprağın sıkışması, stabilitesi veya yapısı gibi temel yönler önemli ölçüde etkilenebilir (Venati vd., 2020; Filho vd., 2023)

İklim değişikliği, toprak ekosistemlerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin dönüşümünü tetikler; bu dönüşümün bir sonucu olarak, farmasötik maddelerin çevresel kaderi de değişime uğrar. Artan sıcaklıklar, topraktaki organik maddenin ayrışmasını hızlandırarak organik karbon kaybını artırır ve böylece toprak yapısını ve mikrobiyal aktiviteyi etkiler (Bolat ve çakıroğlu,2022). Sera gazı etkisinin bir bileşimi olarak toprak solunumu da, özellikle yükselen atmosfer CO₂ seviyelerine bağlı olarak yüzde 40'a varan artışlarla mikrobiyal faaliyetleri geliştirebilir (Friedlingstein vd.,2003). Bu gelişmeler ışığında, farmasötik bileşenlerin topraktaki hareketliliği, yarı ömrü ve biyoyararlanımı büyük ölçüde toprak sıcaklığına, nemine ve mikrobiyal topluluğun kapasitesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Daha sıcak koşullarda, mikrobiyal metabolizma hızı artabilir, bu da bazı farmasötiklerin daha hızlı ayrışmasına neden olurken; bazı stabil bileşikler (örneğin karbamazepin) jeomik özelliklere bağlı olarak daha kalıcı hale gelebilir (Gworek vd.,2021) Dolayısıyla, iklim değişikliğinin toprak sistemine getirdiği fiziksel ve biyolojik baskılar, farmasötik kirleticilerin çevresel süreçlerini yeniden tanımlamakta ve bu durum, hem ekosistem sağlığı hem de insan ve hayvan sağlığı açısından potansiyel riskleri artırmaktadır.

4. SONUÇ

Günümüzde toprak kirliliği, yalnızca çevresel bir bozulma değil; aynı zamanda tarımsal sürdürülebilirlik, halk sağlığı, ekonomik üretkenlik ve ekosistem işlevselliği açısından derin etkiler yaratan çok boyutlu bir tehdit haline gelmiştir. Özellikle insan ilaçlarına ait farmasötik kalıntıların atık sular, biyokatırlar ve hayvansal gübreler yoluyla tarım topraklarına taşınması, mikrobiyal dengeyi bozmakta; toprak verimliliğini, su tutma kapasitesini ve biyolojik çeşitliliği azaltmaktadır.

Bu çalışma, toprak kirliliğinin tarımsal üretim üzerindeki çok yönlü etkilerini değerlendirirken, özellikle farmasötik kirleticilerin tarım sistemleri ve

toprak ekolojisi üzerindeki rolünü bilimsel bir bağlamda ortaya koymaktadır. Toprak kirliliği yalnızca fiziksel ve kimyasal parametreleri değil, aynı zamanda biyolojik çeşitliliği, besin döngüsünü ve toprak sağlığını da olumsuz yönde etkilemektedir. Tarımsal uygulamalardan kaynaklanan kimyasal gübre, pestisit, herbisit, hayvancılık atıkları ve sulama suyu gibi unsurlar, hem toprakta birikim yaratmakta hem de yer altı ve yüzey sularına taşınarak ekosistem bütünlüğünü tehdit etmektedir. Bunun yanı sıra, farmasötik kalıntılar (özellikle antibiyotikler), atık su ve hayvan gübresi yoluyla tarım topraklarına geçmekte ve burada direnç genlerinin yayılımını artırarak hem mikrobiyal dengeyi bozmakta hem de antibiyotik direnci riskini yükseltmektedir. Bu durum, yalnızca toprak ekosistemi açısından değil, gıda zinciri üzerinden insan sağlığı açısından da ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Ayrıca, iklim değişikliği ile artan sıcaklık, kuraklık ve düzensiz yağış rejimleri, farmasötik bileşiklerin toprakta taşınımını, kalıcılığını ve bozunma hızını doğrudan etkileyerek bu kirleticilerin çevresel kaderini daha da karmaşık hale getirmektedir. Literatürde, özellikle toprak-farmasötik etkileşimlerinin uzun vadeli projeksiyonları, mikrobiyal direnç dinamikleri ve bitkisel gıdalarda farmasötik birikim düzeyleri konularında önemli bilgi boşlukları bulunduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, toprak kirliliği ile mücadelede sadece geleneksel kirlilik kaynaklarına değil, aynı zamanda yeni nesil kirleticilere (örneğin farmasötikler, mikroplastikler) odaklanan daha bütüncül ve disiplinler arası yaklaşımlara ihtiyaç vardır.

Politika yapıcılar, sürdürülebilir tarım uygulamalarını teşvik etmeli; atık yönetimi, ilaç kullanımı ve gübreleme politikalarında hem ulusal hem de uluslararası düzeyde daha sıkı düzenlemeler getirmelidir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, toprak izleme sistemleri geliştirilerek farmasötik kalıntılar düzenli olarak takip edilmeli, entegre pest ve antibiyotik yönetimi stratejileri oluşturulmalıdır. Aynı zamanda, iklim değişikliği etkilerinin toprak-farmasötik etkileşimi üzerindeki yansımaları ileriye dönük araştırma alanı olarak önceliklendirilmelidir. Sonuç olarak, toprak sağlığının korunması, yalnızca tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından değil, ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ve toplum sağlığının güvence altına alınması açısından da kritik öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

- Abajo, Z., Domingo-Echaburu, S., Évora, C., Pereda, J., Alvarez-Lorenzo, C., Rabasco, A. M., De la Casa-Resino, I., Carapeto, R., Argaluz, J., Lertxundi, U., & Orive, G. (2024). A cross-sectional study to assess the knowledge of pharmacy students about drug pollution in Spain. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 88(9), Article 101254.
- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services—A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Alengebawiy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Alsudays, I. M., Alshammary, F. H., Alabdallah, N. M., et al. (2024). Applications of humic and fulvic acid under saline soil conditions to improve growth and yield in barley. *BMC Plant Biology*, 24, 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04863-6>
- An, Q., Zhou, T., Wen, C., & Yan, C. (2023). The effects of microplastics on heavy metals bioavailability in soils: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132369. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132369>
- Bach, E. M., Ramirez, K. S., Fraser, T. D., & Wall, D. H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12(7), 2662. <https://doi.org/10.3390/su12072662>
- Bolat, İ., & Çakıroğlu, K. (2022). İklim değişimi ile toprak organik maddesi ve toprak sağlığı arasındaki ilişkiler. *Ziraat & Orman, Su Ürünlerinde Araştırma ve Değerlendirmeler*.
- Borgman, O., & Chefetz, B. (2014). Combined effects of biosolids application on the uptake of pharmaceuticals and their metabolites by lettuce. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8807–8815. <https://doi.org/10.1021/es5017894>
- Boxall, A. B., Rudd, M. A., Brooks, B. W., Caldwell, D. J., Choi, K., Hickmann, S., Innes, E., Ostapyk, K., Staveley, J. P., Verslycke, T., & Ankley, G. T. (2012). Pharmaceuticals and personal care products in the

- environment: What are the big questions?. *Environmental Health Perspectives*, 120(9), 1221–1229.
- Brar, B., Bala, K., Saharan, B. S., et al. (2024). Bio-boosting agriculture: Harnessing the potential of fungi-bacteria-plant synergies for crop improvement. *Discoveries Plants*, 1, 21. <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00023-0>
- Cai, L., Zhao, X., Liu, Z., & Han, J. (2023). The abundance, characteristics and distribution of microplastics (MPs) in farmland soil—Based on research in China. *Science of The Total Environment*, 876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162782>
- Cameron, E. K., Martins, I. S., Lavelle, P., Mathieu, J., Tedersoo, L., Gottschall, F., et al. (2018). Global gaps in soil biodiversity data. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1042–1043.
- Cammarata, M., Tadiello, T., Scuderi, A., Millar, N., & Basso, B. (2025). Regenerative practices can lead to carbon-negative orange groves in Sicily. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100504. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.100504>
- Carter, L. J., Harris, E., Williams, M., Ryan, J. J., Kookana, R. S., & Boxall, A. B. (2014). Fate and uptake of pharmaceuticals in soil–plant systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(4), 816–825. <https://doi.org/10.1021/jf404282y>
- Chen, J., Shen, W. J., Han, Y. D., & Luo, T. S. (2019). The composition of nitrogen-fixing microorganisms correlates with soil nitrogen content during reforestation: A comparison between legume and non-legume plantations. *Frontiers in Microbiology*, 10, 508. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00508>
- Chowdary, P. S. (2024). Restoration of degraded agricultural soils through organic amendments and sustainable farming practices. *Research & Reviews: Journal of Crop Science and Technology*, 13(3), 19–27.
- Christou, A., Karaolia, P., Hapeshi, E., Michael, C., & Fatta-Kassinos, D. (2017). Long-term wastewater irrigation of vegetables in real agricultural systems: Concentration of pharmaceuticals in soil, uptake and bioaccumulation in tomato fruits and human health risk assessment. *Water Research*, 109, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.033>

- Ciobanu, M., Eisenhauer, N., Stoica, I. A., & Cesarz, S. (2019). Natura 2000 priority and non-priority habitats do not differ in soil nematode diversity. *Applied Soil Ecology*, 135, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.009>
- Cycon, M., Mrozik, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2019). Antibiotics in the soil environment—Degradation and their impact on microbial activity and diversity. *Frontiers in Microbiology*, 10, Article 338. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00338>
- Dai, M., Liu, D., Liu, M., Zhou, F., Li, G., Chen, Z., Zhang, Z., You, H., Wu, M., Zheng, Q., & Xiong, Y. (2020). Patients with cancer appear more vulnerable to SARS-CoV-2: A multicenter study during the COVID-19 outbreak. *Cancer Discovery*, 10(6), 783–791.
- De Santiago-Martín, A., Meffe, R., Teijón, G., Hernández, V. M., López-Heras, I., Alonso, C. A., et al. (2020). Pharmaceuticals and trace metals in the surface water used for crop irrigation: Risk to health or natural attenuation? *Science of The Total Environment*, 705, 135825.
- Dhuldhaj, U. P., Singh, R., & Singh, V. K. (2023). Pesticide contamination in agro-ecosystems: Toxicity, impacts, and bio-based management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 9243–9270. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24381-y>
- Dodgen, L. K., Ueda, A., Wu, X., Parker, D. R., & Gan, J. (2015). Effect of transpiration on plant accumulation and translocation of PPCP/EDCs. *Environmental Pollution*, 198, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.024>
- Du, L., Zhang, Z., Chen, Y., Wang, Y., Zhou, C., Yang, H., & Zhang, W. (2024). Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 319, 109643.
- Elder, F. C. T., O'Neill, A. J., Collins, L. M., & Carter, L. J. (2022). A framework to assess the terrestrial risk of antibiotic resistance from antibiotics in slurry or manure amended soils. *Environmental Science: Advances*, 2, Article 780. <https://doi.org/10.1039/d2va00306f>
- Friedlingstein, P., Dufresne, J.-L., Cox, P. M., & Rayner, P. (2003). How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 55(2), 692–700.

- Grossberger, A., Hadar, Y., Borch, T., & Chefetz, B. (2014). Biodegradability of pharmaceutical compounds in agricultural soils irrigated with treated wastewater. *Environmental Pollution*, 185, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.037>
- Gworek, B., Kijewska, M., Wrzosek, J., & Graniewska, M. (2021). Pharmaceuticals in the soil and plant environment: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, Article 145. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04954-8>
- Hacısalıhoğlu, S. (2022). Hayvansal kaynaklı yayılı kirlilik yükleri hesabı, Bursa örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 27(1), 361–374.
- Hammad, H., Zia, F., Bakhat, H., Sh, F., Ashraf, M., Wilkerson, C., Shah, G., Jatoi, W., Khosa, I., & Shahid, M. (2018). Uptake and toxicological effects of pharmaceutical active compounds on maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.02.022>
- He, L., Li, Z., Jia, Q., & Xu, Z. (2023). Soil microplastics pollution in agriculture. *Science*, 379, 547. <https://doi.org/10.1126/science.adf6098>
- Hossain, M. F., White, S. K., Elahi, S. F., Sultana, N., Choudhury, M. H. K., Alam, Q. K., Rother, J. A., & Gaunt, J. L. (2005). The efficiency of nitrogen fertiliser for rice in Bangladeshi farmers' fields. *Field Crops Research*, 93, 94–107.
- Hou, D., Jia, X., Wang, L., McGrath, S. P., Zhu, Y.-G., Hu, Q., Zhao, F.-J., Bank, M. S., O'Connor, D., Nriagu, J., et al. (2025). Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*, 388(6744), 316–321.
- Huang, Y., Luo, X., Liu, D., Du, S., Yan, A., & Tang, L. (2021). Pest control ability, technical guidance, and pesticide overuse: Evidence from rice farmers in rural China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 39587–39597. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13607-0>
- Idris, O. A., Opute, P., Orimoloye, I. R., & Maboeta, M. S. (2022). Climate change in Africa and vegetation response: A bibliometric and spatially based information assessment. *Sustainability*, 14(9), 4974. <https://doi.org/10.3390/su14094974>

- Jechalke, S., Heuer, H., Siemens, J., Amelung, W., & Smalla, K. (2014). Fate and effects of veterinary antibiotics in soil. *Trends in Microbiology*, 22(9), 536-545. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2014.05.005>
- Jiang, C., Zhang, H., Zhang, Z., & Wang, D. (2019). Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: Dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. *Global and Planetary Change*, 172, 396–413.
- Jin, Y., Wang, L., Song, Y., Zhu, J., Qin, M., Wu, L., Hu, P., Li, F., Fang, L., Chen, C., & Hou, D. (2021). Integrated life cycle assessment for sustainable remediation of contaminated agricultural soil in China. *Environmental Science & Technology*, 55(17), 12032–12042. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02535>
- Khmelevtsova, L., Konstantinova, E., Karchava, S., Klimova, M., Azhogina, T., Polienko, E., Khammami, M., Sazykin, I., & Sazykina, M. (2023). Influence of pesticides and mineral fertilizers on the bacterial community of arable soils under pea and chickpea crops. *Agronomy*, 13, 750. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030750>
- Kümmerer, K. (2009). The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use—Present knowledge and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 90, 2354–2366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.023>
- Lavanya, M. B., Viswanath, D. S., & Sivapullaiah, P. V. (2024). Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils—A comprehensive review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 22, 100975.
- Le Monde. (2024). Widespread soil degradation alarms UNESCO. https://www.lemonde.fr/en/environment/article/2024/07/16/widespread-soil-degradation-alarms-unesco_6685619_114.html (erişim tarihi: 14 Temmuz 2024)
- Leal Filho, W., Nagy, G. J., Setti, A. F. F., Sharifi, A., Donkor, F. K., Batista, K., & Djekic, I. (2023). Handling the impacts of climate change on soil biodiversity. *Science of the Total Environment*, 869, Article 161671.
- LeFevre, G. H., Müller, C. E., Li, R. J., Luthy, R. G., & Sattely, E. S. (2015). Rapid phytotransformation of benzotriazole generates synthetic tryptophan and auxin analogs in *Arabidopsis*. *Environmental Science &*

- Technology*, 49(18), 10959–10968.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02714>
- LeFevre, G. H., Lipsky, A., Hyland, K. C., Blaine, A. C., Higgins, C. P., & Luthy, R. G. (2017). Benzotriazole (BT) and BT plant metabolites in crops irrigated with recycled water. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(2), 213–223.
<https://doi.org/10.1039/C6EW00251G>
- Li, T., Wang, S., Li, T., Gao, Q., Li, G., Li, T., Ma, X., Wang, S., Liu, S., Zhang, X., et al. (2024). Trade offs of organic amendment input on soil quality and crop productivity in saline alkali land globally: A meta analysis. *European Journal of Agronomy*.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127471>
- Li, Y., Chuang, Y. H., Sallach, J. B., Zhang, W., Boyd, S. A., & Li, H. (2018). Potential metabolism of pharmaceuticals in radish: Comparison of in vivo and in vitro exposure. *Environmental Pollution*, 242, 962–969.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.017>
- Li, Y., Liu, H., Wang, J., et al. (2024). Impacts of reclaimed water irrigation on the accumulation of pharmaceutical and personal care products in soil and cereals. *Irrigation Science*, 42, 419–430.
<https://doi.org/10.1007/s00271-023-00868-5>
- Liu, M., Yang, L., & Min, Q. (2019). Water-saving irrigation subsidy could increase regional water consumption. *Journal of Cleaner Production*, 213, 283–288.
- Lori, M., Symnaczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLoS ONE*, 12(7), e0180442.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180442>
- Malakar, A., Snow, D. D., & Ray, C. (2019). Irrigation water quality—A contemporary perspective. *Water*, 11, 1482.
<https://doi.org/10.3390/w11071482>
- Manaia, C. M., Rocha, J., Scaccia, N., Marano, R., Radu, E., Biancullo, F., & Nunes, O. C. (2018). Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: Tackling the black box. *Environment International*, 115, 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.044>

- Menacherry, S. P. M., Kodešová, R., Švecová, H., Klement, A., Miroslav, Fér, M., Nikodem, A., & Grabic, R. (2023). Selective accumulation of pharmaceutical residues from 6 different soils by plants: A comparative study on onion, radish, and spinach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 54160–54176. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26102-5>
- Menahem, A., Dror, I., & Berkowitz, B. (2016). Transport of gadolinium- and arsenic-based pharmaceuticals in saturated soil under various redox conditions. *Chemosphere*, 144, 713–720.
- Miettinen, T., Mäntyselkä, P., Hagelberg, N., Mustola, S., Kalso, E., & Lötsch, J. (2021). Machine learning suggests sleep as a core factor in chronic pain. *Pain*, 162(1), 109–123.
- Mondaca, P., Celis-Diez, J. L., Díaz-Siefer, P., Olmos-Moya, N., Montero-Silva, F., Molina, S., Fontúrbel, F. E., Aponte, H., Mandakovic, D., Bastidas, B., et al. (2024). Effects of sustainable agricultural practices on soil microbial diversity, composition, and functions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 370, 109053.
- Mordechay, E. B., Mordehay, V., Tarchitzky, J., & Chefetz, B. (2021). Pharmaceuticals in edible crops irrigated with reclaimed wastewater: Evidence from a large survey in Israel. *Journal of Hazardous Materials*, 416, Article 126184.
- Mukhametov, A., Kondrashev, S., Zvyagin, G., & Spitsov, D. (2022). Treated livestock wastewater influence on soil quality and possibilities of crop irrigation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2766–2771. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.057>
- Muralikrishna, I. V., & Manickam, V. (2017). *Environmental management*. Butterworth-Heinemann.
- Naylor, D. T., Sadler, N. C., Bhattacharjee, A., Graham, E. B., Anderton, C. R., McClure, R. S., Lipton, M. S., Hofmockel, K. S., & Jansson, J. K. (2020). Soil microbiomes under climate change and implications for carbon cycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 45. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-082720>
- Nuruzzaman, M., Bahar, M. M., & Naidu, R. (2025). Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation. *Science of the Total*

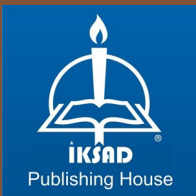
- Environment*, 962, 178398.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398>
- Nwankwo, C., Okeke, E., Umeoguaju, F., Ejeromedoghene, O., Adedipe, D., & Ezeorba, T. (2025). Addressing emerging contaminants in agriculture affecting plant–soil interaction: A review on bio-based and nano-enhanced strategies for soil health and global food security (GFS). *Discover Toxicology*, 2. <https://doi.org/10.1007/s44339-025-00018-w>
- Özden, E., Tohumcu, F., & Sarı, S. (2025). Field-based assessment of soil salinity and alkalinity stress on growth and biochemical responses in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Agronomy*, 15, 1945. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081945>
- Paltiel, O., Fedorova, G., Tadmor, G., Kleinstern, G., Maor, Y., & Chefetz, B. (2016). Human exposure to wastewater-derived pharmaceuticals in fresh produce: A randomized controlled trial focusing on carbamazepine. *Environmental Science & Technology*, 50(8), 4476–4482. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06256>
- Pan, M., & Chu, L. M. (2017). Fate of antibiotics in soil and their uptake by edible crops. *Science of the Total Environment*, 599–600, 500–512.
- Pérez-Lucas, G., & Navarro, S. (2024). How pharmaceutical residues occur, behave, and affect the soil environment. *Journal of Xenobiotics*, 14, 1343–1377. <https://doi.org/10.3390/jox14040076>
- Pina, B., Bayona, J. M., Christou, A., Fatta-Kassinos, D., Guillon, E., Lambropoulou, D., & Sayen, S. (2020). On the contribution of reclaimed wastewater irrigation to the potential exposure of humans to antibiotics, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes—NEREUS COST Action ES1403 position paper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 102131. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102131>
- Pino-Otín, M. R., Muñiz, S., Val, J., & Navarro, E. (2017). Effects of 18 pharmaceuticals on the physiological diversity of edaphic microorganisms. *Science of the Total Environment*, 595, 441–450.
- Rabow, S., Soares, M., & Rousk, J. (2022). Can heavy-metal pollution induce soil bacterial community resistance to antibiotics in boreal forests? *Journal of Applied Ecology*, 60, 237–250.

- Ramprasad, C., & Philip, L. (2018). Greywater treatment using horizontal, vertical and hybrid flow constructed wetlands. *Current Science*, 114(1), 155–165. <https://doi.org/10.18520/cs/v114/i01/155-165>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2018). *Soil pollution: A hidden reality*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN/>
- Sallach, J. B., Zhang, Y., Hodges, L., Snow, D., Li, X., & Bartelt-Hunt, S. (2015). Concomitant uptake of antimicrobials and Salmonella in soil and into lettuce following wastewater irrigation. *Environmental Pollution*, 197, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.022>
- Shu, Y., Li, D., Xie, T. a., Zhao, K., Zhou, L., & F. Li, F. (2025). Antibiotics-heavy metals combined pollution in agricultural soils: Sources, fate, risks, and countermeasures. *Green Energy & Environment*, 10(5), 869–897.
- Silva, M. J., Zainol, I., Tanoeiro, J. R., Sitowski, A., Major, I., Murphy, E. J., & Fehrenbach, G. W. (2025). Livestock slurry and sustainable pasture management: Microbial roles, environmental impacts, and regulatory perspectives in Ireland and Europe. *Microorganisms*, 13, 788. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040788>
- Singh, B., & Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and groundwater: An increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*, 3, 518. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- Sleight, H., Boxall, A. B. A., & Toet, S. (2023). Uptake of pharmaceuticals by crops: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(10), 2091–2104.
- Subirats, J., Sharpe, H., Tai, V., Fruci, M., & Topp, E. (2023, October 31). Metagenome meta-analysis reveals an increase in the abundance of some multidrug efflux pumps and mobile genetic elements in chemically polluted environments. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(10), Article e01047-23.
- Sui, Q., Huang, J., Deng, S., Chen, W., & Yu, G. (2011). Seasonal variation in the occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products in different biological wastewater treatment processes. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3341–3348. <https://doi.org/10.1021/es1035339>

- Sun, R., Yang, J., Xia, P., Wu, S., Lin, T., & Yi, Y. (2020). Contamination features and ecological risks of heavy metals in the farmland along shoreline of Caohai plateau wetland, China. *Chemosphere*, 254, 126828.
- Symochko, L., Demyanyuk, O., Symochko, V., Grulova, D., Fejer, J., & Mariychuk, R. (2023). The spreading of antibiotic-resistant bacteria in terrestrial ecosystems and the formation of soil resistome. *Land*, 12, Article 769. <https://doi.org/10.3390/land12040769>
- Szadziul, M., Goryluk-Salmonowicz, A., & Popowska, M. (2025). The link between antibiotic resistance level and soil physico-chemical properties. *Frontiers in Microbiology*, 16, Article 1584660. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1584660>
- Tasho, R. P., & Cho, J. Y. (2016). Veterinary antibiotics in animal waste, its distribution in soil and uptake by plants: A review. *Science of the Total Environment*, 563, 366–376.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671.
- Tongesayi, T., & Tongesayi, S. (2015). Food, energy, and water. In S. Ahuja (Ed.), *Food, Energy, and Water* (pp. 349–381). Elsevier.
- Turner, D. A., Edis, R. E., Chen, D., Freney, J. R., & Denmead, O. T. (2012). Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to cereals in two cropping areas of southern Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93, 113–126.
- URL-1 : [https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/17/about-15-world-cropland-polluted-toxic-metals-say-researchers?](https://www.theguardian.com/environment/2025/apr/17/about-15-world-cropland-polluted-toxic-metals-say-researchers) (erişim tarihi: 11 Ağustos 2025)
- URL-2:[https://www.theguardian.com/environment/2025/feb/22/uk-soil-breakthrough-could-cut-farm-fertiliser-use-and-advance-sustainable-agriculture?](https://www.theguardian.com/environment/2025/feb/22/uk-soil-breakthrough-could-cut-farm-fertiliser-use-and-advance-sustainable-agriculture) (erişim tarihi: 03.05.2024)
- URL-3:[https://www.umweltbundesamt.de/en/environmental-effects-of-pharmaceutical-substances?](https://www.umweltbundesamt.de/en/environmental-effects-of-pharmaceutical-substances) (erişim tarihi: 10.07.2025)
- Vanderford, B. J., & Snyder, S. A. (2006). Analysis of pharmaceuticals in water by isotope dilution liquid chromatography/tandem mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 40(23), 7312–7320. <https://doi.org/10.1021/es0613198>

- Venati, G., Ch, S., Reddy, K. S., KL, S., & Rai, A. (2020). Soil health and climate change (pp. 751–767). In *[Climate Change and Soil Interactions]*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00026-6>
- Verma, J. P., Jaiswal, D. K., & Sagar, R. (2014). Pesticide relevance and their microbial degradation: A state-of-art review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 13, 429–466.
- Vitousek, P. M., Naylor, R., Crews, T., David, M. B., Drinkwater, L. E., Holland, E., Johnes, P. J., Katzenberger, J., Martinelli, L. A., Matson, P. A., Nziguheba, G., Ojima, D., Palm, C. A., Robertson, G. P., Sanchez, P. A., Townsend, A. R., & Zhang, F. S. (2009). Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324, 1519–1520.
- Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., & Li, H. (2024). Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*, 12, 63. <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>
- Withers, P. J. A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D. L., Healey, J. R., & Talboys, P. J. (2014). Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science & Technology*, 48, 6523–6530.
- Wu, Q., Wei, Z., Long, X., & Jiang, C. (2018). Advances in remediation of acid agricultural soils contaminated by heavy metals: A review. *Environmental Pollution*, 234, 915–928. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.087>
- Xie, F., Shen, Q., & Liu, J. (2022). Effects of organic amendments on soil properties and crop yield in saline soils: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 328, 107874.
- Yoo, B. C., Kim, K. H., Woo, S. M., & Myung, J. K. (2018). Clinical multi-omics strategies for the effective cancer management. *Journal of Proteomics*, 188, 97–106.
- Yuan, L., Yin, C., & Chen, Q. (2023). The role of biochar in remediation of heavy metal-contaminated soils: Mechanisms and applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 34567–34582.
- Zhang, H., Jiang, C., Guo, S., & Zhou, X. (2021). Soil quality assessment and remediation strategies for heavy metal-contaminated farmland. *Science of the Total Environment*, 785, 147307.

- Zhao, F., Yang, L., Chen, L., Xiang, Q., Li, S., Sun, L., Yu, X., Fang, L. (2019). Soil contamination with antibiotics in a typical peri-urban area in eastern China: Seasonal variation, risk assessment, and microbial responses. *Journal of Environmental Sciences*, 79, 200–212.
- Zhao, Q., Wang, Y., & Wang, X. (2024). Impact of pesticide application on soil microbial communities and functions: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130688.
- Zi, W., Song, J., Kong, W., Huang, J., Guo, C., He, W., Yu, Y., Zhang, B., Geng, W., Tan, X., & Tian, Y. (2023). Tirofiban for stroke without large or medium-sized vessel occlusion. *New England Journal of Medicine*, 388(22), 2025–2036. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2214299>



ISBN: 978-625-378-309-9