

TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENCE



İKSAD
Publishing House

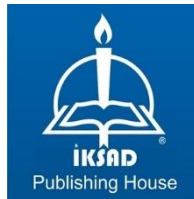
TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER
Doç. Dr. Halil ERDEM
Prof. Dr. Arda YILDIRIM
Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Yazarlar

Prof. Dr. Arda YILDIRIM
Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER
Prof. Dr. Yakup BUDAK
Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER
Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL
Doç. Dr. Halil ERDEM
Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR
Dr. Cabir Çağrı GENÇE
Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI
Dr. Saliha DİRİM BUHAN



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: 978-625-378-481-2

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
-------------	---

BÖLÜM 1

MİKROPLASTİKLERİN DENİZ EKOSİSTEMLERİ VE ORGANİZMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN

Prof. Dr. Arda YILDIRIM.....	1
------------------------------	---

BÖLÜM 2

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KAYNAKLARI

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER	62
---------------------------------	----

BÖLÜM 3

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: ETKİLERİ VE DOĞA TEMELLİ AZALTIM STRATEJİLERİ

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER	90
---------------------------------	----

BÖLÜM 4

ATIKSULARDAKİ MİKROPLASTİKLERİN TARIM VE HAYVANCILIK EKOSİSTEMLERİ İLE ETKİLEŞİMİ VE YÖNETİMİ

Dr. Saliha DİRİM BUHAN

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN

Prof. Dr. Arda YILDIRIM.....	117
------------------------------	-----

BÖLÜM 5

PLASTİKLEŞEN TOPRAKLAR: MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN TOPRAĞIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Doç. Dr. Halil ERDEM.....	172
---------------------------	-----

BÖLÜM 6

GÜNÜMÜZ VE GELECEKTE TOPRAKLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE MİKROPLASTİKLERİN ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR.....	196
----------------------------------	-----

BÖLÜM 7

TOPRAKTA MİKROPLASTİKLERİ TANIMLAMA KRİTERLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR.....	214
----------------------------------	-----

BÖLÜM 8

MİKROPLASTİKLERİN AĞIR METALLERLE ETKİLEŞİMİ: TOPRAK, BİTKİ VE İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ÇEVRESEL BİR TEHDİT

Doç. Dr. Halil ERDEM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE	244
-----------------------------	-----

BÖLÜM 9

TARIM VE ÇEVRE ARASINDA GÖRÜNMEZ TEHDİTLER: MİKROPLASTİKLER İLE PESTİSİTLER

Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER.....	271
------------------------------	-----

BÖLÜM 10

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 283

BÖLÜM 11

HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 321

BÖLÜM 12

SORU ve CEVAPLARLA ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİKLER (GÜNCEL BİLGİLER, RİSKLER VE GELECEK PERSPEKTİFİ)

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Ercan MEVLİAOĞULLARI 359

BÖLÜM 13

ÇEVRESEL KOMPONENTLER, BİTKİSEL VE HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Prof. Dr. Yakup BUDAK

Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ

Dr. Öğr. Üyesi. Elif AKTÜRK BOZDEMİR..... 384

BÖLÜM 14

PLASTİK VE MİKROPLASTİK EKONOMİSİ: TARIM, ÇEVRE VE TÜRKİYE PAZARI

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL 421

ÖNSÖZ

Plastik üretiminin küresel ölçekte hızla artması, dayanıklılık ve maliyet etkinliği gibi avantajlarıyla modern yaşamın pek çok alanında vazgeçilmez çözümler sunarken, çevresel sistemlerde uzun vadeli ve karmaşık riskleri de beraberinde getirmiştir. Bu risklerin başında gelen mikroplastikler, günümüzde denizel ve karasal ekosistemlerden tarımsal üretim alanlarına, hayvansal ürünlerden insan sağlığına uzanan çok boyutlu etkileriyle çevre bilimlerinin en kritik araştırma konularından biri hâline gelmiştir. Son on yılda yayımlanan çalışmalar, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel bir kirletici değil; aynı zamanda kimyasal taşıyıcı, biyolojik etkileşim modülatörü ve ekotoksikolojik bir stres faktörü olarak ele alınması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Elinizdeki bu kitap, mikroplastik kirliliğini disiplinlerarası bir bakış açısıyla ele almayı amaçlayan kapsamlı bir bilimsel derleme niteliğindedir. Kitapta yer alan bölümler, deniz ekosistemleri ve su ürünleri yetiştiriciliğinden başlayarak, atıksu sistemleri, tarım ve hayvancılık ekosistemleri, toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri, ağır metal ve pestisit etkileşimleri, hayvansal ürünler ve nihayet plastik–mikroplastik ekonomisi perspektifine kadar uzanan bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Bu yapı, mikroplastiklerin çevresel döngü içerisindeki kaynak – taşınım – etki – yönetim ekseninde sistematik olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Kitabın ayırt edici yönlerinden biri, mikroplastiklerin yalnızca çevresel dağılımını betimlemekle yetinmeyip, tanımlama kriterleri, analitik yöntemler ve doğa temelli azaltım stratejileri gibi metodolojik ve uygulamaya dönük boyutları da ayrıntılı biçimde ele almasıdır. Özellikle toprak – bitki – hayvan – insan sürekliliği bağlamında mikroplastiklerin ağır metaller ve diğer organik kirleticilerle etkileşiminin irdelenmesi, güncel literatürde vurgulanan bilgi boşluklarına doğrudan yanıt niteliği taşımaktadır. Ayrıca, hayvansal ürünlerde mikroplastik varlığı ve analiz yöntemlerine ayrılan bölümler, gıda güvenliği ve halk sağlığı açısından giderek artan bilimsel ve toplumsal kaygılara güçlü bir akademik zemin sunmaktadır.

Bu kitabın hazırlanmasındaki temel amaç, mikroplastik kirliliğini yalnızca bir çevre sorunu olarak değil; tarımsal sürdürülebilirlik, ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ve insan sağlığı açısından stratejik bir araştırma alanı

olarak ele almak ve Türkçe bilimsel literatüre nitelikli, güncel ve referans değeri yüksek bir kaynak kazandırmaktır. Bölüm yazarlarının her biri, kendi uzmanlık alanlarında güncel uluslararası çalışmaları sentezleyerek hem araştırmacılara hem de politika yapıcılar ve uygulayıcılara yol gösterici bir içerik sunmayı hedeflemiştir.

Bu vesileyle, kitabın ortaya çıkmasında emeği geçen tüm bölüm yazarlarına, bilimsel titizlikleri ve özverili katkıları için teşekkür eder; çalışmanın çevre bilimleri, tarım, su ürünleri, hayvancılık ve gıda güvenliği alanlarında çalışan araştırmacılar için kalıcı bir başvuru kaynağı olmasını temenni ederim. Mikroplastiklerle şekillenen görünmez risklerin daha iyi anlaşılmasına ve etkin yönetim stratejilerinin geliştirilmesine mütevazı da olsa bir katkı sağlaması dileğiyle...

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER¹

Doç. Dr. Halil ERDEM²

Prof. Dr. Arda YILDIRIM³

Dr. Cabir Çağrı GENÇE⁴

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Tokat, Türkiye. E-posta: niyat.yesilayer@gop.edu.tr

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Tokat, Türkiye. E-posta: erdemh@hotmail.com

³ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Tokat, Türkiye. E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

⁴ Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Aksaray, Türkiye. E-posta: cabircagrigence@aksaray.edu.tr

*Bu kitap bölümü; ilerleyen yaşına rağmen halen
Balıkçılık Bilimine katkılar sunmaya devam
eden, yarım asır boyunca "Türkiye
Denizlerinin Korunması ve Sürdürülebilir
Balıkçılık" konularında öncül çalışmalara ve
düzenlemelere önemli katkılar sunan Mülga
Bodrum Su Ürünleri Araştırma Enstitüsü
Müdürü Biyolog Sn. Nezih Bilecik'e
atfedilmiştir.*



BÖLÜM 1

MİKROPLASTİKLERİN DENİZ EKOSİSTEMLERİ VE ORGANİZMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN¹

Prof. Dr. Arda YILDIRIM²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18047708>

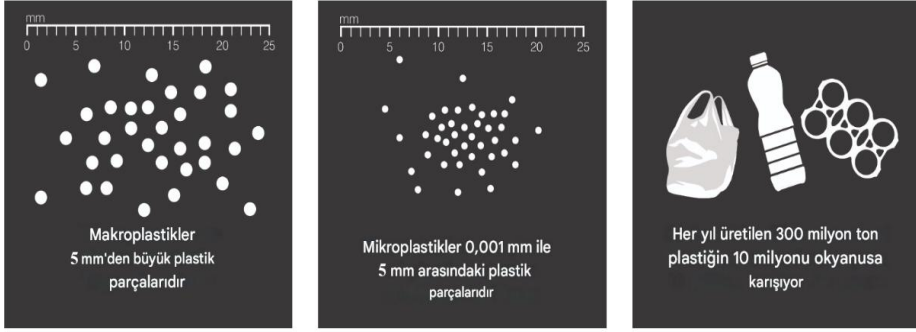
¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Hayvan Yetiştirme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-4338-1758, E-posta: ekrem.buhan@gop.edu.tr

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID:0000-0002-5876-4228, E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

GİRİŞ

Antropojenik bozulmalar, bireysel bileşenler (üreme, büyüme ve hayatta kalma) üzerindeki dolaylı etkileri aracılığıyla; ekolojik hiyerarşiye, topluluk yapısına ve ekosistem özelliklerine etki etmektedir (Arnold, 1983). Okyanuslardaki mikroplastik kirliliği, son zamanlardaki en ciddi çevre sorunlarından biri olup, mikroplastik yutulması, üreticiler ve ikincil tüketicilerden en üst düzey tüketicilere kadar çok çeşitli organizmalarda rapor edilmiştir (Nelms ve ark., 2018). Deniz akıntıları, rüzgarlar ve gelgitler, mikroplastiklerin kıyısız bölgelerden açık okyanuslara ve hatta kutup bölgelerine kadar taşınmasında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, mikroplastik kirliliği artık gezegenin en el değmemiş ekosistemlerinde dahi tespit edilebilmektedir (Tan ve ark., 2020). Deniz ekosistemlerine giren mikroplastik (MP)'ler, su kolonunda, bentik sedimentlerde ve canlı organizmaların dokularında birikmekte, böylece ekosistem bütünlüğünü bozmaktadır (Coyle ve ark., 2020). Çevredeki mikroplastikler çeşitli kaynaklardan gelmekte ve birçok gizli tehlike barındırmaktadır. Bu nedenle, bunların toksik etkilerini ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerini anlamak büyük bir zorluklar taşımaktadır. Deniz ve okyanuslar, bu partiküllerin son ulaşım yeri ve deposu konumundadır. Bu partiküllerin varlığı, deniz yaşamı ve insan refahı üzerindeki potansiyel etkileri konusunda artan bir endişeye neden olmaktadır (Woodall ve ark., 2014).

Mikroplastikler (MP'ler), Şekil 1'de gösterildiği üzere 5 mm'den küçük sentetik polimer parçaları olarak tanımlanmakta ve küresel ölçekte deniz ekosistemleri için giderek büyüyen bir tehdit oluşturmaktadır (Kochanek ve ark., 2025). Birincil (doğrudan mikro boyutta üretilen) veya ikincil (daha büyük plastik atıkların parçalanmasıyla oluşan) kaynaklardan gelen bu partiküller, kentsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerden deniz çevresine ulaşmaktadır (GESAMP, 2016; Yu ve Singh, 2023). Küçük boyutları ve yüksek yüzey alan/hacim oranları, mikroplastiklerin çevredeki tehlikeli kimyasalları adsorplamasına ve bu kirleticiler için bir taşıyıcı vektör görevi görmesine olanak tanımaktadır (Cao ve ark., 2021).



Şekil 1. Mikroplastik Büyüklüğünün Ölçülendirilmesi (NOC-National Oceanography Centre, 2025).

Çok çeşitli deniz organizmaları, zooplanktondan üst yırtıcılara kadar, mikroplastikleri yutmaktadır (Nelms ve ark., 2018; Meaza ve ark., 2021). Bu yutma, fiziksel tıkanıklık, sindirim hasarı ve besin alımında azalma gibi fiziksel zararlara yol açabilir (Wang ve ark., 2019). Ayrıca, mikroplastiklerin taşıdığı kirleticiler; organizmalarda oksidatif stres, enflamasyon ve endokrin bozulma gibi toksikolojik etkileri tetikleyebilir (Barboza ve ark., 2020). Besin zincirindeki trofik transfer, toksik maddelerin biyobirikimine ve biyomagnifikasyonuna neden olarak ekosistem sağlığı ve insan tüketimi için risk oluşturmaktadır (Setälä ve ark., 2014).

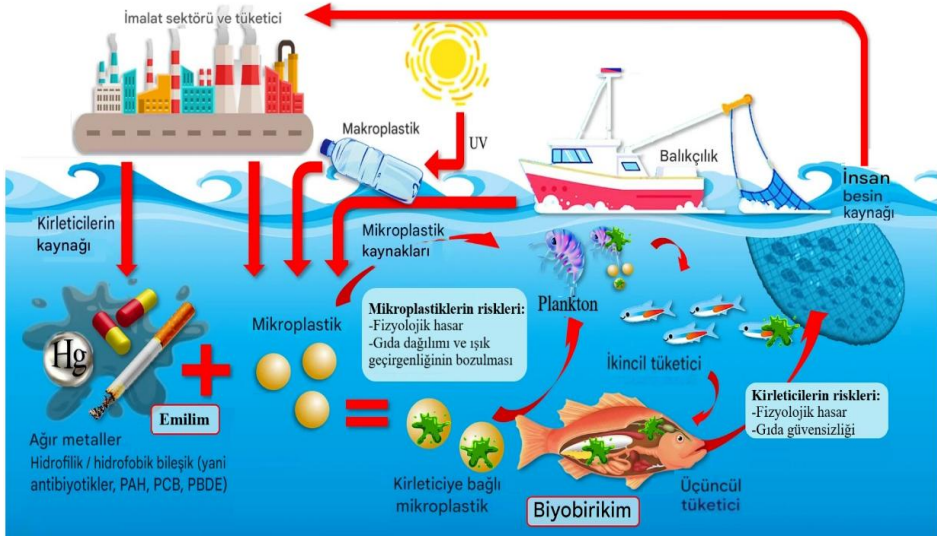
Mikroplastik kirliliği, biyolojik çeşitlilik, ekosistem direnci ve ekonomik faaliyetler üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri nedeniyle bilim camiası, politika yapımcılar ve toplumda giderek artan bir endişe kaynağıdır (Duis ve Coors, 2016; UNEP, 2022). Özellikle kıyısız alanlar gibi yüksek ekonomik ve ekolojik değere sahip bölgeler, uygun olmayan atık yönetimi nedeniyle plastik birikiminden ciddi şekilde etkilenmekte ve bu durum biyolojik çeşitlilik ve gelir kayıplarına yol açmaktadır (Andrady, 2015). Sorunun ölçeği, Avrupa Komisyonu'nun Sıfır Kirlilik Eylem Planı'nda 2030 yılına kadar denizdeki mikroplastik çöplerde %50 azalma hedefi koyması gibi küresel politik tepkileri zorunlu kılmaktadır (EC, 2021).

Bu derleme, mikroplastiklerin denizel ekosistemlerin yapısı ve işleyişi üzerindeki etkilerini, bu etkilerin bireyden ekosisteme uzanan ekolojik hiyerarşi içindeki yayılımını ve farklı taksonomik/fonksiyonel gruplara (planktonlar, omurgasızlar, balıklar, memeliler, kuşlar, sürüngenler) özgü tezahürlerini sistematik bir şekilde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma, mevcut bilimsel literatürü sentezleyerek bu küresel soruna ilişkin kapsamlı bir

bilgi sunmayı ve etkili politika ile yönetim kararlarının alınmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

1. MİKROPLASTİKLERİN DENİZEL EKOSİSTEMLERE ETKİLERİ

Antroposen çağının sembolik kirleticilerinden biri haline gelen plastikler, dayanıklılıkları ve yaygın kullanımları nedeniyle küresel bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Beş milimetreden küçük boyuttaki plastik parçalar olarak tanımlanan mikroplastikler (MP'ler), birincil (doğrudan bu boyutta üretilmiş, örn. kozmetiklerdeki mikrobuncuklar) veya ikincil (daha büyük plastik atıkların parçalanması sonucu oluşmuş) kaynaklardan deniz ortamına ulaşmaktadır (Cole ve ark., 2011). Denizel ortamlarda, yüzey sularından derin deniz çukurlarına, kutuplardan ekvatora kadar her habitatta tespit edilmişlerdir (Barrett ve ark., 2020). Mikroplastiklerin denizel yaşam üzerindeki potansiyel etkileri, son yirmi yılda hızla büyüyen bir araştırma alanını oluşturmuştur. Bu etkiler, partiküllerin fiziksel varlığından (örn. sindirim sisteminde tıkanıklık) ve/veya polimer matrisinden sızan veya su ortamından yüzeylerinde yoğunlaştırdıkları (adsorbe ettikleri) kimyasal kirleticilerden kaynaklanabilmektedir (Rochman, 2013). Denizel organizmalar, bu partikülleri yanlışlıkla besin sanarak yutmakta, solungaçlarıyla filtrelemekte veya dokularına difüzyon yoluyla almaktadır (Şekil 2). Mikroplastik kirliliği, sadece bireysel organizmalar için değil, denizel ekosistemlerin bütünsel yapısı, işleyişi ve sağladığı hizmetler için de ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Berlino ve ark., 2023). Etkiler, birey düzeyinde başlayan ve ekosistem düzeyine kadar uzanan bir kaskad etkisi şeklinde ortaya çıkmaktadır (Amalia ve ark.,2021).



Şekil 2. Mikroplastik denize taşınım yolları, deniz ekosistemi ve organizmaları üzerindeki genel etkisi (Amalia ve ark.,2021).

1.1. Ekolojik Hiyerarşi Üzerindeki Etkileri

Mikroplastik etkileri, ekolojik organizasyonun farklı seviyelerinde kendini gösterir ve her seviyedeki değişim bir sonraki seviyeyi etkileyerek toplam etkiyi büyütür (Amalia ve ark.,2021).

1.1.1. Birey Düzeyindeki Etkiler

Mikroplastiklerin birincil etkileri, bireysel organizmaların "uygunluk" (fitness) bileşenleri üzerinde gözlemlenir. Bu etkiler fizyolojik, davranışsal ve gelişimsel olarak kategorize edilebilir. Bentik omurgasızlar üzerine yapılan meta-analizler, MP maruziyetinin metabolizma hızı, büyüme oranı ve üreme çıktıları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı azalmalara yol açtığını göstermektedir (Berlino ve ark., 2021). Örneğin, midyelerde enerji dengesinin bozulması ve kabuklularda molting (kabuk değiştirme) bozuklukları rapor edilmiştir (Tablo 1). Balıklarda ise, etkiler daha belirgin olarak davranışsal alanda ortaya çıkmakta; gıda arama, sosyal etkileşim, yırtıcıdan kaçınma ve genel aktivite seviyelerinde bozulmalar gözlemlenmektedir (Salerno ve ark., 2021). Arnold, (1983) bu tür değişiklikleri, bireyin hayatta kalma ve üreme başarısını doğrudan düşürerek popülasyon dinamiğini etkileyecek zincirleme reaksiyonları başlatabileceğini bildirmektedir (Amalia ve ark.,2021).

1.1.2. Popülasyon Düzeyindeki Etkiler

Bireysel uygunluktaki azalma, popülasyon parametrelerine yansır. Deneyssel ve modelleme çalışmaları, kronik MP maruziyetinin popülasyon büyüklüğünde azalmaya, yaş ve boy dağılımında değişimlere ve nihayetinde popülasyonun büyüme oranında düşüşe yol açabileceğini öngörmektedir (Berlino ve ark., 2023). Özellikle larval ve genç bireylerin daha hassas olması popülasyonun yenilenme kapasitesini ciddi şekilde zayıflatabilir (tablo 1). Bu durum, ticari öneme sahip balık ve kabuklu popülasyonlarında sürdürülebilir avcılık sınırlarını tehdit edebilir (Amalia ve ark.,2021).

1.1.3. Topluluk (Komünite) Düzeyindeki Etkiler

Farklı türlerin ve trofik seviyelerin MP'lere verdiği tepkilerdeki farklılıklar, topluluk yapısında ve kompozisyonunda değişimlere neden olabilir (Berlino ve ark., 2023). Örneğin, yüksek trofik seviyedeki bir avcı balık türü, MP'lerden veya onlarla taşınan kirleticilerden daha fazla etkilenirse, bu durum onun avı olan türler üzerindeki predasyon baskısını azaltabilir ve dolaylı olarak bu alt seviyedeki türlerin popülasyonlarında artışa yol açabilir. (Tablo 1). Tersine, filtreyle beslenen bir türün beslenme verimliliği MP'ler tarafından ciddi şekilde düşürülürse, bu organizmanın besin ağındaki rolü (örn., suyun berraklaştırılması) bozulacak ve ona bağımlı diğer türler olumsuz etkilenecektir. (Berlino ve ark., 2023). Bu tür değişimler, besin ağı topolojisini ve enerji akış yollarını değiştirerek topluluk stabilitesini azaltır (Amalia ve ark.,2021).

1.1.4. Ekosistem Düzeyindeki Etkiler

Topluluk yapısındaki ve trofik etkileşimlerdeki değişimler, ekosistemin temel işlevlerini ve sağladığı "ekosistem hizmetlerini" etkiler (Sibly ve ark., 2012). Birincil üretkenlik (fitoplankton ve deniz çayırları), besin maddesi (nutrient) döngüsü, karbon tutumu ve sediment stabilizasyonu gibi süreçler bozulabilir (Hein ve ark., 2020). Örneğin, fitoplankton üretkenliğindeki bir azalma, tüm besin ağına daha az enerji girmesi anlamına gelir. Mercan resifleri veya deniz çayırı yatakları gibi habitat mühendisliği yapan yapıların bozulması (Tablo 1), bu ekosistemlerin sağladığı balıkçılık, kıyı koruma, turizm ve biyoçeşitlilik barındırma gibi hizmetlerin kaybına yol açar (EC, 2021). Bu hizmetlerin ekonomik değeri göz önüne alındığında, MP

kirliliğinin sosyo-ekonomik maliyetleri de son derece yüksektir (Amalia ve ark.,2021).

Tablo 1. Mikroplastiklerin ekolojik hiyerarşi ve faktörleri üzerindeki etkileri

Etki düzeyi / Faktörleri	Ana mekanizma ve bulgular	Potansiyel uzun vadeli sonuçlar	Kaynakça
Birey Düzeyi	Fizyolojik stres (metabolizma↓, büyüme↓), davranış bozukluğu (beslenme, kaçınma), üreme çıktılarında azalma (verimlilik↓, gamet kalitesi↓).	Bireysel uygunluk (fitness) ve hayatta kalma olasılığında düşüş.	Arnold (1983); Berlino ve ark. (2021); Salerno ve ark. (2021)
Popülasyon Düzeyi	Azalan bireysel uygunluk, artan genç ölüm oranı.	Popülasyon büyüklüğü ve büyüme hızında azalma, yaş yapısında bozulma, yerel yok oluş riski.	Berlino ve ark. (2023)
Topluluk/ Kominite Düzeyi	Türlere ve trofik seviyelere özgü farklı hassasiyet; bazı türlerin kompozisyonundan kaybolması veya baskın hale gelmesi.	Besin ağı yapısının basitleşmesi, trofik kaskatlar, biyolojik çeşitlilik kaybı, topluluk direncinin azalması.	Berlino ve ark. (2023); Sibly ve ark. (2012)
Ekosistem Düzeyi	Bozulan topluluk yapısı ve trofik işlevler.	Birincil üretim, besin döngüsü, karbon tutulumu gibi temel ekosistem işlevlerinde aksama; balıkçılık, kıyı koruma, iklim düzenleme gibi ekosistem hizmetlerinde kayıp.	Hein ve ark. (2020); EC (2021)
Trofik Seviye Faktörü	Yüksek trofik seviyelerde etki büyüklüğünün artması.	Kirleticilerin besin zincirinde magnifikasyonu; üst trofik seviyelerdeki türlerin (yırtıcı balıklar, memeliler) daha yüksek risk altında olması.	Bucci ve ark. (2020); Berlino ve ark. (2023)
Yaşam Evresi Faktörü	Larva ve juvenil bireylerde erginlere göre daha yüksek hassasiyet.	Popülasyon yenilenme (recruitment) kapasitesinde düşüş, nesil devamlılığının tehlikeye girmesi.	Berlino ve ark. (2023)
Beslenme Stratejisi	Filtreleyiciler, sediment ile beslenenler ve detritivorlar yüksek maruziyet riski altında.	Bu fonksiyonel grupların ekosistemdeki rollerinin (su filtrasyonu, sediment karıştırma) bozulması.	Sfriso ve ark. (2020); Wright ve ark. (2013)

1.2 Mikroplastiklerin Denizel Ekosistemlerdeki Dağılımı ve Organizmalarla Karşılaşma Yolları

Okyanuslarda dağılım: Mikroplastikler, denizel ortamın yüzey sularından derin deniz sedimanlarına, hatta kutup bölgelerine kadar her seviyesinde tespit edilmiş küresel bir dağılıma sahiptir (Ogunola ve Palanisami, 2016). Beş okyanusun yüzey sularındaki mikroplastik konsantrasyonları önemli farklılıklar göstermektedir. Karak ve ark., (2025)'nin bildirdiğine göre mikroplastik konsantrasyonları 0.002 ile 22 parça/m³ arasında değişmekte olup, ortalama bolluk 1.21 parça/m³ ve medyan 0.135 parça/m³'tür (Tablo 2). En yüksek ortalama konsantrasyon Atlantik Okyanusu'nda (2.58 parça/m³), en düşük ortalama konsantrasyon ise Güney Okyanusu'nda (0.04 parça/m³) bulunmuştur. Baskın renkler siyah ve mavi; şekilleri parçalar ve filmler; polimerler ise polistiren (PS) ve polietilen tereftalat (PET) olarak tespit edilmiştir (Amalia ve ark.,2021).

Kıyı ve deniz ortamlarında dağılım: Kıyı bölgeleri ve kapalı denizler, karasal kaynaklara yakınlıkları ve sınırlı su değişimi nedeniyle genellikle daha yüksek mikroplastik konsantrasyonları sergiler (Shim ve ark., 2018). Örneğin, Asya kıyılarındaki plajlarda dünyanın diğer bölgelerine kıyasla en yüksek mikroplastik bolluğu gözlemlenmiştir (Shim ve ark., 2018). Ayrıca, deniz buzu, Kuzey ve Güney Kutup bölgelerinde mikroplastik kirliliği için önemli bir mevsimsel yutak (sink) görevi görmektedir (Mountford ve Maqueda, 2021). Dünya genelindeki farklı su ortamlarında, farklı kıyı ve deniz ekosistemlerinin mikroplastik seviyesi suda yaklaşık 0,001-140 parça/m³ ve sedimentte 0,2-8766 parça/m³ arasında değişmektedir. Kıyı ve deniz canlılarında mikroplastik birikim oranı ise 0.1-15.033 parça / birey arasında değişmektedir (Thushari ve Senevirathna, 2020).

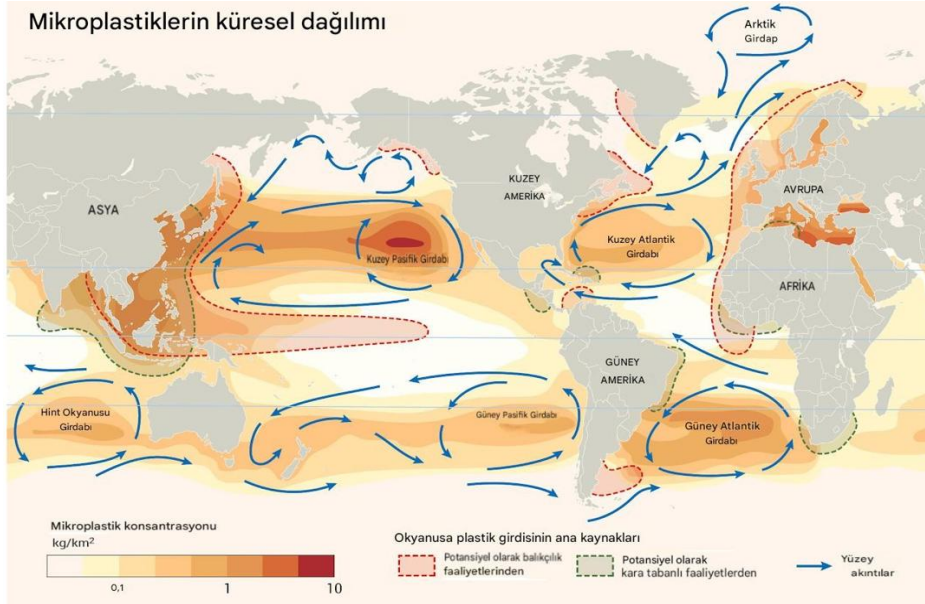
Tablo 2. Dünyanın farklı bölgelerinde MP bolluğu örnekleri (Amalia ve ark.,2021).

Bölge	Konum	MP konsantrasyon aralığı
ASYA	Yangtze Haliç, Çin	500–10.200 adet/ m ³
	Sarı Deniz, Çin	0–0,81 adet/ m ³
	Jiaozhou Körfezi, Çin	20–120 adet/ m ³
	Bohai Denizi, Çin	0,01–1,5 parça/m ³
	Xiangshan Körfezi, Çin	4,6–20,1 adet/ m ³
	Katar deniz suları	0–3 adet/m ³
	Chabahar Körfezi, Umman	0,07–1,14 parça/m ³
	Levant Havzası, Lübnan	0,17–0,62 adet/ m ³
	Mersin Körfezi, Türkiye	0,2–5,1 adet/l
	Endonezya, Surabaya K.Sahili	0,38–0,61 parça/l
	Kuala Nerus Malezya	0,13–0,69 adet/l
	Güney Sri Lanka	500–10.200 adet/ m ³
AMERİKA	San Francisco Körfezi, ABD	15.000–2.000.000 parça/ km ²
	Tampa Körfezi, ABD	1,2–18,1 parça/m ³
AVRUPA	İsveç deniz suları	0–70,3 parça/ m ³
	Toskana kıyı suları, İtalya	0,16–0,27 parça/ m ³
AFRİKA	King Harbour, Jamaika	0–5,73 parça/m ³
	Güney Afrika deniz suları	257–1215 parça/m ³

Nehirler ve tatlı su sistemlerinde dağılımı: Mikroplastikler sadece deniz ortamlarında değil, nehirler, göller ve yeraltı suları dahil olmak üzere her tatlı su sisteminde de bulunmaktadır (Eerkes ve ark., 2019). Örneğin, Güney Kore'nin Nakdong Nehri'nde mikroplastik konsantrasyonu yaz aylarında 260 ile 1410 parça/m³ arasında değişmiş, yağışlı mevsimde 15.560 parça/m³'ye yükselmiştir (Kang ve ark., 2020). Benzer şekilde, (Klein ve ark., (2015)'in bildirdiğine göre Almanya'daki Ren ve Main Nehirleri'nde sırasıyla 228 ila 3763 parça/kg ve 786 ila 1368 parça/kg arasında mikroplastik seviyeleri gözlemlenmiştir (Amalia ve ark.,2021).

Okyanus akıntıları ve girdapların etkisi: Okyanus akıntıları ve girdaplar, mikroplastiklerin birikimi için önemli alanlar oluşturmaktadır (Şekil 3). Örneğin, Kuzey Pasifik Subtropikal Girdabı'nda 32,76 parça/m³'lük

maksimum konsantrasyon kaydedilmiştir (Goldstein ve ark., 2012). Benzer şekilde, endüstriyel kıyı bölgeleri ve liman alanları da mikroplastik sıcak noktaları olarak tanımlanmaktadır (Noren ve Naustvoll, 2010). Büyük Pasifik Çöp Girdabı gibi alanlarda, plastiklerin büyük çoğunluğunun balıkçılık kaynaklı olduğu bildirilmiştir (Lebreton ve ark., 2018).



Şekil 3. Dünya okyanuslarındaki mikroplastiklerin dağılımı. Harita Riccardo Pravettoni ve Philippe Rekacewicz tarafından oluşturulmuştur (<https://www.grida.no/resources/13339>).

MP'ler, yüzey sularından derin deniz çukurlarına ve kutup buzullarına kadar her habitatı kontamine etmiştir. Partiküllerin dağılımı ve organizmalar için biyoyararlanımı, polimer yoğunluğu, partikül boyutu, şekli ve renk gibi faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenir (Auta ve ark., 2017). Düşük yoğunluklu polimerler (örn. polietilen - PE, polipropilen - PP) su kolonunda asılı kalma eğilimindeyken, yüksek yoğunluklular (örn. polivinil klorür - PVC) hızla çökerek bentik bölgeyi kirletir. Bu nedenle, farklı beslenme stratejilerine sahip organizmalar (süspansiyonla beslenenler, yırtıcılar, detritivorlar) farklı MP havuzlarına maruz kalır (Wright ve ark., 2013). Özellikle endişe verici olan, Akdeniz gibi bazı bölgelerde MP konsantrasyonlarının plankton bolluğuyla aynı mertebeye ulaşmasıdır; bu durum, seçici olmayan planktivorların doğal besinleriyle neredeyse eşit sıklıkta MP tüketme riski taşıdığı anlamına gelir (Abreu ve Pedrotti, 2019).

Tablo 3. Mikroplastiklerin Organizmalarla Temas Yolları ve Belirleyici Faktörler

Temas Yolu	Açıklama	Belirleyici faktörler	Kaynak
Yutma	Organizmaların MP'leri besin sanarak veya pasif olarak alması.	Partikül boyutu, şekli, rengi; ortam MP konsantrasyonu; organizmanın beslenme stratejisi (süzücü, yırtıcı, detritivor).	Wright ve ark. (2013)
Solunum	Solungaçlı organizmalarda su akımıyla partiküllerin solungaç yapılarına teması ve potansiyel alımı.	Partikül boyutu (< 10 µm riskli), şekli (liflerin yapışma riski yüksek), solungaç morfolojisi.	Zhang ve ark. (2021)
Dokulara geçiş	Küçük partiküllerin (özellikle nanoplastiklerin) epitel bariyerleri aşarak dolaşım sistemine girmesi ve iç organlarda birikmesi.	Partikül boyutu (nanometre boyutu kritik), yüzey kimyası, maruziyet süresi.	Lu ve ark. (2016)

1.3. Ekolojik Faktörlere Göre Değişen Tepkiler

Mikroplastik etkilerinin şiddeti ve doğası, organizmaların ekolojik özelliklerine bağlı olarak sistematik farklılıklar göstermektedir (Berlino ve ark., 2023). Bu farklılıklar, risk değerlendirmelerinin ve koruma önceliklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Amalia ve ark.,2021).

1.3.1. Trofik Seviye

Bir araştırmanın meta-analiz sonuçları, etki büyüklüğünün trofik seviye ile arttığını göstermektedir (Berlino ve ark., 2023). Yırtıcı balıklar gibi yüksek trofik seviyedeki organizmalar, genellikle daha güçlü olumsuz tepkiler vermiştir. Bu bulgu, iki önemli ekolojik sürece işaret eder (Tablo 1 ve 3);

- **Trofik transfer:** MP'lerin, bir organizma tarafından yutulup, onu yiyen bir sonraki trofik seviyedeki organizmaya aktarılabilmesi (Wootton ve ark., 2021).
- **Trofik magnifikasyon (Biyolojik büyütme):** MP'lerle ilişkili hidrofobik kirleticilerin (örn. PCB'ler, DDT), besin zinciri boyunca dokularda giderek artan konsantrasyonlarda birikebilmesi (Bucci ve ark., 2020). Her iki süreç de, MP kirliliğinin etkilerinin ekosistemde yukarı doğru yoğunlaşarak yayılabileceğini göstermektedir (Amalia ve ark.,2021).

1.3.2. Yaşam Evresi ve Gelişim Aşaması:

Larvalar ve juvenil (genç) bireyler, erginlere kıyasla MP'lere karşı daha hassastır (Berlino ve ark., 2023). Bunun başlıca nedenleri arasında, larval dönemlerin gelişimsel olarak kritik olması, vücut kütlesine oranla daha yüksek besin/alım oranına sahip olmaları ve bağışıklık sistemlerinin tam olarak gelişmemiş olması sayılabilir. (Tablo 1). Larval dönemdeki büyüme geriliği veya ölüm oranlarındaki artış, popülasyonun gelecekteki bolluğu ve yapısı üzerinde kalıcı ve yıkıcı sonuçlar doğurabilir (Amalia ve ark.,2021).

1.3.3. Yaşam Alanı ve Beslenme Stratejisi

Etkiler, organizmaların yaşam alanı (pelajik/bentik) ve beslenme şekli (filtreyle beslenen, avcı, detritivor) ile yakından ilişkilidir. Filtreyle beslenen organizmalar (midye, istiridye), suyu sürekli filtre ettikleri için partikül MP'lere kronik olarak maruz kalırlar. Benzer şekilde, sedimentle beslenen deniz kurtları veya detritusla beslenen deniz hıyarları, sedimentte biriken MP'leri doğrudan tüketir (Sfriso ve ark., 2020). Bu gruplar, MP kirliliğine karşı ön safta yer alan ve besin zincirindeki transferde kilit rol oynayan "**hedef organizmalardır**"(Tablo 1).

2. MİKROPLASTİKLERİN DENİZEL ORGANİZMA GRUPLARINA ETKİLERİ

Mikroplastikler, denizel biyotanın hemen hemen tüm grupları üzerinde, grupların biyolojik ve ekolojik özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik gösteren olumsuz etkilere neden olmaktadır.

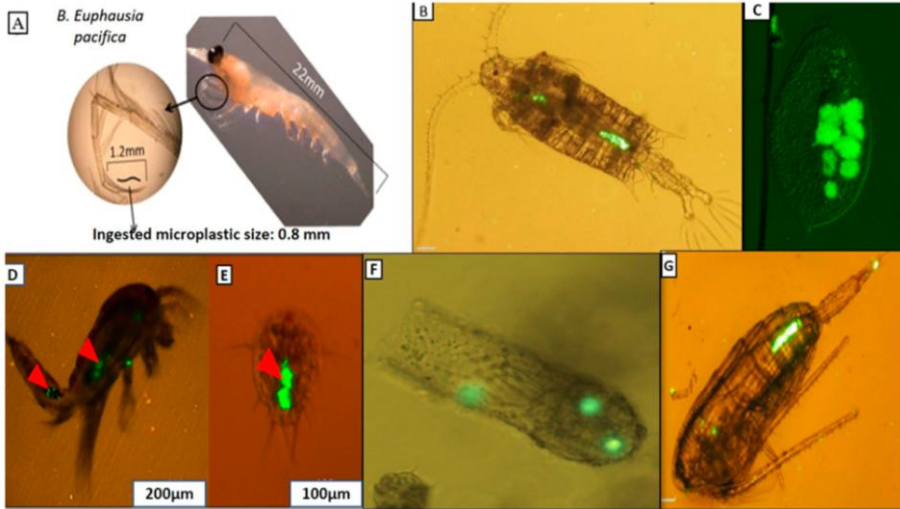
2.1. Planktonlar

Planktonik organizmalar, besin ağlarının temelini oluşturur ve MP'lerle doğrudan etkileşime giren ilk organizmalardan biridir.

Fitoplankton: Fitoplanktonlar, MP'lerin fiziksel varlığından ve saldıkları katkı maddelerinden etkilenir. MP'ler, hücre büyümesini, klorofil-a sentezini ve fotosentetik verimliliği inhibe edebilmekte, böylece denizel birincil üretimi ve biyoçeşitliliği azaltabilmektedir (Dong ve ark., 2022). Etkinin şiddeti, polimer tipi, konsantrasyon ve maruziyet süresine bağlıdır; uzun süreli maruziyetler genellikle daha belirgin negatif sonuçlara yol açar (Guo ve ark., 2020). Ayrıca, MP'lerin yüzeylerinde adsorbe olan kirleticiler

(ağır metaller, organik bileşikler), fitoplanktonlar üzerinde sinerjistik (birleşik etki, tek başına olan etkiden daha fazla) toksik etkiler gösterebilmektedir (Su ve ark., 2022).

Zooplankton: Zooplanktonlar, özellikle kopepodlar, MP'leri besin partikülleriyle karıştırarak aktif olarak tüketebilmektedir (Cole ve ark., 2013). Alım oranı, MP'nin bolluğu, şekli, boyutu ve rengi ile zooplanktonun beslenme moduna bağlıdır (Botterell ve ark., 2020). Doğal ortamda biyofilm (mikrobiyal tabaka) ile kaplanmış MP'ler, saf MP'lere göre daha çekici hale gelebilir ve daha çok tüketilebilir (Vroom ve ark., 2017). MP maruziyeti, zooplanktonlarda hayatta kalma oranında azalma, büyümede yavaşlama, üreme başarısında düşüş (daha az ve küçük yumurta) ve beslenme oranında azalmaya neden olmaktadır (Cole ve ark., 2013; Desforges ve ark., 2015). Bu etkiler, zooplankton popülasyon dinamiklerini doğrudan etkileyerek, bunlarla beslenen balık larvaları ve diğer organizmalar için besin bulunabilirliğini azaltır. Daha da önemlisi, zooplankton popülasyonlarındaki bir çöküş, okyanus karbon pompası ve oksijen üretimi gibi küresel biyojeokimyasal döngüleri etkileyebilme potansiyeline sahiptir (Kvale ve ark., 2021). Tablo 4 ve Şekil 4'de çeşitli zooplankton türlerinin MP alımı gösterilmektedir.



Şekil 4. Çeşitli zooplankton türleri tarafından yutulan mikroplastikler (Devi ve ark.,2025'dan alıntılanmış; ilgili detay literatürün temini; Amalia ve ark.,2021).

Tablo 4. Mikroplastiklerin planktonlar üzerindeki etkileri (ilgili literatür özeti)

Organizma grubu	Maruz kalma / Birikme yolları	Başlıca olumsuz etkiler	Ekolojik sonuçlar
Fitoplankton	Direkt temas, adsorpsiyon, katkı maddesi salınımı.	Hücre büyümesi inhibisyonu, klorofil-a içeriğinde ve fotosentetik verimlilikte azalma.	Denizel birincil üretimde ve biyoçeşitlilikte potansiyel azalma; besin ağına enerji girişinde kısıtlama.
Zooplankton (örn. Kopepodlar)	Aktif yutma (besin sanılarak).	Hayatta kalma oranında azalma, büyümede yavaşlama, üreme verimliliğinde düşüş (yumurta sayısı/kalitesi), beslenme oranında azalma.	Zooplankton popülasyonlarında azalma; balık larvaları ve filtreleyiciler için besin kıtlığı; biyojeokimyasal döngülerde (karbon, oksijen) bozulma potansiyeli.

2.2. Omurgasızlar

Denizel omurgasızlar, yüksek çeşitlilikleri, farklı beslenme stratejileri ve ekosistem işlevlerindeki rolleri nedeniyle MP etkilerine karşı önemli bir odak noktasıdır.

2.2.1. Bentik Omurgasızlar

Bentik omurgasızlar (midyeler, deniz kurtları, deniz hıyarları), sedimentte biriken MP'lere kronik maruziyet nedeniyle yüksek risk altındadır. MP maruziyeti, bu organizmalarda metabolizma, büyüme ve üreme gibi temel fizyolojik ve yaşam öyküsü özelliklerinde istatistiksel olarak anlamlı azalmalarla ilişkilendirilmiştir (Berlino ve ark., 2021). Bu, bireysel uygunluk ve nüfus dinamiği üzerinde doğrudan bir tehdittir (Tablo 5). Bu etkiler, MP'lerin sindirim sisteminde neden olduğu fiziksel tıkanıklık, besin alımının engellenmesi ve enerjinin büyüme yerine stres tepkilerine (örn. antioksidan enzim üretimi) harcanmasından kaynaklanır (Trestrail ve ark., 2020). Süzerek beslenen midyeler, yutarak beslenen deniz kurtları ve detritusla beslenen deniz hıyarları, doğal besin partikülleriyle benzer boyutta oldukları için MP'leri kolaylıkla yutarlar (Wright ve ark., 2013).

Tablo 5. Mikroplastiklerin Bentik Omurgasızlar Üzerindeki Etkileri

Organizma grubu	Ana etki mekanizmaları	Gözlemlenen etkiler	Kaynak
Çift Kabuklular (Midye, İstiridye)	Süspansiyonla beslenme yoluyla yüksek alım, sindirimde tıkanıklık, dokularda birikim.	Enerji dengesinde bozulma, büyüme hızında azalma, immün yanıtta değişiklik, üreme kapasitesinde düşüş.	Berlino ve ark. (2021)
Deniz kurtları/ Poliketler	Sedimentle birlikte MP yutma, sindirim epitelinde fiziksel hasar.	Besin emiliminde azalma, büyümede yavaşlama, oksidatif stres.	Wright ve ark. (2013)

2.2.2. Mercanlar

Mercan resifleri, yüksek biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetleri sağlamalarına rağmen, MP kirliliğine karşı savunmasızdır (Zhang ve ark., 2023). Mercan polipleri, MP'leri dokunaçlarıyla yakalayıp yutabilmekte veya üzerlerini mukusla kaplayarak atmaya çalışmaktadır (Huang ve ark., 2021). Yutulan MP'ler, sindirim sisteminde uzun süre kalarak (Reichert ve ark., 2018) besin emilimini engelleyebilir, fiziksel tahrişe ve enerji dengesinin bozulmasına yol açabilir (Tablo 6). Laboratuvar çalışmaları, MP maruziyetinin mercanlarda ağarma (zooxanthellae kaybı), doku nekrozu ve büyüme oranlarında azalmaya neden olabildiğini göstermiştir (Huang ve ark., 2021). Stres altındaki mercanların hastalıklara karşı direnci de düşebilir.

Tablo 6. Mikroplastiklerin Denizel Omurgasızlar Üzerindeki Etkileri

Organizma grubu	Maruz kalma / Birikme yolları	Başlıca olumsuz etkiler	Ekolojik/Trofik sonuçlar	Kaynak
Bentik Omurgasızlar	Süzerek, yutma ile, detritusla beslenme yoluyla yutma.	Metabolizma, büyüme ve üremede azalma; enerji dengesinde bozulma, oksidatif stres.	Popülasyon dinamiğinde bozulma; su filtrasyonu, sediment karıştırma gibi ekosistem işlevlerinde aksama; trofik transfer kaynağı.	Berlino ve ark. (2021)
Mercanlar	Dokunaç-larla tutma ve yutma, mukus üretimi.	Ağarma, nekroz, büyüme hızında azalma, enerji dengesinde bozulma, hastalıklara dirençte düşüş.	Resif yapısı ve biyoçeşitliliğinde bozulma; balıkçılık ve kıyı koruma gibi resif hizmetlerinde kayıp.	Huang ve ark. (2021); Reichert ve ark. (2018)

Tablo 6. devamı Mikroplastiklerin Denizel Omurgasızlar Üzerindeki Etkileri

Organizma grubu	Maruz kalma / Birikme yolları	Başlıca olumsuz etkiler	Ekolojik/Trofik sonuçlar	Kaynak
Kabuklular	Solungaç/ ağız yoluyla alım, beslenme yoluyla yutma.	Bağışıklık ve hayatta kalma oranında azalma, doku hasarı, davranış bozukluğu (beslenme, yüzme), oksidatif stres, mikrobiyota dengesizliği.	Popülasyonlarda azalma; besin ağındaki av/avcı dengesinin bozulması; insan tüketimi için risk.	Zhang ve ark. (2023); Li ve ark. (2022)
Diğer (Amfipodlar vb.)	Sedimentle beslenme yoluyla yutma.	Büyümede (somatik ve üreme) azalma, enerji bütçesinde stres tepkilerine kayma.	Bentik besin ağına MP girişi ve trofik transferde başlangıç noktası.	Wright ve ark. (2013); Trestrail ve ark. (2020)

2.2.3. Kabuklular (Karides, Yengeç, İstakoz)

Kabuklular, hem av hem de avcı olarak besin ağlarında kritik bir role sahiptir ve Karides, yengeç ve istakoz gibi kabuklular, MP'leri solungaç veya ağız yoluyla alabilir (Tablo 6). MP maruziyeti, bu organizmaların beslenme, yüzme ve savunma davranışlarını bozar (Zhang ve ark., 2023). Fizyolojik etkiler arasında oksidatif stres, bağışıklık yetmezliği, üreme verimliliğinde düşüş ve büyümede azalma yer alır (Timilsina ve ark., 2023). Primer MP'ler, diğer kirleticilerle birlikte bulunduğu beslenme verimliliğini sekonder MP'lere göre daha fazla azaltabilir (Li ve ark., 2022).

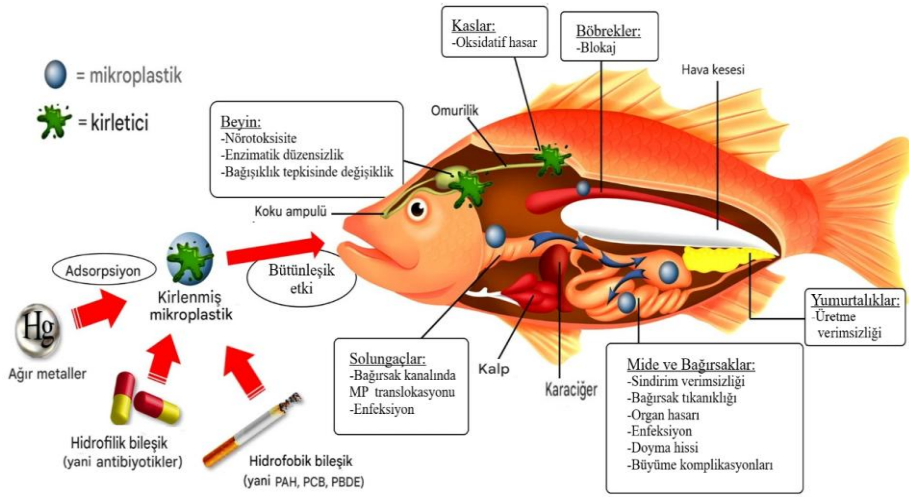
2.2.4. Diğer Omurgasızlar (Amfipodlar, Deniz Yıldızı vb.)

Amfipodlar gibi sedimentle beslenen küçük omurgasızlar, MP'leri doğal besinleriyle karıştırarak tüketmeye özellikle yatkındır (Wright ve ark., 2013). Bu durum, onları besin zincirinde MP'lerin bentik organizmalara giriş noktası haline getirir (Tablo 6). Genel olarak, MP alımı omurgasızların hem somatik (vücut) hem de üreme büyümesini baskılamakta, enerjinin temel yaşamsal süreçlerden stres tepkilerine kaymasına neden olmaktadır (Trestrail ve ark., 2020).

2.3. Balıklar

Balıklar, hem doğrudan suyu yutarak veya solungaçlarıyla filtreleyerek, hem de MP içeren avlarını tüketerek (ikincil alım) MP'lere maruz kalırlar (Wootton ve ark., 2021). Tablo 7-8 ve Şekil 5'de sunulduğu üzere; MP'ler balıkların mide-bağırsak sisteminde, solungaçlarında, kaslarında, karaciğerinde ve hatta beyin dokusunda tespit edilmiştir (Koongolla ve ark., 2022). Evrimsel ve ekolojik açıdan son derece önemli yeri olan Galapagos Adaları, Büyük Okyanus'ta, ana karadan yaklaşık 1.000 km batıda yer alın, Ekvador'a bağlı volkanik bir takımadadır. 1978'de UNESCO Dünya Mirası listesine alınmıştır, adaların yaklaşık %98'i milli park kapsamındadır. Bu özelliklerine rağmen adaların denizel çevresindeki balıklarda MP'ler üzerine yapılan bir çalışmada balıkların ve denizel faunanın çoğunda MP'ye rastlanmıştır (Şekil 6). Bu çalışmada analiz edilen tüm farklı türler arasında, etçil türlerin %77'sinin sindirim sisteminde mikropplastik parçalar bulunurken, bunları planktivorlar (%63) ve detritivorlar (%20) takip etmiştir. Okyanuslarda her boyuttaki mikropplastik parçaların kontaminasyonu, özellikle avlarının boyut aralığıyla örtüştüğünde, deniz organizmaları tarafından kolayca yiyeceklerle karıştırılabilir. İncelenen toplam 16 türden, dev kalamar olarak bilinen *Dosidicus gigas*, sindirim sisteminde %93 mikropplastik yaygınlığına ulaşmıştır. Bunu %87 yaygınlık oranıyla *Alopias pelagicus* ve *Coryphaena hippurus* gibi balıklar izlemiş olup; üçüde etçil türlerdir (Alfaro-Núñezve ark., 2021).

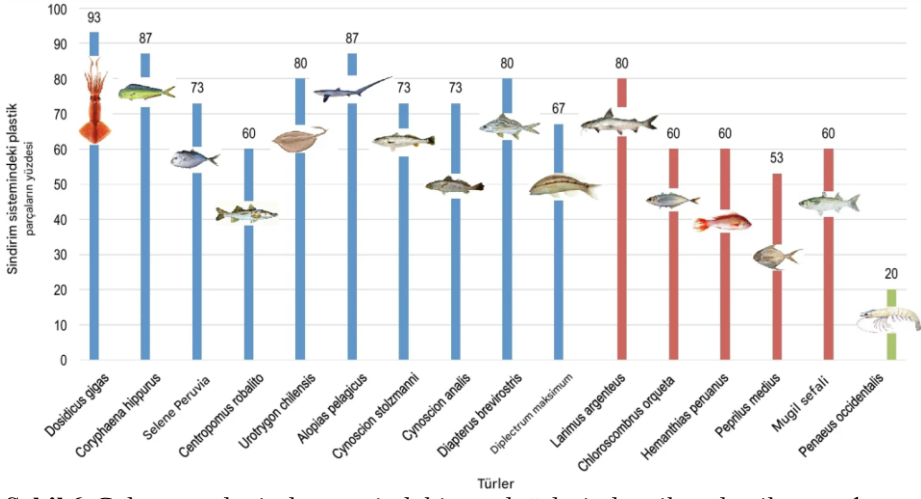
Fiziksel ve fizyolojik etkiler: Yutulan MP'ler, bağırsak tıkanıklığına, mukozal yaralanmalara, tokluk hissine ve besin emiliminin azalmasına neden olarak büyüme geriliğine ve vücut kondisyonunun kötüleşmesine yol açar (Bhuyan, 2022). Solungaçlara yapışan lifsel MP'ler, solunum verimliliğini düşürebilir. Dolaşıma geçen küçük partiküller (<500 nm) karaciğer, böbrek ve beyin gibi organlarda birikerek iltihaplı yanıtları tetikleyebilir (Galban-Malagon ve ark., 2020). Tablo 8'de gösterildiği üzere MP maruziyeti ayrıca, balıklarda oksidatif stresi artırarak lipid, protein ve DNA hasarına neden olmakta (Bhuyan, 2022), antioksidan savunma sistemini ve metabolik enzim aktivitelerini (örn. karaciğerde) bozmaktadır (Chae ve ark., 2019).



Şekil 5. MP ve kirleticilerin balıklar üzerindeki etkileri (Amalia ve ark.,2021).

Davranışsal ve nörolojik etkiler: MP'ler balık davranışını çeşitli şekillerde olumsuz etkiler (Tablo 8). Yem arama davranışı bozulabilir, sosyal etkileşimler (sürü oluşturma) azalabilir, yırtıcıdan kaçınma yeteneği zayıflayabilir ve genel aktivite/yer değiştirme hızı düşebilir (Salerno ve ark., 2021; Liang ve ark., 2023). Bu değişiklikler, bireyin hayatta kalma ve üreme şansını doğrudan azaltır. Beyin dokusunda biriken MP'ler veya taşıdıkları nörotoksik kimyasallar, nörotransmitter dengesini bozarak nörotoksisiteye sebep olabilir (Schür ve ark., 2019).

Üreme ve gelişim üzerine etkiler: MP'ler, balıklarda endokrin sistemini bozarak üreme sağlığını tehdit eder. Steroid hormon (östrojen, testosteron) seviyelerinde değişikliklere, gamet (yumurta/sperm) kalitesinde düşüşe, yumurtlama davranışında gecikmelere ve nihayetinde üreme başarısında (döl verimi) azalmaya yol açabilmektedir (Cormier ve ark., 2022). Embriyonik ve larval gelişim aşamaları özellikle hassastır; anomaliler ve yüksek ölüm oranları gözlemlenmiştir (Tablo 8).



Şekil 6. Galapagos denizel çevresindeki sucul türlerinde mikroplastik parçalarının yaygınlığı. Deniz canlıları beslenme davranışlarına göre kategorilere ayrıldı: etobur, planktivör ve detritivör. (Alfaro-Núñez ve ark., 2021).

Tablo 7. MP'lerin Balıklar Üzerindeki Toksikolojik Etkileri (Li ve ark., 2021).

Balık türü	MP türü	Partikül boyutu	Konsantrasyon	Toksikolojik etkiler
<i>Pomatoschistus microps</i>	PE	1~5µm	184µg/l	AChE aktivitesinde azalma
<i>Acanthochromis polyacanthus</i>	PET	1~2mm	0~0.86mg/l	Büyümede azalma
<i>Dicentrarchus labrax</i>	PE	10~45µm	10~100 adet/mg	Ölüm oranında artış
<i>Dicentrarchus labrax</i>	PVC	<0.3mm	%0.1 (ağırlık oranı)	İltihaplanma
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Polimer	1~5µm	0.69mg/l	Yüzme hızında düşm
<i>Oryzias latipes</i>	PE	<1mm	8µg/l	Aşırı sperm çoğalma
<i>Carassius carassius</i>	PS	24.7nm	130mg	Canlılıkta azalma
<i>Danio rerio</i>	PS	24.7nm	1.5×10 ¹³ adet/l	Vücut uzunluğunda azalma
<i>Danio rerio</i>	PE, PP, PA, PVC	70µm	1.0mg/l	Bağırsak hasarı

Vektör etkisi ve insan sağlığı riski: Balıklar, MP'ler ve bunlara bağlı kirleticiler (ağır metaller, KOK'lar) için bir vektör görevi görür (Tablo 8). Tüketilen balıklar yoluyla bu kirleticiler insan besin zincirine girebilir

(Mahamud ve ark., 2022). Balık kas dokusunda MP varlığı doğrudan insan maruziyeti için potansiyel bir kaynak oluşturmaktadır (Haa ve ark., 2021).

Tablo 8. Mikroplastiklerin balıklar üzerindeki etkileri

Etki kategorisi	Maruz kalma / Birikme yolları	Başlıca olumsuz etkiler	Sonuçlar	Kaynakça
Fiziksel/ Fizyolojik	Yutma, solungaç teması, dokulara translokasyon.	Bağırsak tıkanıklığı/yaralanması, büyüme geriliği, solunum güclüğü, organ (karaciğer, böbrek) hasarı, oksidatif stres, enflamasyon.	Kondisyon kaybı, hastalıklara duyarlılıkta artış, ölüm.	Laist (1997); Bhuyan (2022); Lu ve ark. (2016); Galban-Malagon ve ark. (2020)
Davranışsal/ Nörolojik	Nörotoksik kimyasalların salınımı/taşınması, beyne partikül translokasyonu.	Beslenme, sosyal etkileşim, yırtıcıdan kaçınma ve genel aktivitede bozulma; nörotoksisite.	Hayatta kalma ve üreme şansında azalma.	Salerno ve ark. (2021); Liang ve ark. (2023); Schür ve ark. (2019)
Üreme/ Gelişim	Endokrin bozucu kimyasalların salınımı / taşınması.	Hormon dengesinde bozulma, gamet kalitesinde düşüş, yumurtlama gecikmesi, üreme verimliliğinde azalma, embriyo/larva anomalileri.	Popülasyon büyüme potansiyelinde düşüş.	Cormier ve ark. (2022); Barrick ve ark. (2021)

2.4. Üst Trofik Seviyeler: Deniz Memelileri, Kuşlar ve Sürüngeçler

Bu gruplar, besin zincirinin tepesinde yer almaları ve genellikle uzun ömürlü olmaları nedeniyle kronik maruziyet ve biyolojik birikim açısından yüksek risk altındadır (Tablo 9).

Deniz Memelileri (Balinalar, Yunuslar, Foklar): Deniz memelileri için en büyük tehditler, makroplastiklere dolanma ve yutmaktır (Laist, 1997). Yutma, genellikle hedeflenen besinle (örn. kalamar) plastiğin karışması sonucu gerçekleşir. Sindirim sisteminde biriken plastikler, tıkanıklığa, mide/barsak yırtılmalarına, besin emiliminin engellenmesine ve yalancı tokluk hissine bağlı açlıktan ölüme neden olabilir (Jacobsen ve ark., 2010). Ayrıca, tüketilen MP'lerin ve bunlara bağlı kirleticilerin dokularda birikmesi, fizyolojik strese, bağışıklık baskılanmasına ve üreme sorunlarına yol açabilir (Tablo 9). MP'lerin balina ve yunusların mide-bağırsak sistemlerinde ve dışkılarında bulunması, maruziyetin yaygınlığını göstermektedir (Park ve ark., 2023).

Deniz Kuşları: Deniz kuşları, özellikle yüzeyden beslenen türler, plastikleri besin sanarak yutmakta veya MP içeren avlarını tüketmektedir (Laist, 1997). Midedeki plastik, hacim kaplayarak yalancı bir tokluk hissi yaratır, bu da besin alımının ve enerji depolanmasının azalmasına, kilo kaybına ve göç/üreme için gerekli enerjinin kalmamasına neden olur. Fiziksel olarak, sindirim kanalında tıkanıklık, yaralanma ve perforasyon (delinme) meydana gelebilir. Ayrıca, ebeveynlerin yavrularına regürjitasyon (kusarak besleme) yoluyla plastik aktarması da yaygın bir durumdur (Tablo 9). Bu faktörler, kuşların kondisyonunu, büyümesini, üreme başarısını ve nihayetinde popülasyon sağlığını olumsuz etkiler (Heswall ve ark., 2025).

Deniz Kaplumbağaları: Deniz kaplumbağaları, şeffaf plastik torbaları denizanalarıyla karıştırarak sıklıkla yutmaktadır (Laist, 1997). Yutulan plastikler, bağırsak tıkanıklığına, iç yaralanmalara, besin emiliminin engellenmesine ve ölüme yol açabilir (Tablo 9). Ayrıca, terk edilmiş balık ağlarına dolanma da önemli bir ölüm nedenidir. MP'lerin sadece sindirim sisteminde değil, böbrek, karaciğer, kas ve hatta üreme organları ile embriyo dokularında tespit edilmesi (Navarro ve ark., 2023), bu kirleticilerin sistemik etkilerinin ve üreme sağlığı üzerindeki potansiyel tehdidin ciddiyetini göstermektedir. Karada ise, yuvalama plajlarındaki plastik atıklar, dişilerin yuva yapmasını ve yavruların denize ulaşmasını engelleyebilir (Duncan ve ark., 2019).

Tablo 9. Mikroplastiklerin üst trofik seviyeler üzerindeki etkileri

Organizma grubu	Maruz kalma / Birikme yolları	Başlıca olumsuz etkiler	Popülasyon / Ekolojik sonuçlar	Kaynakça
Deniz Memelileri	Dolanma, besinle karıştırarak yutma, av yoluyla MP alımı.	Boğulma, sindirim tıkanıklığı/yırtılması, beslenme verimliliğinde azalma, kronik stres, organ hasarı.	Birey ölümleri, popülasyonlarda azalma, özellikle nesli tehlikedeki türler için ciddi risk.	Laist (1997); Park ve ark. (2023)
Deniz Kuşları	Besin sanarak yutma, regürjitasyon yoluyla yavrulara aktarma, av yoluyla.	Yanlış tokluk hissi, besin alımında ve enerji depolamasında azalma, kilo kaybı, sindirim tıkanıklığı / yaralanması, üreme başarısında düşüş.	Kondisyon kaybı, üreme başarısızlığı, popülasyonlarda düşüş.	Laist (1997); Heswall ve ark. (2025)

2.5. Deniz Çayırları ve Diğer Mavi Karbon Ekosistemleri

Bu "Mavi Karbon Ekosistemleri", fiziksel yapıları sayesinde su akışını yavaşlatıp sedimenti tutarak, MP'ler için doğal "yutaklar" (sink) işlevi görürler (Huang ve ark., 2021). Ancak bu birikim, ekosistemi tehdit eder. Deniz çayırı yaprakları ve mangrov kökleri, sürtünme yaratarak suyun hızını keser ve partiküllerin (MP'ler dahil) çökmesini sağlar (Unsworth ve ark., 2021). Bu nedenle, bu bitkili alanlardaki MP konsantrasyonu, bitkisiz açık alanlara göre genellikle daha yüksektir (Kreitsberg ve ark., 2021). Biriken MP'ler, bitki yüzeylerine yapışabilir, fotosentezi engelleyebilir ve bitki büyümesini olumsuz etkileyebilir (Li ve ark., 2020). Ayrıca, bu ekosistemlerde yaşayan ve bitkilerle veya sedimentle beslenen organizmalar (balıklar, omurgasızlar) MP'leri yutarak besin ağına dahil ederler (Tahir ve ark., 2019).

Mangrov ve deniz çayırı sedimentleri genellikle organik maddece zengindir ve bu da hidrofobik Kirleticiler Organik Kirleticilerin (KOK) birikimi için uygun bir ortam sağlar. MP'ler, bu kirleticileri yüzeylerinde yoğunlaştırarak canlı organizmalar için daha erişilebilir hale getirebilir (Nagar ve ark., 2023). Bir organizma MP'yi yuttuğunda, KOK'lar sindirim sıvılarında çözünerek organizma dokularına geçebilir ve toksik etkiler gösterebilir. Bu ikili tehdit (fiziksel + kimyasal), mavi karbon ekosistemlerindeki biyoçeşitlilik ve ekosistem sağlığı için ciddi bir risk oluşturmaktadır (Tahir ve ark., 2019).

3. MİKROPLASTİKLERİN DENİZ BİYOTASI ÜZERİNE BİYOLOJİK ETKİLERİ

Bu konu değişik organizma grupları ve türlerinde Tablo 10'da özetlenmiştir. Bunlar;

- **Beyin Üzerindeki Etkiler (Nörotoksisite):** Beyin, çevre kirleticilerinin deniz organizmaları üzerindeki nörotoksik etkilerini belirlemek için sıklıkla kullanılabilir bir dokudur (Hoyo-Alvarez ve ark., 2022).
- **Solungaçlar Üzerindeki Etkiler:** Solungaçlar, mikroplastiklerin organizmaya giriş yollarından biridir (Zhang ve ark., 2021). Solunum sırasında, MP'ler su akışıyla pasif olarak balıkların solungaç odalarına girebilmekte ve solungaç filamentlerine yapışabilmektedir (Zhang ve ark., 2021). Çeşitli balık türlerinin solungaçlarında lif, parça ve pelet

formunda MP'ler bulunmuştur. Lifler, fiziksel özellikleri nedeniyle solungaç filamentlerine kolayca yapışmaktadır (Zhang ve ark., 2021).

- **Kas Üzerindeki Etkileri:** Balık türlerinin kas dokusunda MP'ler tespit edilmiştir (Haave ve ark., 2021). Balık kasının insanlar tarafından tüketilen kısım olması ve burada biriken mikroplastiklerin insan sağlığı için potansiyel risk oluşturmaları nedeniyle bu bulgu daha da önem taşımaktadır (Ferrante ve ark., 2022).
- **Karaciğer Üzerindeki Etkileri:** Karaciğer, ksenobiyotiklerin detoksifikasyonunda merkezi bir role sahiptir ve bu nedenle kirlenici kaynaklı hasarın bir göstergesidir. Deneysel çalışmalar, MP'lerin bağırsak bariyerini geçerek kan dolaşımına katılabildiğini ve karaciğere ulaşabildiğini göstermiştir (Lu ve ark., 2016).
- **Sindirim Sistemi (Bağırsak) Üzerindeki Etkileri:** Balıklarda iltihabı (yangı) tepkisinin başlatılması/aktive edilmesi; yangı belirtici olan sitokinlerin sentezinin artışına neden olunur (Jin ve ark., 2015).
- **Endokrin Sistem Üzerindeki Etkileri:** MP'ler, yüzeylerinde antibiyotikler, ağır metaller, ftalatlar, dioksinler, organoklorlu kirleniciler (HCB, DDT'ler, PCB'ler), bisfenol A (BPA) ve kalıcı organik kirleniciler (KOK'lar) gibi endokrin bozucu kimyasalları (EDC'ler) adsorbe edebilir (Barrick ve ark., 2021). De Sá ve ark., (2018), MP'lerin deniz besin ağında bu kirleniciler için bir taşıyıcı olarak hareket edebileceğini belirtmiştir.
- **Metabolizma Üzerindeki Etkileri:** MP yutulmasıyla ilişkili metabolik değişikliklerden en çok etkilenen organlardan biri karaciğerdir. Deneysel çalışmalar, MP maruziyetinin metabolik bozukluklara neden olabildiğini göstermiştir (Chae ve ark., 2019).
- **Genotoksosite:** Zitouni ve ark., (2022), *Serranus scriba* karaciğerinde MP alımıyla ilişkili potansiyel genotoksisiteyi mikronükleus testi ile değerlendirmiş ve mikronükleus miktarındaki değişikliklerle önemli, bölgeye bağlı bir genotoksosite olduğunu bildirmiştir.

Tablo 10. Denizel faunaya mikropplastiklerin zararlı etkileri (literatür derlemesidir).

Etkiler	Mekanizmalar	Etkilenen deniz hayvanları ve Kaynakçası
Fiziksel Yutma: Sindirim sisteminde tıkanıklık ve hasar, yalancı tokluk, iştahsızlık ve büyümede azalmaya yol açar	MP'ler sindirim kanalında birikerek tıkanıklığa veya iç dokularda hasara neden olur	Zooplankton: Copepod (<i>Neocalanus cristatus</i>) (Desforjes ve ark., 2015; He ve ark., 2022) Kabuklu: Norveç istakozu (<i>Nephrops norvegicus</i>) (Welden & Cowie, 2016) Balık: Sarıağız (<i>Argyrosomus regius</i>) (Campos ve ark., 2021), Deniz Kuşu: Küçük karabatak (<i>Phalacrocorax sulcirostris</i>) (Susanti ve ark., 2022) Deniz Kaplumbağası: Sini kaplumbağası (<i>Caretta caretta</i>) (Di Renzo ve ark., 2021)
Enerji Tükenmesi: Yalancı tokluk hissi nedeniyle enerji depolarında azalma	Organizmalar sindirilemeyen MP'leri yedikten sonra "tokluk" hisseder, iştahsızlığa yol açar	Mercan: Taş mercan (<i>Astroides calycularis</i>) (Savinelli ve ark., 2020)
Toksiste : Katkı maddelerinden (ftalatlar, bisfenoller, boyalar vb.) kaynaklanan kimyasal toksiste	MP'ler, ağır metaller ve PAH'lar gibi zararlı katkı maddelerini veya adsorbe edilmiş kirleticileri salarak çeşitli fizyolojik süreçleri bozar	Mercan: Düğme mercan (<i>Protolythoa</i> sp.) (Jiang ve ark., 2020)
Biyobirikim: Toksinlerin besin zinciri yoluyla biyobirikimi	MP'ler kalıcı organik kirleticileri adsorbe ederek toksinlerin trofik seviyeler arasında transferine neden olur	Kabuklu: Yırtıcı yengeç (<i>Charybdis japonica</i>) (Wang ve ark., 2021)
Yaşam Alanı Bozulması: Bentik yaşam alanlarının ve mercan resiflerinin üzerini örtme	MP'ler deniz tabanına ve resiflere çökerek ışığı ve oksijen akışını fiziksel olarak engeller	Mercan: Dallı mercan (<i>Pocillopora acuta</i>) (Yen ve ark., 2024) Bentik Omurgasızlar: Tüp kurdu (<i>Spirobranchus triquetra</i>) (Subias-Barata ve ark., 2022)
Üreme Üzerine Etkiler: Bozulmuş üreme, azalmış fertilite ve anormal gelişim	MP'ler gamet kalitesi, embriyo gelişimi ve larva büyümesi ile etkileşir	Kabuklu: Deniz kopepodu (<i>Tigriopus japonicus</i>) (Kim ve ark., 2022) Yumuşakça: Pasifik istiridyesi (<i>Crassostrea gigas</i>) (Dong ve ark., 2024), Akdeniz midyesi (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) (Romdhani ve ark., 2024) Balık: Deniz medakası (<i>Oryzias melastigma</i>) (Li ve ark., 2022), Zebra balığı (<i>Danio rerio</i>) (Sarasamma ve ark., 2020; Lin ve ark., 2023)
Davranış Değişiklikleri: Değişmiş beslenme, hareket veya avcıdan kaçınma	Nörotoksik kimyasallar, duyu ve motor fonksiyonları bozarak doğal davranışları etkiler	Kabuklu: Mysid karides (<i>Neomysis japonica</i>) (Wang ve ark., 2020) Balık: Zebra balığı (<i>Danio rerio</i>) (Sarasamma ve ark., 2020), Sarı kuyruk kral balığı (<i>Seriola lalandi</i>) (Kelly, 2022) Deniz Kaplumbağası: Sini kaplumbağası (<i>Caretta caretta</i>) (Anastasopoulou & Fortibuoni, 2019)

Tablo 10 devamı. Denizel faunaya mikroplastiklerin zararlı etkileri

Etkiler	Mekanizmalar	Etkilenen deniz hayvanları ve Kaynakçası
Solunum Stresi: Bozulmuş solunum fonksiyonları	MP'ler solungaçlar gibi solunum yüzeylerini tıkar, oksijen alımını azaltır	Sünger: Akdeniz süngeri (<i>Petrosia ficiformis</i>) (De Marchi ve ark., 2022) Balık: Çorabina balığı (<i>Chirocentrus dorab</i>), Drepane (<i>Drepane punctata</i>) (De Marchi ve ark., 2022)
Bağışıklık Baskılanması: Azalmış bağışıklık yanıtlarına yol açan oksidatif stres	Mikroplastik kaynaklı stres, enfeksiyonlarla savaşıma yeteneğini düşürerek hastalıklara yatkınlığı artırır	Kabuklu: Beyaz karides (<i>Litopenaeus vannamei</i>) (Niemcharoen ve ark., 2022)
Büyüme İnhibisyonu: Azalmış büyüme ve gelişimsel gecikmeler	Büyüme için kullanılacak enerji, MP'lerin neden olduğu stresle başa çıkmak için kullanılır	Kabuklu: Deniz kopepodu (<i>Tigriopus japonicus</i>) (Kim ve ark., 2022), Derisidikenli: Deniz kestanesi (<i>Paracentrotus lividus</i>) (Bertucci & Bellas, 2021), Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Wang ve ark., 2023), Balık: Deniz medakası (<i>Oryzias melastigma</i>) (Li ve ark., 2020)
Ölüm: Yutma, açlık veya toksisite nedeniyle artan ölüm oranı	Şiddetli tıkanıklıklar, toksik yüklenme veya besin yetersizlikleri ölüme yol açar	Kabuklu: Deniz kopepodu (<i>Acartia tonsa</i>) (Shore ve ark., 2021), Balık: Salmonid balıklar (Seeley ve ark., 2023), Deniz Kaplumbağası: Deniz kaplumbağaları (Wilcox ve ark., 2018), Deniz Kuşu: Albatros (<i>Diomedea</i>) (Roman ve ark., 2020; Roman ve ark., 2019) Su Memelisi: Afalina (Roman ve ark., 2021)
Genotoksosite: DNA hasarı ve genetik mutasyonlar	MP'lerin veya ilişkili toksinlerin neden olduğu oksidatif stres, DNA parçalanmasına ve mutasyonlara yol açar	Yumuşakça: Akdeniz midyesi (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) (Romdhani ve ark., 2022) Derisidikenli: Kum doları (<i>Scaphechinus mirabilis</i>) (Mazur ve ark., 2021), Deniz kestanesi (<i>Paracentrotus lividus</i>) (Mottola ve ark., 2024) Balık: Zebra balığı (<i>Danio rerio</i>) (Santos ve ark., 2022), Yaygın deniz balıkları (Das, 2023)
Endokrin Bozulma: Üreme ve büyümeyi etkileyen hormonal dengesizlikler	Bisfenol A (BPA) gibi katkı maddeleri hormonları taklit ederek sinyal yollarını bozar	Yumuşakça: Kan istiridyesi (<i>Tegillarca granosa</i>) (Tang ve ark., 2022), Derisidikenli: Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Yuan ve ark., 2023) Balık: Atlantik morinası (<i>Gadus morhua</i>) (Goksoyr ve ark., 2024), Mercan resifi balığı (Gonzalez ve ark., 2021)

Tablo 10 devamı. Denizel faunaya mikroplastiklerin zararlı etkileri

Etkiler	Mekanizmalar	Etkilenen deniz hayvanları ve Kaynakçası
Patojen Taşıyıcılığı: <i>Vibrio</i> spp. gibi patojenler için vektör	MP'ler zararlı bakteriler için yüzer taşıyıcı görevi görerek enfeksiyon riskini artırır	Kabuklu: Beyaz karides (<i>Litopenaeus vannamei</i>) (Cholewiński ve ark., 2022; Bowley ve ark., 2021) Yumuşakça: Deniz tarağı (<i>Ruditapes</i> spp.) (Cholewiński ve ark., 2022; Bowley ve ark., 2021; Stenger ve ark., 2021) Derisidikenli: Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Cholewiński ve ark., 2022; Bowley ve ark., 2021) Balık: Kırmızı mercan (<i>Pagrus major</i>) (Cholewiński ve ark., 2022; Bowley ve ark., 2021)
İstilacı Türler: İstilacı türlerin yayılımı	MP'ler istilacı türler için sal görevi görerek onların yeni alanları kolonize etmesini sağlar	Mercan: Güneş mercanı (<i>Tubastraea</i> spp.) (Soares ve ark., 2023), Yumuşakça: Charu midyesi (<i>Mytella strigata</i>) (Kannan ve ark., 2023), Salyangoz (<i>Pirenella cingulata</i>) (Kannan ve ark., 2023), Tulumlu: 'Deniz kusmuğu' (<i>Didemnum vexillum</i>) (Gonzalez-Ortegon ve ark., 2024)
Trofik Transfer: MP'lerin ve ilişkili toksinlerin besin ağları boyunca transferi	Yırtıcılar, MP içeren avları tüketerek etkilerini trofik seviyeler boyunca büyütür	Zooplankton: Karides (<i>Palaemon elegans</i> ve <i>Praunus flexuosus</i>) (Kangas ve ark., 2023), Su Memelisi: Benekli fok (<i>Phoca largha</i>) (Siettmann ve ark., 2025), k Katil balinalar (Harlacher ve ark., 2023)

4. GENEL ETKİ MEKANİZMALARI VE TOKSİSİTE

Mikroplastiklerin deniz organizmaları üzerindeki etkileri, fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki ana mekanizma üzerinden ilerler. Bu mekanizmalar genellikle bir arada işler ve sinerjistik etkiler yaratabilir (Tablo 11).

4.1. Fiziksel (Mekanik) Etkiler

- **Tıkanıklık ve yer kaplama:** Sindirim sistemini doldurarak gerçek besin alımını engeller, yalancı tokluk hissi yaratır (Rochman ve ark., 2013).
- **Doku hasarı ve tahriş:** Sivri uçlu veya lifsi MP'ler, sindirim kanalı, solungaç epiteli gibi hassas dokularda aşınma, yırtılma ve ülserasyona neden olabilir (Wright ve ark., 2013).
- **Gaz değişiminin engellenmesi:** Solungaçlara yapışan MP'ler, oksijen ve karbondioksit değişimini kısıtlayabilir.

4.2. Kimyasal Etkiler: "Truva Atı" Paradigması

Mikroplastiklerin (MP'ler) denizel çevrede yalnızca fiziksel bir kirletici olarak değil, aynı zamanda çeşitli tehlikeli kimyasallar için bir taşıma vektörü olarak işlev gördüğüne dair artan kanıtlar, "**Truva Atı**" etkisi olarak adlandırılan kritik bir olguyu gündeme getirmiştir (Tablo 11 ve Şekil 7). Bu metafor, MP partiküllerinin, yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve hidrofobik özellikleri nedeniyle çevrede bulunan ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler (KOK'ler), farmasötikler ve plastik katkı maddeleri gibi toksik unsurları adsorbe ederek (yüzeylerinde tutarak) taşıyabildiğini ve organizmalar tarafından yutulduğunda, bu gizli yükü sindirim sistemi gibi daha reaktif ortamlara salılabildiğini ifade etmektedir (Hu ve ark., 2022). Böylece, zararsız bir taşıyıcı gibi görünen plastik parçalar, organizmanın vücuduna sızan tehlikeli ajanlara dönüşmekte ve beklenmedik, genellikle daha şiddetli toksikolojik sonuçlara yol açabilmektedir. Bu, MP tehdidinin en kritik ve karmaşık yönüdür. İki ana bileşeni vardır;

- **İçsel (leachate) toksisite:** Plastik polimerlere esneklik, renk, alev geciktirici gibi özellikler kazandırmak için eklenen katkı maddeleri (ftalatlar, bisfenol A (BPA), bromlu alev geciktiriciler), plastikten sızabilir ve endokrin bozucu, nörotoksik veya kanserojen etkiler gösterebilir (Zimmermann ve ark., 2021).
- **Vektör (taşıyıcı) etkisi:** MP'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve hidrofobik yapısı, su kolonundaki diğer kirleticileri (ağır metaller, pestisitler, poliklorlu bifeniller (PCB'ler), hidrokarbonlar) yüzeylerinde adsorbe etmelerine (yoğunlaştırmalarına) olanak tanır (Teuten ve ark., 2009). Organizma MP'yi yuttuğunda, bu kirleticiler sindirim ortamında desorbe olarak (çözünerek) organizma dokularına geçebilir ve toksisiteye neden olabilir. Bu süreç, kalıcı organik kirleticilerin besin zincirinde taşınmasını ve üst trofik seviyelerde biyomagnifikasyonunu kolaylaştıran kritik bir yoldur (Paolella ve ark., 2024).

Tablo 11. Mikroplastik toksisite mekanizmaları ve “Truva Atı” etkisi

Mekanizma Türü	Açıklama	Sonuçlar	Örnek Kaynak
Fiziksel	Sindirim/gaz değişim organlarında tıkanıklık, epitel doku hasarı, yanlış tokluk hissi.	Beslenme/ solunum veriminde düşüş, enerji açığı, büyüme geriliği, ölüm.	Rochman ve ark. (2013)
Kimyasal (İçsel)	Polimer matrisinden katkı maddelerinin (ftalatlar, BPA) sızması.	Endokrin bozulma, üreme bozuklukları, oksidatif stres.	Zimmermann ve ark. (2021)
Kimyasal (Vektör – Truva Atı)	MP yüzeyine adsorbe olan KOK’ların, ağır metallerin sindirim sisteminde salınması ve dokulara geçişi.	Kirleticilerin biyoyararlanımında artış, biyobirikim, trofik magnifikasyon, genotoksisite, immünotoksisite.	Brennecke ve ark. (2016)

**Şekil 7.** Tehlikeli kirleticilerin mikroplastik ile taşınımı “Truva Atı Etkisi” (Microsoft Copilot ile oluşturulmuştur).

4.2.1. Truva Atı Kavramının Gelişimi ve Temel

Mekanizmaları

Mikroplastiklerin kirletici taşıyıcısı rolüne dair farkındalık, plastiklerin çevresel davranışına ilişkin erken gözlemlerle başlamıştır. Mato ve ark., (2001), denizel ortamdaki plastik pellet'lerin (nurdle) poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve diklorodifenildikloroetilen (DDE) gibi KOK'leri önemli ölçüde konsantre edebildiğini gösteren öncü bir çalışma yayınlamıştır. Bu bulgu, plastiklerin pasif bir atık olmanın ötesinde, hidrofobik kirleticiler için bir "havuz" işlevi görebileceğine işaret etmiştir. Kavram, Teuten ve ark., (2009) plastiklerin kimyasal kirleticiler için küresel bir taşıyıcı ve "potansiyel bir Truva atı" olarak rolünü kapsamlı bir şekilde özetlediği derleme makalesiyle bilimsel literatürde somut bir şekilde yerleşmiştir. Bu çalışma, MP'lerin üretim sırasında eklenen katkı maddelerini (leachate) sızdırmasının yanı sıra, çevresel kirleticileri adsorbe etme ve desorbe etme (salma) dinamiklerini ortaya koyarak kavramın teorik temelini atmıştır.

Truva atı etkisinin fizikokimyasal temeli, MP'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve genellikle hidrofobik yapısında yatar. Bu özellikler, sudaki kirleticilerin MP yüzeyine adsorpsiyonunu (fiziksel veya kimyasal olarak tutunmasını) kolaylaştırır (Brennecke ve ark., 2016). Adsorpsiyonun derecesi, kirleticinin hidrofobisitesine (log Kow değeri), plastik polimerin türüne (ör., polietilen-PE, polistiren-PS), partikülün yaşına, yüzey pürüzlülüğüne ve biyofilm oluşumuna gibi faktörlere bağlıdır (Koelmans ve ark., 2016). Gouin ve ark., (2011), bu etkileşimleri termodinamik prensipler çerçevesinde modelledikleri çalışmalarıyla, Truva atı etkisinin kimyasal mekanizmalarına yönelik nicel bir anlayış geliştirmişlerdir (Tablo 13).

Organizma tarafından yutulduğunda, sindirim sistemi ortamı (sıcaklık, pH, safra tuzları ve sindirim enzimlerinin varlığı) MP yüzeyinde adsorbe olmuş kirleticilerin desorpsiyonu için ideal koşullar sağlayabilir (Bakir ve ark., 2014). Bu "hızlı salım" olgusu, kirleticinin biyoyararlanımını (organizma tarafından alınabilirliği) önemli ölçüde artırarak, aynı kirleticinin sudan doğrudan alımına kıyasla daha yüksek doku konsantrasyonlarına ve daha şiddetli toksik etkilere yol açabilir (Avio ve ark., 2015). İşte bu noktada, taşıyıcı MP "**Truva atı**" rolünü oynar (Şekil 7) ve içindeki tehlikeli yükü organizmanın savunma hatları içerisine sokar (Tablo 12 ve 14).

Tablo 12. Mikroplastikler tarafından taşınabilen kirletici türleri ve etkileşimi

Kirletici kategorisi	Özel örnekler	Etkileşim mekanizması ve sonuçlar	Anahtar çalışmalar
Kahçı Organik Kirleticiler (KOK'ler)	PCB'ler, DDT, PBDE'ler, PAH'lar	Hidrofobik etkileşimlerle MP yüzeyine güçlü şekilde adsorbe olur. Deniz suyuna kıyasla MP'lerde milyon kata varan konsantrasyonlarda birikebilir. Organizma sindirim sisteminde desorpsiyon gerçekleşebilir.	Rochman ve ark., 2013
Ağır Metaller	Bakır (Cu), Kurşun (Pb), Kadmiyum (Cd), Çinko (Zn)	Yüzeydeki fonksiyonel gruplar veya biyofilmler aracılığıyla kompleksleşme veya iyon değişimi yoluyla bağlanır. Özellikle antifouling boya kökenli MP'ler önemli kaynaktır.	Brennecke ve ark., 2016
Plastik Katkı Maddeleri (İçsel Kirleticiler)	Ftalatlar, Bisfenol A (BPA), Bromlu Alev Geciktiriciler	Polimer matrisine zayıf bağlıdır; UV, ısı veya mekanik aşınma ile MP'den sızabilir (leaching). Doğrudan endokrin bozucu, nörotoksik etkiler oluşturabilir.	Zimmermann ve ark., 2021
Modern Pestisitler	Neonicotinoidler, Organofosfatlar	Polimer türüne bağlı olarak çeşitli fizikokimyasal etkileşimler. Nörotoksisite, davranış değişiklikleri, ölüm oluşabilir.	Godoy ve ark., 2019).
Farmasötikler	Sülfametoksazol (SMX), Sülfametazin (SMT)	Hidrojen bağı, elektrostatik ve hidrofobik etkileşimlerle adsorpsiyon. pH ve tuzluluktan etkilenir. Antibiyotik direnci gelişimine katkıda bulunma potansiyeli artar.	Guo ve ark., 2019b; Thushari & Senevirathna, 2020

Tablo 13. "Truva Atı Etkisi" kavramının kronolojisi

Yıl	Araştırmacı (lar)	Ana Katkı/Bulgu	Önemi
2001	Mato ve ark.	Denizel plastik pellet'lerin (nurdle) PCB ve DDE gibi KOK'leri deniz suyuna kıyasla yüksek konsantrasyonlarda biriktirebildiğini gösterdi	Kirletici taşıma kapasitesinin ilk deneysel gözlem, Truva atı fikrinin öncüsü.
2009	Teuten ve ark.	Plastiklerin kimyasal kirleticiler için küresel bir taşıyıcı olarak rolünü kapsamlı şekilde derledi ve "Truva atı" terimini bu bağlamda ilk kez kullandı.	Truva atı kavramın terminolojik olarak literatüre girişi "isim babası" ve teorik temelini atıldığı kilit derleme ve kavramın popülerleşmesi.
2011	Gouin ve ark.	MP-kirletici etkileşimlerini termodinamik prensiplerle modelledi.	Etkinin kimyasal temellerine dair nicel bir çerçeve sağladı.
2013	Rochman ve ark.	MP'lerin PCB ve DDT gibi KOK'leri yüksek oranda absorbe ettiğini gösterdi; etkileri balıklarda test etti.	Denizel ortamda "Truva atı" etkisinin deneysel kanıtını sundu
2013	Browne ve ark.	Sedimentteki MP'lerin nonilfenol ve PBDE'leri toprak solucanlarına taşıyarak sağlıklarını etkilediğini gösterdi.	Karasal sistemlerdeki Truva atı etkisini gösteren öncü çalışma
2015	Avio ve ark.	Midyelerde, PAH ve PCB ile kirlenmiş MP'lerin bu kirleticilerin biyoyararlanımını ve toksik etkilerini (oksidatif stres, genotoksisite) artırdığını kanıtladı.	Kirletici transferinin fizyolojik ve toksikolojik sonuçlarını ortaya koydu.
2016	Brennecke ve ark.	PVC ve PE MP'lerinin deniz suyundan Cu, Pb, Cd gibi ağır metalleri adsorbe ederek deniz organizmalarına (ör. deniz kestanesi) aktarabildiğini gösterdi.	Ağır metaller bağlamında Truva atı etkisini genişletti.
2016	Koelmans ve ark.	MP'lerin kirletici vektörü olma mekanizmalarını (sorpsiyon/desorpsiyon) matematiksel modellerle inceledi; risk değerlendirmesi için çerçeve önerdi.	Kavramın mekanistik ve nicel yönden derinlemesine analizi.
2020	Wang ve ark. 2020a	"Truva atı" etkisinin ne zaman önemli olduğunu eleştirel modelleme ile inceledi.	Kavramın risk değerlendirmesinde Kavramın sınırlarını ve gerçek çevresel önemini konumlandıran kapsamlı değerlendirme.

Tablo 14. Farklı organizma gruplarında gözlemlenen "Truva Atı Etkisi" belirtileri

Organizma grubu	Çalışılan MP / Kirletici	Gözlemlenen başlıca etkiler	Kaynak
Fitoplankton	PS + PCB	Tekli kirletickiye kıyasla artan oksidatif stres ve büyüme inhibisyonu (sinerjistik etki).	Su ve ark., 2022
Midye (<i>Mytilus spp.</i>)	PE + PAH/PCB	Hepatopankreasta lipofusin birikimi, lizozomal membran stabilitesinde azalma, artan genotoksisite.	Avio ve ark., 2015
Toprak Solucanı	Sediment MP + Nonilfenol	Solucan dokularında kirletici birikimi, büyümede azalma, üreme verimliliğinde düşüş.	Browne ve ark., 2013
Balık (Örn. <i>Oryzias</i>)	PE + Ağır metaller (Cu, Pb)	Karaciğerde histopatoloji (yağlı dejenerasyon), artan EROD aktivitesi, davranış değişiklikleri.	Brennecke ve ark., 2016
Balık (Örn. <i>Danio rerio</i>)	PS + BPA/FTalat	Endokrin bozulma, erken gelişimsel anomaliler, nörodavranışsal değişiklikler.	Zimmermann ve ark., (2021)

Deneyssel çalışmalar, bu birleşik etkileri çeşitli organizma düzeylerinde ortaya koymuştur (Tablo 15). Örneğin, Browne ve ark., (2013), sedimentteki MP'lerin nonilfenol ve PBDE'leri toprak solucanlarına taşıyarak, yalnızca kirleticilere veya yalnızca MP'lere maruz kalan bireylere kıyasla daha yüksek ölüm oranlarına ve patolojik etkilere neden olduğunu göstermiştir. Bu, karasal sistemlerdeki Truva atı etkisinin erken bir kanıtıdır. Denizel ortamda, Avio ve ark., (2015), midyelerin (*Mytilus galloprovincialis*) PAH ve PCB yüklü MP'lere maruz kalması durumunda, bu kirleticilerin biyoyararlanımının arttığını ve oksidatif stres, genotoksisite ve lizozomal membran stabilitesinde bozulma gibi belirgin toksik etkiler gösterdiklerini belgelemiştir. Benzer şekilde, fitoplankton gibi temel üreticiler üzerinde yapılan çalışmalar, MP-kirletici kombinasyonlarının, tek başına kirletici veya MP maruziyetinden daha fazla büyüme inhibisyonu ve fotosentetik verimlilik kaybına yol açtığını göstermektedir (Su ve ark., 2022).

Tablo 15. Denizel organizmalarda gözlemlenen mikroplastik-kirletici birleşik etkisi

Organizma / Model	Kirletici Türü	Gözlemlenen Birleşik Etkiler (Truva Atı Etkisi)	Çalışma
Toprak Solucanı (<i>Lumbricus terrestris</i>)	Nonilfenol, PBDE'ler	MP'ler kirleticileri taşıyarak solucan dokularına aktardı; tek başına kirletici veya MP'den daha yüksek ölüm oranı ve patolojik değişiklikler.	Browne ve ark., 2013
Midyeler (<i>Mytilus galloprovincialis</i>)	PAH'lar, PCB'ler	PCB yüklü MP'ler, PCB'nin biyoyararlanımını ve biyobirikimini artırdı; artan oksidatif stres, genotoksitesite ve lizozomal hasar.	Avio ve ark., 2015
Deniz Yıldızı Larvaları (<i>Paracentrotus lividus</i>)	PCB-153	PS nanoplastikler, PCB'nin dokulara alımını ve embriyotoksik etkilerini potansiyelize etti (sinerjistik etki).	Beiras ve ark., 2019
Balık (<i>Oryzias melastigma</i>)	Ağır Metaller (Cu, Pb, Cd)	MP'ler metallerin bağırsak epitelinden geçişini kolaylaştırdı, karaciğerde daha yüksek metal birikimi ve enzimatik stres.	Brennecke ve ark., 2016
Fitoplankton (<i>Skeletonema costatum</i>)	Pestisitler (örn., DDT)	MP-pestisit kombinasyonu, tek başına pestisitten daha fazla büyüme inhibisyonu ve fotosentetik pigment kaybına neden oldu.	Su ve ark., 2022

Toksikolojik mekanizmalar çok yönlüdür. MP partikülleri, bağırsak epitel bütünlüğüne fiziksel hasar vererek, adsorbe edilmiş kirleticilerin daha kolay doku içine sızmasına zemin hazırlayabilir (potansiyasyon). Ayrıca, MP'lerin neden olduğu oksidatif stres veya enerji metabolizmasındaki değişiklikler, organizmayı eş zamanlı olarak maruz kaldığı kimyasal kirleticilerin toksik etkilerine karşı daha savunmasız hale getirebilir. Örneğin, bir kirleticinin detoksifikasyonu için gerekli olan sitokrom P450 enzim sisteminin MP'ler tarafından baskılanması, kirleticinin etkinliğini artırabilir (Menendez-Pedriz ve ark., 2022).

4.2.3. Trofik Transfer ve Biyomagnifikasyon Potansiyeli

Truva atı etkisinin en kaygı verici yönlerinden biri, besin ağı boyunca taşınma ve biyomagnifikasyon (besin zincirinde yükseldikçe konsantrasyonun artması) potansiyelidir. MP'ler, zooplankton gibi düşük trofik seviyeli

organizmalar tarafından kolayca yutulur (Botterell ve ark., 2019). Bu organizmalar daha sonra balık, kuş veya deniz memelileri gibi yırtıcılar tarafından tüketildiğinde, MP'ler ve onlarla ilişkili kirleticiler bir üst trofik seviyeye transfer edilebilir (Farrell ve Nelson, 2013). Bu süreç, “**vektörün kendisinin trofik transferi**” olarak tanımlanabilir.

Kirleticilerin biyobirikimi açısından, MP kaynaklı Truva atı etkisi özellikle endişe vericidir. Çünkü MP'ler, kirleticileri çevresel sudan çok daha yüksek konsantrasyonlarda taşıyabilir (Teuten ve ark., 2009). Bir organizma, kirleticiyi MP'ler aracılığıyla, sudan doğrudan alım yoluyla olduğundan çok daha verimli bir şekilde alabilir. Bu “yoğunlaştırılmış doz”, trofik seviyeler arasında aktarıldığında, geleneksel biyomagnifikasyon modellerinin öngördüğünden daha hızlı ve daha yüksek kirletici konsantrasyonlarının üst trofik seviyelere ulaşmasına neden olabilir (Barrick ve ark., 2021).

Ancak, bu etkinin her zaman ve her koşulda baskın olmadığına dair eleştirel bakışlar da mevcuttur. Wang ve ark., (2020), yaptıkları kapsamlı derlemede, Truva atı etkisinin öneminin, kirleticinin türüne, MP'nin polimerine ve yaşına, maruziyet süresine ve organizmanın farklı kirletici kaynaklarına (su, sediment, doğal diyet) göreli maruziyetine bağlı olarak değişebileceğini vurgulamıştır. Bazı senaryolarda, MP'lerden kirletici alımı, diyet veya solungaç yoluyla doğrudan alıma kıyasla marjinal kalabilir. Bu nedenle, risk değerlendirmeleri bu karmaşıklığı dikkate alan modeller gerektirir (Koelmans ve ark., 2016).

4.2.4. Özel Bir Durum: Antifouling Boya Kökenli Mikroplastikler

Geleneksel plastik atıklardan kaynaklanan MP'lerin yanı sıra, özel bir Truva atı tehlikesi antifouling (yüzey kirleşmesini önleyici) boya ların aşınması sonucu oluşan MP'lerden gelmektedir (Tablo 16). Bu partiküller, yalnızca fiziksel varlıklarıyla değil, içerdikleri yüksek konsantrasyondaki biyosidal ajanlar (örneğin, bakır oksit, çinko pirit, organotin kalıntıları) nedeniyle de risk oluşturur (Turner, 2020). Romeo ve ark., (2015), Malta'daki bir liman sedimanında yüksek düzeyde MP kirliliği tespit etmiş ve bu MP'lerin aynı zamanda Pb, Cu, Zn ve organotin bileşikleriyle yoğun şekilde kontamine olduğunu bulmuştur. Bu boyalardan kaynaklanan MP'ler, doğrudan su kolonuna veya sedimanta karışarak, içerdikleri toksik metalleri

zamanla salabilir (leaching) veya sedimentle beslenen organizmalar tarafından doğrudan yutulabilir (Ytreberg ve ark., 2021). Bu durumda, MP partikülü hem kirleticinin kendisi (boya matrisi) hem de yüksek konsantrasyonda kirletici taşıyan bir “**Süper Truva Atı**” işlevi görür. Bu tür MP’lerin etkileri, yalnızca partikül sayısına değil, aynı zamanda taşıdıkları spesifik toksik yüke de bağlıdır (Turner, 2021).

Tablo 16. Boya kaynaklı mikroplastiklerle ilişkili başlıca toksik bileşenler

Bileşen sınıfı	Özel örnekler	Ana toksik etkiler	Çevresel kaygı
Ağır Metaller	Bakır oksit (Cu ₂ O), Çinko piriyon (ZnPT)	Nörotoksisite, büyüme inhibisyonu, enzim inhibisyonu.	Sedimentte uzun süre kalıcılık, bentik organizmalarda birikim.
Organometalikler	Tribütülin (TBT), Bakır piriyon	İmposex (kabuklularda), immünotoksisite, yüksek toksisite.	Çok düşük konsantrasyonlarda bile etkili, uzun süreli ekosistem etkileri.
Organik Biyosidal	Diuron, Irgarol	Fotosentez inhibisyonu (alglerde), endokrin bozucu potansiyel.	Su kolonunda mobilite, non-hedef organizmalara etki.
İnert Pigment/Taşıyıcı	Çinko oksit, Demir oksit, Plastik polimer	Fiziksel partikül etkileri, diğer kirleticiler için adsorpsiyon yüzeyi.	MP kirliliğinin kendisi, vektör kapasitesini artırıcı rol.

4.2.5. “Truva Atı” Etkisinin Denizel Organizmalar ve Ekosistemler Üzerindeki Sonuçları

MP’lerin taşıdığı kirletici yük, organizmalarda tek başına MP veya kirletici maruziyetine kıyasla daha şiddetli ve karmaşık etkilere yol açabilir. Bu etkileşimler toplamsal, sinerjistik, potansiyasyon veya antagonistik olabilir (Bhagat ve ark., 2021). Truva atı etkisi aşağıdaki yollarla ekosistem seviyesinde sonuçlar doğurur:

Artan biyoyararlanım ve biyobirikim: MP’ler aracılığıyla alınan kirleticiler, genellikle sudan doğrudan alıma kıyasla daha yüksek bir emilim oranına sahip olabilir. Örneğin, midyelerde PCB ile kirlenmiş MP’lerin yutulması, aynı PCB’lerin sudan alımına göre daha yüksek doku konsantrasyonlarına ve daha belirgin toksik etkilere (örn., oksidatif stres, genotoksisite) yol açmıştır (Avio ve ark., 2015). Bu, MP’lerin kirleticiler için bir "konsantrasyon ve teslimat aracı" görevi gördüğünü gösterir.

Trofik transfer ve biyomagnifikasyon: MP’ler ve üzerlerindeki kirletici yük, besin zinciri içinde aktarılabilir. Fitoplankton ve zooplankton

gibi düşük trofik seviyeli organizmalar MP'leri yutar (Botterell ve ark., 2019). Bu organizmalar daha sonra balık, kabuklu deniz ürünleri gibi yırtıcılar tarafından tüketildiğinde, MP'ler ve ilişkili kirleticiler bir üst trofik seviyeye transfer olur (Farrell ve Nelson, 2013). Kirleticiler yağ dokuda birikme eğiliminde olduğundan, bu trofik transfer süreci biyomagnifikasyona (besin zinciri boyunca konsantrasyonda artış) yol açabilir (Barrick ve ark., 2021). Örneğin, PCB'ler ile kirlenmiş MP'leri yutan planktonlarla beslenen balıkların dokularında bu kirleticilerin biriktiği gösterilmiştir.

Kombine toksisite ve sinerjistik etkiler: Truva atı etkisinin en tehlikeli yönü, MP'nin fiziksel stresi (ör. bağırsak tıkanıklığı, iltihaplanma, enerji dengesinde bozulma) ile salınan kirleticilerin kimyasal stresinin birleşerek sinerjistik etkiler yaratabilmesidir. Örneğin, PE MP'leri ve cıva (Hg) ile tek başına maruziyete kıyasla birlikte maruz kalan balıklarda, daha yüksek oksidatif stres, nörotoksisite ve davranış değişiklikleri gözlenmiştir (Su ve ark., 2022). Benzer şekilde, boya kaynaklı MP'ler, sadece fiziksel partikül olarak değil, aynı zamanda bakır, çinko veya organotin gibi toksik metalleri ve biyosidler salarak ekotoksikolojik riski katlayabilir (Turner, 2020). Bu kombinasyon, organizmanın detoksifikasyon ve onarım mekanizmalarını aşarak, büyüme, üreme, bağışıklık fonksiyonu ve hayatta kalma üzerinde ciddi baskılar oluşturabilir (Menendez-Pedriz ve ark., 2022).

Popülasyon ve ekosistem seviyesindeki etkiler: Bireysel organizmalardaki bu olumsuz etkiler, zamanla popülasyon dinamiğini (büyüme, ölüm oranları, üreme başarısı) etkileyebilir. Özellikle hassas türlerde veya kritik yaşam evrelerinde (larval dönem) görülen etkiler, besin ağı yapısını bozabilir. Örneğin, fitoplankton üzerindeki kombine toksisite, birincil üretimi azaltarak tüm ekosistemin enerji akışını etkileyebilir. Ayrıca, sedimanter ortamda biriken ve kirletici yüklü MP'ler, sedimentle beslenen organizmalar (bentik faunanın önemli bir kısmı) için sürekli bir kirletici kaynağı haline gelerek bentik-pelajik bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir (Briain ve ark., 2020).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu kapsamlı derleme, mikroplastik kirliliğinin denizel ekosistemler için çok boyutlu, derinlemesine nüfuz eden ve giderek büyüyen bir küresel tehdit olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Etkiler, bireysel organizmaların

fizyolojisi, davranışı ve üreme başarısından başlayarak, popülasyonların sürdürülebilirliğini, toplulukların yapısını ve nihayetinde ekosistemlerin temel işlevlerini ve insanlığa sağladığı hayati ekosistem hizmetleri tehlikeye atmaktadır. **Ana Bulguların Sentezi;**

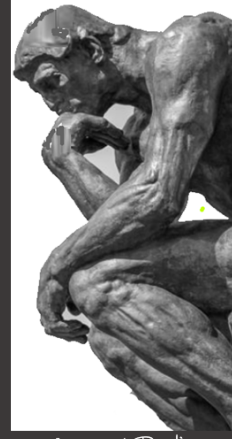
- **Ekolojik kaskad/tepkime etkisi:** Setälä ve ark., (2014) ve Galloway ve ark., (2017) gibi etkin araştırmalar; MP etkilerin, birey → popülasyon → topluluk → ekosistem hiyerarşisinde üst seviyeye doğru yayılan bir kaskad etkisi oluşturduğunu ve alt seviyelerdeki bozulmalar, üst seviyelerde beklenenden daha büyük ve karmaşık sonuçlara yol açabildiğini belirtmektedir.
- **Trofik magnifikasyon riski:** Yüksek trofik seviyelerdeki organizmaların daha şiddetli etkilenme eğilimi, MP'lerin ve özellikle taşıdıkları kirleticilerin besin zincirinde birikme (biyomagnifikasyon) potansiyelini işaret etmektedir. Bu durum, deniz memelileri, büyük balıklar ve insanlar gibi zincirin en üstündekiler için özel bir risk oluşturur (Rochman ve ark., 2013; Wright ve ark., 2013).
- **Fonksiyonel grupların hassasiyeti:** Filtre ederek beslenenler (çift kabuklular), sedimentle beslenenler ve birincil üreticiler gibi belirli fonksiyonel gruplar, yüksek maruziyet oranları nedeniyle öncelikli risk altındadır. Bu grupların ekosistem işlevlerindeki (su filtrasyonu, besin döngüsü, birincil üretim) rolleri göz önüne alındığında, MP kirliliğinin ekosistem işleyişi üzerindeki dolaylı etkileri doğrudan etkilerden daha yıkıcı olabilir (Browne ve ark., 2011).
- **İkili Tehdit: “fiziksel + kimyasal”:** MP'ler sadece fiziksel bir engel olarak değil, aynı zamanda toksik kimyasallar için bir "Truva Atı" işlevi görerek etki eder. Bu ikili mekanizma, risk değerlendirmelerini karmaşıktırmakta ve geleneksel tek kirletici yaklaşımlarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu durum mikroplastik kirliliğini daha da tehlikeli ve büyüüğünü öngörülemez kılmaktadır (Rochman ve ark., 2013; Wright ve ark., 2013; Galloway ve ark., 2017).

Mikroplastik kirliliği, denizel biyoçeşitliliğin ve ekosistem sağlığının sürdürülebilirliği önünde ciddi bir engeldir. Sorunun çözümü, ancak bilimsel araştırmalar, yenilikçi teknolojiler, güçlü ve uygulanabilir politikalar ile toplumsal farkındalık ve davranış değişikliğini içeren bütünleşik ve küresel ölçekte bir yaklaşımla mümkün olacaktır. Bu derlemenin bulguları,

denizlerimizi ve biyoçeşitliliğini koruma çabaların aciliyetini ve önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Denizlerimizin sayısız ekosistem hizmetleri ve doğal sermayesi tam olarak tüketilmeden; bilimsel araştırmalar yoğunlaştırılmalı, etkili izleme programları oluşturulmalı bunlarla birlikte eş zamanlı mikroplastik emisyonlarını kaynağında azaltmaya yönelik politikalara ve uygulamalara acilen gidilmesi gerekmektedir. Özellikle **4R** kuralı (tek kullanımlık plastikleri **reddet/ ¹Refuse**, kullanımı **azalt/ ²Reduce**, **tekrar kullan/ ³Reuse**, **geri dönüştür/ ⁴Recycle**) tüm kurumlar ve kamuoyunca rutin uygulamalara dönüştürülmelidir. Birçok uluslararası (UNEP, UNESCO, FAO, OECD, US EPA, EC, G20, WB, WWF, GP, ...) ve ulusal (ilgili Bakanlıklar, TEMA, TURMAPA, ÇEVKO, ...) kurum ve kuruluşlar 4R'nin yaygınlaşması için çalışmalar yaparken; pratikte önemli gelişmeler ne yazıkki hayatiyet bulamamaktadır.

Plastik malzemenin yalnızca küçük bir yüzdesi geri dönüştürülmekte ve büyük bir kısmı ciddi bir denetim olmaksızın doğaya salınmakta, hatta yasa dışı olarak atılmakta veya gömülmektedir (Lackner ve Branka, 2024). Bu sorunun üstesinden gelmek için; disiplinler arası işbirlikleri, çevre bilimi, toksikoloji, malzeme bilimi ve sosyoekonomik alanlarından uzmanlığı birleştirmek ve mikroplastiklerin ekosistemler, hayvanlar ve insan sağlığı üzerindeki daha geniş etkilerini anlamak için teşvik edilmelidir. Lackner ve Branka, 2024)' ün de belirttiği üzere; uluslararası işbirliği ve ortaklık, mikroplastik kirliliğini ele almakta son derece önemlidir. Hükümetlerin, STK'ların, endüstri paydaşlarının ve bilim topluluklarının, mikroplastik emisyonlarını azaltmak ve çevresel etkilerini küresel ölçekte hafifletmek için etkili stratejiler geliştirmek ve uygulamak üzere birlikte çalışması gereklidir.

Öz ve son söz: Türünün bilimsel isim anlamı "düşünen ve bilge insan" olan *Homo sapiens*, üzerine düşen sorumluluğu yerine getirmeli ve isimsel onurunu korumalıdır. Aksi halde evrilme ve yaşam kaynağımız denizlerin "ekolojik hasarı", iklim krizinin de çarpan etkisiyle; güncel *Homo sapiens sapiens*e tanık ve sanık olarak feci afetler yaşatacaktır. Yükü, masum diğer canlıların günahları olan "Nuh'un Gemisi" ise; son yolculuğu için yelkenlerini kasırgalarla doldurup, dümenini "altınca kitlesel yok oluşa" kıracak, muhtemelen meçhul rotasına son kez akacaktır (E.Buhan, 2025).



August Rodin
(1840-1917)'in
"düşünen adam"
tasviri

KAYNAKÇA

- Abreu, A., & Pedrotti, M. I. (2019). Microplastics in the oceans: The solutions lie on land. *Field Actions Science Reports*, (Özel Sayı 19), 62–67.
- Alfaro-Núñez, A., Astorga, D., Cáceres-Farías, L., Bastidas, L., Villegas, C. S., Mora, J. R., ... & Olea, A. (2021). Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *Scientific Reports*, 11(1), 6424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3>
- Amelia, T. S. M., Khalik, W. M. A. W. M., Ong, M. C., & Shao, Y. Y. (2021). Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4>
- Anastasopoulou, A., & Fortibuoni, T. (2019). Impact of plastic pollution on marine life in the Mediterranean Sea. In F. Stock, G. Reifferscheid, N. Brennholt, & E. Kostianaia (Eds.), *Plastics in the aquatic environment-part I: current status and challenges* (pp. 135–196). Springer.
- Andrady, A. L. (2015). Persistence of plastic litter in the oceans. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter* (pp. 57-72). Springer.
- Arnold, S. J. (1983). Morphology, performance and fitness. *American Zoologist*, 23(2), 347–361. <https://doi.org/10.1093/icb/23.2.347>
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176.
- Avio, C. G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2015). Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research*, 111, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>
- Barboza, L. G. A., Lopes, C., Oliveira, P., Bessa, F., Otero, V., Henriques, B., Raimundo, J., Caetano, M., Vale, C., & Guilhermino, L. (2020). Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its

- potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Science of The Total Environment*, 717, 134625.
- Barrett, J., Chase, Z., Zhang, J., Holl, M. M. B., Willis, K., Williams, A., Hardesty, B. D., & Wilcox, C. (2020). Microplastic pollution in deep-sea sediments from the Great Australian Bight. *Frontiers in Marine Science*, 7, 576170. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576170>
- Barrick, A., Champeau, O., Chatel, A., Manier, N., Northcott, G., & Tremblay, L. A. (2021). Plastic additives: Challenges in ecotox hazard assessment. *PeerJ*, 9, e11300.
- Beiras, R., & Tato, T. (2019). Microplastics do not increase toxicity of a hydrophobic organic chemical to marine plankton. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.029>
- Berlino, M., Mangano, M. C., De Vittor, C., & Sarà, G. (2021). Effects of microplastics on the functional traits of aquatic benthic organisms: A global-scale meta-analysis. *Environmental Pollution*, 285, 117174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117174>
- Berlino, M., Sarà, G., & Mangano, M. C. (2023). Functional Trait-Based Evidence of Microplastic Effects on Aquatic Species. *Biology*, 12(6), 811. <https://doi.org/10.3390/biology12060811>
- Bertucci, J. I., & Bellas, J. (2021). Combined effect of microplastics and global warming factors on early growth and development of the sea urchin (*Paracentrotus lividus*). *Science of the Total Environment*, 782, 146888. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146888>
- Bhagat, J., Zang, L., Nishimura, N., & Shimada, Y. (2021). Zebrafish: An emerging model to study microplastic and nanoplastic toxicity. *Science of The Total Environment*, 728, 138707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138707>
- Bhuyan, M. S. (2022). Effects of microplastics on fish and in human health. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 827289. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
- Borah, S. J., Gupta, A. K., Gupta, A., & Bisht, N. S. (2023). Grasping the supremacy of microplastic in the environment to understand its implications and eradication: A review. *Journal of Materials Science*, 58(34), 12899–12928. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08806-8>

- Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Cole, M., Hopkins, F. E., Steinke, M., & ...et al. (2020). Bioavailability of Microplastics to Marine Zooplankton: Effect of Shape and Infochemicals. *Environmental Science & Technology*, 54(19), 12024–12033. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02715>
- Botterell, Z. L., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2019). Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: a review. *Environmental Pollution*, 245, 98–110.
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Cacador, I., & Canning-Clode, J. (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189–195.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: Sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Browne, M. A., Niven, S. J., Galloway, T. S., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2013). Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity. *Current Biology*, 23(23), 2388–2392.
- Bucci, K., Tulio, M., & Rochman, C. M. (2020). What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review. *Ecological Applications*, 30(2), e02044. <https://doi.org/10.1002/eap.2044>
- Campos, D., Rodrigues, A. C., Rocha, R. J., Martins, R., Candeias-Mendes, A., Castanho, S., & diğ. (2021). Are microplastics impairing marine fish larviculture?—Preliminary results with *Argyrosomus regius*. *Water*, 13(1), 104. <https://doi.org/10.3390/w13010104>
- Cao, Y., Zhao, M., Ma, X., Song, Y., Zuo, S., Li, H., & Deng, W. (2021). A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans. *Science of The Total Environment*, 788, 147620.
- Chae, Y., Kim, D., Choi, M.-J., Cho, Y., & An, Y.-J. (2019). Impact of nano-sized plastic on the nutritional value and gut microbiota of whiteleg

- shrimp *Litopenaeus vannamei* via dietary exposure. *Environment International*, 130, 104848.
- Chatterjee, S., & Sharma, S. (2019). Microplastics in our oceans and marine health. *Field Actions Science Reports*, Special Issue 19, 54–61.
- Chatterjee, S., & Sharma, S. (2022). Microplastics in marine ecosystems: Sources, effects, and mitigation strategies. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 10(4), 244–246. <https://doi.org/10.22271/fish.2022.v10.i4c.2984>
- Cholewiński, P., Moniuszko, H., Wojnarowski, K., Pokorny, P., Szeligowska, N., Dobicki, W., & diğ. (2022). The occurrence of microplastics and the formation of biofilms by pathogenic and opportunistic bacteria as threats in aquaculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8137. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138137>
- Cole, M. (2013). Microplastic swallowing zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Cole, M., & Galloway, T. S. (2015). Ingestion of nanoplastics and microplastics by Pacific oyster larvae. *Environmental Science & Technology*, 49 (24), 14625–14632. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04099>
- Cole, M., Lindeque, P. K., Fileman, E., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2015). The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*. *Environmental Science & Technology*, 49(2), 1130–1137. <https://doi.org/10.1021/es504525u>
- Cormier, B., Cachot, J., Blanc, M., Cabar, M., Cifrandeau, C., Dubocq, F., ... & et al. (2022). Environmental microplastics disrupt swimming activity in acute exposure in *Danio rerio* larvae and reduce growth and reproduction success in chronic exposure in *D. rerio* and *Oryzias melastigma*. *Environmental Pollution*, 308, 119721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119721>
- Coyle, R., Hardiman, G., & Driscoll, K. O. (2020). Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and*

- Environmental Engineering, 2.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100010>.
- Da Costa Araújo, A. P., De Andrade Vieira, J. E., & Malafaia, G. (2020). Toxicity and trophic transfer of polyethylene microplastics from *Poecilia reticulata* to *Danio rerio*. *Science of the Total Environment*, 742, 140217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140217>
- Desforjes, J. P. W., Galbraith, M., & Ross, P. S. (2015). Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(3), 320–330.
- Devi, A., De Silva, Y. S. K., Tyagi, L., & Aaryashree. (2025). The Individual and Combined Effects of Microplastics and Heavy Metals on Marine Organisms. *Microplastics*, 4(3), 38. <https://doi.org/10.3390/microplastics4030038>
- Di Renzo, L., Mascilongo, G., Berti, M., Bogdanović, T., Listes, E., Brkljača, M., ... Di Giacinto, F. (2021). Potential impact of microplastics and additives on the health status of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) stranded along the Central Adriatic Coast. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232 (8), Article 339. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05276-z>
- Not: APA formatında, ilk 6 yazar belirtilir, eğer daha fazla varsa yedinci yazardan sonra "... (üç nokta) konur ve son yazar eklenir. Yukarıdaki kayıt, orijinal makaledeki tüm yazarları göstermek için genişletilmiş olup, standart APA kuralı (ilk 6 yazar + ... + son yazar) şu şekilde olacaktır: Di Renzo, L., Mascilongo, G., Berti, M., Bogdanović, T., Listes, E., Brkljača, M., ... Di Giacinto, F.
- Dong, J., Li, L., Liu, Q., Yang, M., Gao, Z., ...& et al. (2022). Interactive effects of polymethyl methacrylate (PMMA) microplastics and salinity variation on a marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Chemosphere*, 289, 133240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133240>
- Dong, Y., Smith, J. A., & García, R. L. (2024). Physiological responses of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) to thermal stress. *Journal of Marine Biology*, 121 (3), 455-467.
- Duan, Z., Chen, Y., Dou, Y., Fan, H., Wang, J., Cong, J., & diğ. (2024). Plastic food? Energy compensation of zebrafish (*Danio rerio*) after

- long-term exposure to polylactide and biotic microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133604.
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2.
- Duncan, E. M., Broderick, A. C., Fuller, W. J., Galloway, T. S., Godfrey, M. H., Hamann, M., Limpus, C. J., Lindeque, P. K., Mayes, A. G., Omeyer, L. C. M., Santillo, D., Snape, R. T. E., & Godley, B. J. (2019). Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology*, 25(2), 744–752.
- Eerkes, M. H., Gerdts, G., Janssen, F., & Koelmans, A. A. (2019). Microplastics in freshwaters: A review of the occurrence, fate, and effects. *Science of The Total Environment*, 654, 839–857.
- European Commission. (2021). A European strategy for plastics in a circular economy. https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en
- Falkenhaus, T. N. (2024). Effects of microplastic mixture on hatching, mortality and morphometry in early life-stages of Atlantic cod [Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology].
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution*, 177, 1–3.
- Ferrante, M., Zuccarello, P., Allegui, C., Fiore, M., Cristaldi, A., Pulvirenti, E., Favara, C., Copat, C., Grasso, A., Missawi, O., & Orecchio, S. (2022). Microplastics in fillets of Mediterranean seafood. A risk assessment study. *Environmental Research*, 204, 112247.
- Gardon, T., Reisser, C., Soye, C., Quillien, V., & Le Moullac, G. (2018). Microplastics affect energy balance and gametogenesis in the pearl oyster *Pinctada margaritifera*. *Environmental Science & Technology*, 52 (9), 5277–5286. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00168>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) (2016). Sources, fate and effects of

- microplastics in the marine environment: part two of a global assessment. (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds.). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/ UNDP. Rep. Stud. GESAMP No. 93, 220 p.
- Godoy, V., Martín-Lara, M. A., Calero, M., & Blázquez, G. (2019). The relevance of interaction of chemicals/pollutants with microplastic in the marine environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.11.041>.
- Goldstein, M. C., Rosenberg, M., & Cheng, L. (2012). Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect. *Biology Letters*, 8(5), 817–820.
- Gonzalez, J. A., Hsiung, A. R., Nowak, E., Lange, D., Craig, S. E., Parker, C. G., & diğ. (2021). Impact of bisphenol-A and synthetic estradiol on brain, behavior, gonads and sex hormones in a sexually labile coral reef fish. *Hormones and Behavior*, 136, 105043. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2021.105043>
- Gonzalez-Ortegón, E., Demmer, J., Robins, P., & Jenkins, S. (2024). Floating plastics as a potential dispersal vector for rafting marine non-native species. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116919>
- Gouin, T., Roche, N., Lohmann, R., & Hodges, G. (2011). A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1466–1472.
- Guo, J., Huang, X., Xiang, L., Wang, Y., Li, Y., Li, H., ... & Mo, C. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263.
- Guo, X., Liu, Y., & Wang, J. (2019b). Sorption of sulfamethazine onto different types of microplastics: A combined experimental and molecular dynamics simulation study. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.070>
- Haave, M., Gomiero, A., Schönheit, J., Nilsen, H., & Olsen, A. B. (2021). Documentation of microplastics in tissues of wild coastal animals. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 31.

- Harlacher, J. M., Emmons, C., Hanson, B., Olsen, D., Matkin, C., Phan, S., & diğ. (2023). Evidence of microplastics in marine top predators: microplastic particles isolated from the feces of fish-eating Killer Whales. Available at SSRN 4364184. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4364184>
- Hein, L., Remme, R. P., Schenau, S., Bogaart, P. W., Lof, M. E., & Horlings, E. (2020). Ecosystem accounting in the Netherlands. *Ecosystem Services*, 44, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101118>
- Herrera, A., Acosta-Dacal, A., Luzardo, O. P., Martínez, I., Rapp, J., Reinold, S., & diğ. (2022). Bioaccumulation of additives and chemical contaminants from environmental microplastics in European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Science of the Total Environment*, 822, 153396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153396>
- Hu, K., Zhou, P., Yang, Y., Hall, T., Nie, G., Yao, Y., Duan, X., Wang, S., & Sun, H. (2022). Degradation of microplastics by a thermal Fenton reaction. *ACS ES&T Engineering*, 2(1), 110–120. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00323>
- Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L., ... & ... (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124399. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399>
- Jacobsen, J. K., Massey, L., & Gulland, F. (2010). Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Marine Pollution Bulletin*, 60(5), 765–767. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.008>
- Jiang, Y., Yang, F., Zhao, Y., & Wang, J. (2020). Greenland Sea gyre increases microplastic pollution in the surface waters of the Nordic seas. *Science of The Total Environment*, 712, 136484.
- Jin, Y., Liu, Z., Peng, T., & Fu, Z. (2015). The toxicity of chlorpyrifos on the early life stage of zebrafish: A survey on the endpoints at development, locomotor behavior, oxidative stress and immunotoxicity. *Fish & Shellfish Immunology*, 43(2), 405–414.
- Justino, A. K., Ferreira, C. V., Fauvelle, V., Schmidt, N., Lenoble, V., Pelage, L., & diğ. (2023). From prey to predators: evidence of microplastic trophic transfer in tuna and large pelagic species in the southwestern

- Tropical Atlantic. *Environmental Pollution*, 327, 121532. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121532>
- Kang, H., Park, S., Lee, B., Ahn, J., & Kim, S. (2020). Modification of a Nile red staining method for microplastics analysis: A Nile red plate method. *Water*, 12(12), 3251.
- Kangas, A., Setälä, O., Kauppi, L., & Lehtiniemi, M. (2023). Trophic transfer increases the exposure to microplastics in littoral predators. *Marine Pollution Bulletin*, 196, 115553. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115553>
- Kannan, G., Mghili, B., Di Martino, E., Sanchez-Vidal, A., & Figuerola, B. (2023). Increasing risk of invasions by organisms on marine debris in the Southeast coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 195, 115496. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115496>
- Karak, P., Parveen, A., Modak, A., Adhikari, A., & Chakraborty, S. (2025). Microplastic Pollution: A Global Environmental Crisis Impacting Marine Life, Human Health, and Potential Innovative Sustainable Solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(6), 889. <https://doi.org/10.3390/ijerph22060889>
- Kelly, R., Elsler, L. G., Polejack, A., van der Linden, S., T'onnnesson, K., Schoedinger, S. E., Santoro, F., Pecl, G. T., Palmgren, M., Mariani, P., Glithero, D., Evans, K., Cvitanovic, C., Cook, J., Bartram, J., & Wisz, M. S. (2022). Empowering young people with climate and ocean science: Five strategies for adults to consider. *One Earth*, 5 (8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.007>
- Kim, K., Yoon, H., Choi, J. S., Yang, Y. J., & Park, J.-W. (2022). Chronic effects of nano and microplastics on reproduction and development of marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113962>
- Klein, S., Worch, E., & Knepper, T. P. (2015). Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany. *Environmental Science & Technology*, 49(10), 6070–6076.
- Kochanek, A., Grąż, K., Potok, H., Gronba-Chył, A., Kwaśny, J., Wiewiórska, I., Ciula, J., Basta, E., & Łapiński, J. (2025). Micro- and Nanoplastics in the Environment: Current State of Research, Sources of

- Origin, Health Risks, and Regulations—A Comprehensive Review. *Toxics*, 13(7), 564. <https://doi.org/10.3390/toxics13070564>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3315–3326.
- Koongolla, J. B., Lin, L., Yang, C. P., Pan, Y. F., Li, H. X., ...& et al. (2022). Microplastic prevalence in marine fish from onshore Beibu Gulf, South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 964461. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.964461>
- Kreitsberg, R., Randus, K., Kristoffersen, M., Heinlaan, M., Ward, R., Visnapuu, M., & diğ. (2021). Seagrass beds reveal high abundance of microplastic in sediments: a case study in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112417. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112417>
- Kvale, K., Prowe, A. E. F., Chien, C. T., Landolfi, A., & Oschlies, A. (2021). Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen. *Nature Communications*, 12(1), 2358. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22554-w>
- Lackner, M., & Branka, M. (2024). Microplastics in Farmed Animals, A Review. *Microplastics*, 3(4), 559-588. <https://doi.org/10.3390/microplastics3040035>
- Laist, D. W. (1997). Impacts of marine debris: Entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In J. M. Coe & D. B. Rogers (Eds.), *Marine Debris: Sources, Impacts, Solutions* (pp. 99–139). Springer-Verlag.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8(1), 4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W.J.G.M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., & Zhang, Y. (2020b). Effective uptake of submicrometre

- plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 3, 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>
- Li, X., Li, Y., Zhang, Q., Wei, P., Zhang, T., & Wang, Y. (2022). Combined effects of primary microplastics and other pollutants on nutritional efficiency in aquatic organisms: A comparative study with secondary microplastics. *Environmental Pollution*, 306, 119457.
- Li, Y., Sun, Y., Li, J., Tang, R., Miu, Y., & Ma, X. (2021). Research on the Influence of Microplastics on Marine Life. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 631(1), 012006.
- Li, Y., Wang, J., Yang, G., Lu, L., Zheng, Y., Zhang, Q., ...& et al. (2020a). Low level of polystyrene microplastics decreases early developmental toxicity of phenanthrene on marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121586. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121586>
- Liang, W. J., Li, J., Jong, M. C., Ma, C., Zuo, C., Chen, Q., & diğ. (2023). Process-oriented impacts of microplastic fibers on behavior and histology of fish. *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130856. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130856>
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., ... & Ren, H. (2016). Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 4054–4060.
- Mahamud, A. G. M. S. U., Anu, M. S., Baroi, A., Datta, A., Khan, M. S. U., Rahman, M., Tabassum, T., Tanwi, J. T., & Rahman, T. (2022). Microplastics in fishmeal: A threatening issue for sustainable aquaculture and human health. *Aquaculture Reports*, 25, 101205. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101205>
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science & Technology*, 35(2), 318–324
- Mazur, A. A., Chelomin, V. P., Zhuravel, E. V., Kukla, S. P., Slobodskova, V. V., & Dovzhenko, N. V. (2021). Genotoxicity of polystyrene (PS) microspheres in short-term exposure to gametes of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864) (Echinodermata, Echinoidea).

- Journal of Marine Science and Engineering, 9(10), 1088.
<https://doi.org/10.3390/jmse9101088>
- McMullen, K., Vargas, F. H., Gabela, P., Alvarado-Cadena, O., Pakhomov, E. A., & Alava, J. J. (2024). Modeling microplastic bioaccumulation and biomagnification potential in the Galápagos penguin ecosystem using Ecopath and Ecosim (EwE) with Ecotracer. *PLOS ONE*, 19 (1), e0296788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296788>
- Meaza, I., Toyoda, J. H., & Wise Sr, J. P. (2021). Microplastics in sea turtles, marine mammals and humans: A one environmental health perspective. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 298.
- Menendez-Pedriz, A., Jaumot, J., & Barceló, D. (2022). Interaction of microplastics with heavy metals in aquatic environments: A review. *Science of the Total Environment*, 825, 154068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154068>
- Mottola, F., Caramanite, M., Barretta, A., Palmieri, I., & Rocco, L. (2024). Reproductive cytotoxic and genotoxic impact of polystyrene microplastics on *Paracentrotus lividus* spermatozoa. *Current Research in Toxicology*, 6, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2024.100173>
- Mountford, A. S., and Morales Maqueda, M. A. (2021). Modeling the accumulation and transport of microplastics by sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2), e2020JC016826.
- Nagar, N., Saxena, H., Pathak, A., Mishra, A., & Poluri, K. M. (2023). A review on structural mechanisms of protein-persistent organic pollutant (POP) interactions. *Chemosphere*, 332, 138877. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138877>
- Navarro, A., Luzardo, O. P., Gómez, M., Acosta-Dacal, A., Martinez, I., ...& et al. (2023). Microplastics ingestion and chemical pollutants in seabirds of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 186, 114434. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114434>
- Nelms, S. E., Galloway, T. S., Godley, B. J., Jarvis, D. S., & Lindeque, P. K. (2018). Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, 238, 999–1007.
- Niemcharoen, S., Thaotumpitak, T., Palle, D., & Chanuse, N. (2022). Microplastic-contaminated feed interferes with antioxidant enzyme and lysozyme gene expression of Pacific white shrimp (*Litopenaeus*

- vannamei) leading to hepatopancreas damage and increased mortality. *Animals*, 12 (23), 3308. <https://doi.org/10.3390/ani12233308>
- NOC / National Oceanography Centre. (2021). Sources, amounts & pathways of plastics entering the global ocean. <https://noc.ac.uk/files/documents/science/report-plastics-entering-the-global-ocean-noci-december-2021.pdf>
- Noren, F., & Naustvoll, F. (2010). Survey of microscopic anthropogenic particles in Skagerrak. Commissioned by KLIMA- OG FORURENSNINGSDIREKTORATET, Norway.
- Ogunola, O. S., & Palanisami, T. (2016). Microplastics in the marine environment: Current status, assessment methodologies, impacts and solutions. *Journal of Pollution Effects & Control*, 4(161), 2.
- Park, B., Kim, S. K., Joo, S., Kim, J. S., Jo, K., ...& et al. (2023). Microplastics in large marine animals stranded in the Republic of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 189, 114734. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114734>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P., & Wilke, T. (2018). Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution*, 237, 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Rial, D., Bellas, J., Vidal-Liñán, L., Santos-Echeandía, J., Campillo, J. A., León, V. M., & diğ. (2023). Microplastics increase the toxicity of mercury, chlorpyrifos and fluoranthene to mussel and sea urchin embryos. *Environmental Pollution*, 336, 122410. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122410>
- Rochman, C. M., Hoh, E. M., Kurobe, T., & Teh, Y. A. (2013). Ingested plastic debris causes physical harm to marine fish. *Environmental Science & Technology*, 47(11), 6170–6176.
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A., & Wilcox, C. (2020). Disentangling the influence of taxa, behaviour and debris ingestion on seabird mortality. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124071. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcebe>
- Roman, L., Schuyler, Q., Wilcox, C., & Hardesty, B. D. (2021). Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality? *Conservation Letters*, 14 (2), e12781. <https://doi.org/10.1111/conl.12781>

- Romdhani, I., De Marco, G., Cappello, T., Ibala, S., Zitouni, N., Boughattas, I., & diğ. (2022). Impact of environmental microplastics alone and mixed with Benzo[a]pyrene on cellular and molecular responses of *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Hazardous Materials*, 435, 128952. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128952>
- Romdhani, I., Venditti, M., Gallo, A., Abelouah, M. R., Gaaied, S., Boni, R., & diğ. (2024). Environmental microplastics compromise reproduction of the marine invertebrate *Mytilus galloprovincialis*: a holistic approach. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136219. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136219>
- Romeo, T., Pietro, B., Pedà, C., Consoli, P., Andaloro, F., & Fossi, M. C. (2015). First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 358-361. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.048>.
- Salerno, M., Berlino, M., Mangano, M. C., & Sarà, G. (2021). Microplastics and the functional traits of fishes: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 27(12), 2645–2655. <https://doi.org/10.1111/gcb.15570>
- Santos, R. G., Andrades, R., Demetrio, G. R., Kuwai, G. M., Sobral, M. F., De Souza Vieira, J., & diğ. (2020). Exploring plastic-induced satiety in foraging green turtles. *Environmental Pollution*, 265, 114918. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114918>
- Sarasamma, S., Audira, G., Siregar, P., Malhotra, N., Lai, Y.-H., Liang, S.-T., & diğ. (2020). Nanoplastics cause neurobehavioral impairments, reproductive and oxidative damages, and biomarker responses in zebrafish: throwing up alarms of wide spread health risk of exposure. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (4), 1410. <https://doi.org/10.3390/ijms21041410>
- Savinelli, B., Fernández, T. V., Galasso, N. M., D’Anna, G., Pipitone, C., Prada, F., & diğ. (2020). Microplastics impair the feeding performance of a Mediterranean habitat-forming coral. *Marine Environmental Research*, 155, 104887. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104887>
- Schür, C., Rist, S., Baun, A., Mayer, P., Hartmann, N. B., & Wagner, M. (2019). When fluorescence is not a particle: the tissue translocation of microplastics in *Daphnia magna* seems an artifact. *Environmental*

- Toxicology and Chemistry, 38(7), 1495–1503.
<https://doi.org/10.1002/etc.4436>
- Seeley, M. E., Hale, R. C., Zwollo, P., Vogelbein, W., Verry, G., & Wargo, A. R. (2023). Microplastics exacerbate virus-mediated mortality in fish. *Science of the Total Environment*, 866, 161191.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161191>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, 185, 77–83.
- Sfriso, A. A., Tomio, Y., Rosso, B., Gambaro, A., Sfriso, A., Corami, F., & diğ. (2020). Microplastic accumulation in benthic invertebrates in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Environment International*, 137, 105587. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105587>
- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. (2018). Marine microplastics: abundance, distribution, and composition. In M. Zeng (Ed.), *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* (pp. 1–26). Elsevier.
- Shore, E. A., DeMayo, J. A., & Pespeni, M. H. (2021). Microplastics reduce net population growth and fecal pellet sinking rates for the marine copepod, *Acartia tonsa*. *Environmental Pollution*, 284, 117379.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117379>
- Sibly, R. M., Brown, J. H., & Kodric-Brown, A. (2012). *Metabolic ecology: A scaling approach*. John Wiley & Sons.
- Siettmann, A., Bryan, A., Iken, K., Olnes, J., & Horstmann, L. (2025). Microplastics in marked seal stomachs from the Bering and Chukchi seas in 2012 and 2020. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117770.
- Soares, M. G., Warren, T. M., Giarrizzo, T., Martinelli Filho, J. E., Tavares, T. C., Ziveri, P., & diğ. (2023). Marine debris provide long-distance pathways for spreading invasive corals. *Science of the Total Environment*, 900, 165637.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165637>
- Su, Y., Qi, H., Hou, Y., Gao, M., Li, J., ...& et al. (2022). Combined Effects of Microplastics and Benzo[a]pyrene on the Marine Diatom *Chaetoceros muelleri*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 779321.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.779321>

- Subias-Baratau, A., Sanchez-Vidal, A., Di Martino, E., & Figueroa, B. (2022). Marine biofouling organisms on beached, buoyant and benthic plastic debris in the Catalan Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113405. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113405>
- Sui, Y., Xue, Z., Chen, S., Jiang, H., Zhou, Y., Nguyen, H., & diğ. (2023). Investigation of physiological energetic response of the thick shell mussel, *Mytilus coruscus*, to microplastics and low salinity: potential countermeasures to multi-environmental changes. *Aquaculture*, 569, 739382. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739382>
- Susanti, N., Mardiasuti, A., & Haryadi, S. (2022). Microplastics in digestive system of little-black cormorant (*Phalacrocorax sulcirostris*) in Pulau Rambut Sanctuary. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 950 (1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012003>
- Tahir, A., Samawi, M., Sari, K., Hidayat, R., Nimzet, R., Wicaksono, E., & diğ. (2019). Studies on microplastic contamination in seagrass beds at Spermonde Archipelago of Makassar Strait, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341 (2), 022008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/2/022008>
- Tan, F., Yang, H., Xu, X., Fang, Z., Xu, H., Shi, Q., & diğ. (2020). Microplastic pollution around remote uninhabited coral reefs of Nansha Islands, South China Sea. *Science of the Total Environment*, 725, 138383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138383>
- Tang, W., Li, H., Fei, L., Wei, B., Zhou, T., & Zhang, H. (2022). The removal of microplastics from water by coagulation: a comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 851, 158224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158224>
- Tang, Y., Rong, J., Guan, X., Zha, S., Shi, W., Han, Y., Du, X., Wu, F., Huang, W., & Liu, G. (2020). Immunotoxicity of microplastics and two persistent organic pollutants alone or in combination to a bivalve species. *Environmental Pollution*, 258, 113845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113845>
- Teuten, E. L., Rowland, S. J., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2007). Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environmental Science & Technology*, 41(22), 7759–7764.

- Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709.
- Timilsina, A., Adhikari, K., Yadav, A. K., Joshi, P., Ramena, G., & Bohara, K. (2023). Effects of microplastics and nanoplastics in shrimp: mechanisms of plastic particle and contaminant distribution and subsequent effects after uptake. *Science of the Total Environment*, 894, 164999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164999>
- Trestrail, C., Nugegoda, D., & Shimeta, J. (2020). Invertebrate responses to microplastic ingestion: reviewing the role of the antioxidant system. *Science of the Total Environment*, 734, 138559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138559>
- Turner, A. (2021). Trace elements and particles in antifouling paints. *Marine Pollution Bulletin*, 173(Part A), 112940. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112940>.
- Turner, A., Holmes, L., Thompson, R. C., & Fisher, A. (2020). Metals and marine microplastics: Adsorption from the environment versus addition during manufacture, exemplified with lead. *Water Research*, 173, 115577. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115577>
- United Nations Environment Programme. (2021). From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. UNEP. <https://malaysia.un.org/en/171922-pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
- UNEP- United Nations Environment Programme (2022). End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument (Draft resolution). <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/3852>
- Unsworth, R. K., Higgs, A., Walter, B., Cullen-Unsworth, L. C., Inman, I., & Jones, B. L. (2021). Canopy accumulations: are seagrass meadows a sink of microplastics? *Oceans*, 2 (1), 162–178.
- Vazirzadeh, A., Ergun, S., Mossafa, H., Farhadi, A., Keshavarzifard, M., Yigit, M., ...& et al. (2025). Microplastics contamination suppressed immune and health status in cage cultured Barramundi: An investigation on pollution sources, ecotoxicological impacts, and transcription of genes involved in detoxification. *Aquaculture*, 594, 741370. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741370>

- Vroom, R. J. E., Koelmans, A. A., Besseling, E., & Halsband, C. (2017). Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton. *Environmental Pollution*, 231, 987-996.
- Wang, F., Wong, C. S., Chen, D., Lu, X., Wang, F., & Zeng, E. Y. (2020a). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, 54 (16), 10347–10386.
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020b). Occurrence and distribution of microplastics in domestic, industrial, agricultural and aquacultural wastewater sources: A case study in China. *Science of The Total Environment*, 727, 138659.
- Wang, S., Chen, H., Zhou, X., Tian, Y., Lin, C., Wang, W., Zhou, K., Zhang, Y., & Lin, H. (2020). Microplastic abundance, distribution and composition in the mid-west Pacific Ocean. *Environmental Pollution*, 264, 114125.
- Wang, S., Chen, H., Zhou, X., Tian, Y., Lin, C., Wang, W., Zhou, K., Zhang, Y., & Lin, H. (2020). Microplastic abundance, distribution and composition in the mid-west Pacific Ocean. *Environmental Pollution*, 264, 114125.
- Wang, S., Wang, Y., Liang, Y., Cao, W., Sun, C., & et al. (2020). The interactions between microplastic polyvinyl chloride and marine diatoms: Physiological, morphological, and growth effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111000>
- Wang, T., Hu, M., Xu, G., Shi, H., Leung, J. Y., & Wang, Y. (2021). Microplastic accumulation via trophic transfer: can a predatory crab counter the adverse effects of microplastics by body defence? *Science of the Total Environment*, 754, 142099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142099>
- Wang, W., Gao, H., Jin, S., Li, R., & Na, G. (2019). The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 110–117.
- Wang, X., Liu, L., Zheng, H., Wang, M., Fu, Y., Luo, X., & diğ. (2020). Polystyrene microplastics impaired the feeding and swimming behavior

- of mysid shrimp *Neomysis japonica*. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110660. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110660>
- Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Airborne microplastics: A review on the occurrence, migration and risks to humans. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 657–664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- Watts, A. J., Urbina, M. A., Corr, S., Lewis, C., & Galloway, T. S. (2015). Ingestion of plastic microfibers by the crab *Carcinus maenas* and its effect on food consumption and energy balance. *Environmental Science & Technology*, 49 (24), 14597–14604. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04026>
- Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2016). Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, *Nephrops norvegicus*. *Environmental Pollution*, 218, 895–900. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.020>
- Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L. J., Coppock, R., Sleight, V., ... & Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science*, 1(4), 140317.
- Wootton, N., Reis-Santos, P., Dowsett, N., Turnbull, A., & Gillanders, B. M. (2021). Low abundance of microplastics in commercially caught fish across southern Australia. *Environmental Pollution*, 290, 118030. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118030>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492.
- Yan, L., Yao, X., Wang, P., Zhao, C., Zhang, B., & Qiu, L. (2024). Effect of polypropylene microplastics on virus resistance in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*). *Environmental Pollution*, 342, 123054. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123054>
- Yen, L. P., Yong, C. L. X., & Todd, P. A. (2024). The effect of oral colony morphology, coral surface condition, particle size, and seeding point on the trapping and deposition of microplastics. *Science of the Total Environment*, 921, 171077. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171077>

- Ytreberg, E., Hansson, K., Hermansson, A. L., och Jalkanen, J.-P. (2021). Metal and PAH loads from ships and boats, relative to other sources, in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112879. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112879>.
- Yu, R. S., & Singh, S. (2023). Microplastic pollution: Threats and impacts on global marine ecosystems. *Sustainability*, 15(17), 13252. <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Yuan, J., Yang, J., Xu, X., Wang, Z., Jiang, Z., & Ye, Z. (2023). Bisphenol A (BPA) directly activates the G protein-coupled estrogen receptor 1 and triggers metabolic disruption in the gonadal tissue of *Apostichopus japonicus*. *Biology*, 12(6), 798. <https://doi.org/10.3390/biology12060798>
- Yue, Y., Guo, X., Wang, Z., Gan, L., Dong, X., Zhang, M., et al. (2024). Alleviating effect of EMs on oxidative stress and inflammation of *Micropterus salmoides* after microplastics exposure. *Aquaculture International*, 32 (3), 3719–3732. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01347-6>
- Zhang, J., Li, Z., Liang, J., Liu, G., Luo, Y., & Zhang, Q. (2025). Study on the Mass Concentration Distributions of Marine Microplastics in Estuaries and Coastal Areas. *Water*, 17(8), 1136.
- Zhang, X., Wen, K., Ding, D., Liu, J., Lei, Z., Chen, H., Hu, X., Li, Y., Wang, X., & Wang, J. (2021). Size-dependent adverse effects of microplastics on intestinal microbiota and metabolic homeostasis in the marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Environment International*, 151, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106452>
- Zhang, Y., Zhang, D., & Zhang, Z. (2023). A critical review on artificial intelligence—based microplastics imaging technology: Recent advances, hot-spots and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1150. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021150>
- Zheng, Y., Li, J., Cao, W., Liu, X., Jiang, F., Ding, J., & Sun, C. (2019). Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: a case study in Jiaozhou Bay, China. *Science of The Total Environment*, 674, 27–35.

- Zimmermann, L., Bartosova, Z., Braun, K., Oehlmann, J., Völker, C., & Wagner, M. (2021). Plastic products leach chemicals that induce in vitro toxicity under realistic use conditions. *Environmental Science & Technology*, 55 (17), 11814–11823. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01103>
- Zitouni, N., Cappello, T., Missawi, O., Boughattas, I., de Marco, G., Belbekhouche, S., Mokni, M., Alphonse, V., Guerbej, H., Bousserhine, N., & Banni, M. (2022). Metabolomic disorders unveil hepatotoxicity of environmental microplastics in wild fish *Serranus scriba* (Linnaeus 1758). *Science of The Total Environment*, 838, 155872.

BÖLÜM 2

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KAYNAKLARI

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18047835>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Tokat, Türkiye.
nihat.yesilayer@gop.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6995-5855

Kısaltmalar: AN, akrilonitril; BPA, Bisfenol A; CCD sensörü, yük-bağlantılı cihaz sensörü; COD, kimyasal oksijen ihtiyacı; DEHP, dietilheksil ftalat; EPDM, propilen - etilen propilen dien monomer; EPS, genleştirilmiş polistiren; EVA, etilen-vinil asetat; HDPE, yüksek yoğunluklu polietilen; HOC'ler, hidrofobik organik kirleticiler; LDPE, düşük yoğunluklu polietilen; Mt, milyon ton; MP, mikroplastik; NY, naylon; PA, poliamid; PAH'ler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar; PAN, poliakrilonitril; PCB, poliklorlu bifeniller; PE, polietilen; PE-PP, poli(etilen:propilen:dien); PES, polietersülfon; PET, polietilen tereftalat; PEVA, polietilen-vinil asetat; POM, polioksimetilen; PP, polipropilen; PP:PE, poli (propilen-etilen) kopolimer; PS, polistiren; PSA, poli (stiren ko-akrilonitril); PU, polieter ürethan; PVC, polivinil klorür; ROS, reaktif oksijen türleri; RY, suni ipek; SAR, sentetik açıklıklı radar; UV, ultraviyole ışın.

GİRİŞ

Plastik üretiminin 1950'lerde başlayan endüstriyel serüveni, Dünyada 8.3 milyar tonluk bir üretim hacmini ortaya çıkartmıştır. Yapılan tahminler üretilen bu plastiğin 6.3 milyar tonunun çöp haline geldiğini ortaya koymaktadır. Dünya genelinde plastik atıkların %79'unun çevreye salındığı, %12'sinin yakıldığı ve yalnızca %9'unun geri dönüştürüldüğü tahmin edilmektedir (Geyer ve ark., 2017; Chen ve ark., 2021). Bu hızla devam edildiği takdirde 2050 yılında, çöp depolama alanlarına gönderilen plastik çöp miktarının 12 milyar tona ulaşacağı da tahmin edilmektedir. Karasal ortamda üretilen bu çöplerin her yıl 4.8 ila 12 milyon tonunun okyanuslara çeşitli yollarla karıştığı birçok çalışma ile ortaya konulmuştur. Bu durum beraberinde ciddi ekolojik sorunların doğmasına neden olmuştur (Lusher ve ark., 2017).

Plastik sektörü, Türkiye ekonomisinin en önemli parçalarından biridir. Yılda 10 milyon ton civarında gerçekleşen toplam üretimi, 45 milyar dolar civarındaki cirosu, doğrudan ve dolaylı toplam 15 milyar dolar ihracatı ve son 10 senede GSMH büyümesini aşan yıllık büyüme ile plastik sektörünün ülke ekonomisine sağladığı katkı giderek artıyor. Plastik sektörü, üretim kapasitesi bakımından Avrupa'da ikinciliğe, dünyada ise altıncılığa yükselmiştir (Anonim, 2024).

İnsan yaşamında plastiğin her alanda kullanımı, dünya genelinde önemli miktarda mikroplastik kirliliğine yol açmıştır. Bu olumsuz durum, plastiğin yaygın doğası ve sürekli ekolojik etkisi nedeniyle dünya genelinde istenmeyen durumlar yaratmıştır. Aquatic ekosistemlerinde, mikroplastikler su canlıları tarafından yem gibi algınarak yutulmakta, büyüme ve gelişmelerini etkilemekte ve besin zincirindeki daha yüksek organizmalara trofik transfere neden olmaktadır (Chen ve ark., 2021; Wu ve ark., 2023). Bu nedenle, su ürünleri tüketimi, insanların mikroplastiklere maruz kalmasının başlıca birincil kaynağıdır. Mikroplastikler, düzenli veya düzensiz şekillere sahip sentetik katı parçacıklar veya polimerik matrislerdir (Frias ve Nash, 2019) ve genellikle 5 mm'den küçük plastikleri ifade eder (Wu ve ark., 2023). Plastik ürünlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu boyut aralığında kasıtlı olarak üretilen birincil mikroplastikler ve plastik içeren maddelerin parçalanması veya aşınması yoluyla oluşan ikincil mikroplastikler çevreye yaygın olarak dağılmaktadır (GESAMP, 2015). Mikroplastikler çeşitli yollarla su ürünleri yetiştirme ortamlarına sokulabilir (Chen ve ark., 2021; Liu ve ark., 2019).

2022 küresel su ürünleri üretiminin ilk işlenmemiş satış değerinin 452 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmektedir; bunun 157 milyar ABD doları avcılık, 296 milyar ABD doları ise su ürünleri yetiştiriciliği için ayrılmıştır. Son zamanlarda, su ürünleri yetiştiriciliği üretimi 1990 larda 21, 8 milyon tondan 2022 yılı sonunda 94,4 milyon tona ulaşarak 30 yılda % 433 ün üzerinde bir artış ile en fazla büyüyen gıda sektörü olmuştur. Bu yetiştiricilikteki büyüme miktarı avcılıkla elde edilen (91 milyon ton) su ürünleri üretimini 2022 yılında 3,4 milyon tonu aşarak tarihte ilk kez geçmiştir (FAO, 2024). İnsan gıda tedarikinde önemli bir protein kaynağı oluşturdukları için, mikroplastiklerle kirlenmiş su ürünleri yetiştiriciliği, gıda kalitesini ve güvenliğini doğrudan etkiler. Su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarındaki mikroplastikler çoğunlukla karadan gelen plastik atık ve döküntüler, turizm, nakliye taşımacılığı ve atmosferik birikim gibi dışsal ithalatlardan gelmektedir. Ayrıca, plastik ekipman ve gereçlerin, su ürünleri yetiştiriciliği yemi ve sağlık ürünlerinin ve özel su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarının kullanımı, mikroplastiklerin daha fazla birikmesine katkıda bulunmaktadır (Chen ve ark., 2021).

Plastik ürünlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu boyut aralığında kasıtlı olarak üretilen birincil mikroplastikler ve plastik içeren maddelerin parçalanması veya aşınması yoluyla oluşan ikincil mikroplastikler çevreye yaygın olarak dağılmaktadır (Wu ve ark., 2023). Mikroplastik kirliliği küresel çapta endişe yaratan bir çevre sorunu haline geldikçe, su ürünleri yetiştiriciliğindeki mikroplastikler de bir araştırma konusu haline almıştır. Çevresel güvenlik, ekonomik verimlilik ve gıda güvenliği hususları açısından, su ürünleri yetiştiriciliğindeki mikroplastik kirliliğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Sucul ekosistemlerde, mikroplastikler aquatik canlılar tarafından yutulmakta, büyüme ve gelişmelerini vb. etkilenmekte ve besin zincirindeki daha yüksek organizmalara trofik transfere neden olmaktadır (Ali ve ark., 2024)

Mikroplastikler çeşitli yollarla su ürünleri yetiştirme ortamlarında yer almaktadırlar (Chen vd., 2021; Liu vd., 2019). Birçok çalışmanın sonucunda fazla sayıda su ürünleri yetiştiriciliği ortamında mikroplastik birikimi görülmüştür (Ali ve ark., 2024; Miao ve ark., 2023; Wu ve ark., 2023). Bu mikroplastikler su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde birikebilir. Örneğin, balıkçılık pazarındaki ticari çift kabuklu yumuşakçalarda mikroplastikler bulundu, 4,3 ila 57,2 adet/birey aralığında (Li ve ark., 2015). Mikroplastikler,

su ürünleri yetiştiriciliği ortamında zararlı katkı maddeleri salabilir ve kirleticileri adsorbe edebilir, su ürünleri yetiştiriciliği ortamının bozulmasına ve toksikolojik etkilere neden olmaktadır (Wu ve ark., 2023). Klor içeren mikroplastikler (örneğin PVC), ayrışma sürecinde suya HCl salarak su ürünleri yetiştiriciliği ortamının asitlenmesine neden olabilir (Gewert vd., 2015). Mikroplastiklerdeki bisfenol (BPA) ve ftalatlar gibi çeşitli organik katkı maddeleri, suya sızdıklarında endokrin bozucular olarak organizmalar için tehdit oluşturur. Ayrıca, mikroplastikler su ürünleri yetiştiriciliği ortamında biriktikten sonra doğal çevreye salınabilir ve ardından kirlilik yayılımına neden olabilir. İkinci olarak, mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerine su ortamı yoluyla girdiği ve çok sayıda olumsuz etkiye sahip olduğu artık bilinmektedir. Örneğin, mikroplastikler Japon medakasının büyüme hızını yavaşlatabilir ve DNA hasarına neden olabilir (Pannetier vd., 2020), *Oreochromis niloticus*'un kimyasal kirleticilere karşı emilim verimliliğini artırabilir (Wu ve ark., 2023), bağışıklık tepkisini uyarabilir, antioksidan savunmaları tetikleyebilir ve melez yılanbaşının bağırsak villuslarını kısaltabilir (Zhang ve ark., 2022).

Mikroplastikler ve mikroplastikle ilgili katkı maddeleri ayrıca su ürünleri ürünlerinin bağışıklık sistemini etkileyebilir ve nörotoksisite üreterek su ürünleri kalitesini düşürebilir (Tang ve ark., 2022; Wu ve ark., 2023). Mikroplastiklerin kültür balık toplulukları üzerindeki etkileri oksidatif stres, embriyotoksisite, immünotoksisite ve histopatolojik değişiklikleri kapsar (Iheanacho ve ark., 2023). Su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin davranışını, büyümesini ve üremesini etkileyebilir ve sonuç olarak su ürünleri yetiştiriciliğinin ekonomik faydalarını azaltabilir (Wu ve ark., 2023). Mikroplastikler, yetiştiricilik ürünlerinde organik katkı maddeleri ve antibiyotikler vb. organik kirleticilerin birikmesini teşvik etme kapasitesine sahiptir ve sonuç olarak insanlar için oluşturdukları sağlık tehditlerini artırır (Wu vd., 2023).

Birkaç araştırma, çeşitli kültür balık türlerinin dokularında ve biyolojik sistemlerinde mikroplastiklerin biyolojik birikimini kanıtlamıştır. Su ekosistemlerinde, suda yaşayan hayvanlar tarafından mikroplastiklerin tüketimi, gelişimlerini ve büyümelerini etkiler ve besin zincirinde/ağında daha yüksek seviyelere trofik transferine yol açar (Chen ve ark., 2021). Sonuç olarak, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin yutulması, insanlar için mikroplastiklerle

ilgili kritik bir maruziyet kaynağı görevi görür (Le ve ark., 2024). Dünya genelinde insanların kişi başına haftada ortalama 0,1–5 g mikroplastik tükettiğini bildirmişlerdir (Senathirajah ve ark.,2021).

Bu bölüm, Sucul ortamlardaki mikroplastiklerin kaynaklarının tespiti, su ürünleri yetiştiricilik ürünleri ve ekosistemlerindeki mikroplastiklerin kaynaklarını ve mevcut dağılımlarını içermektedir.

1. SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ORTAMLARINDAKİ MİKROPLASTİKLER

Mikroplastikler, birçok ticari balık da dahil olmak üzere 100'den fazla su ürünleri canlı türde tespit edilmiştir ve bu durum insanlarda ciddi gıda güvenliği endişelerine yol açmıştır (Lusher vd., 2017; Chen ve ark., 2021). Sonuç olarak, küresel su ortamlarındaki mikroplastiklerle ilgili yayınlanan araştırmalar hızla artmaktadır. Mikroplastikler okyanuslarda, kıyılarda, nehirlerde ve göllerde tespit edilmiştir. Örneğin tatlı ve tuzlu su ortamlarında yaşayan planktondan yüksek yapılı balıkların tamamında yani trofik seviyenin her kademesinde rastlanılmıştır.

Yapılan araştırmalar, yıkama başına yaklaşık 1900 lifin evsel atık suya karıştığını ve bunların tatlı su ortamlarına karışabileceğini tahmin etmektedir (Browne ve ark., 2011). Peletler veya mikro boncuklar çoğunlukla kişisel bakım ürünlerinde (diş macunu, yüz peelingleri ve cilt temizleyicileri), ev temizlik ürünlerinde ve tıbbi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan birincil mikroplastiklerden kaynaklanır; ambalaj malzemelerinde ve balıkçılık araçlarında yaygın olarak kullanılan köpük de su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında mikroplastiklerin bir kaynağıdır. Ayrıca, su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarındaki parçalar, filmler ve granüller, plastik poşetler, şişeler, kaplar, tarım filmleri, balıkçılık malzemeleri vb. gibi plastik ürünlerin bozulmasından kaynaklanmaktadır (Shim ve ark., 2018; Chen ve ark., 2021). Kimyasal bileşim açısından, bu çalışmalarda tespit edilen mikroplastikler polipropilen (PP) ve polietilen (PE), yüksek üretimleri ve geniş uygulama alanları nedeniyle. PP ve PE üretimi, 2018'de gıda ambalajları, plastik poşetler, şişeler, kaplar, borular, otomotiv parçaları, tarımsal film, ev eşyaları vb. dahil olmak üzere küresel plastik ürünlerinin %49'unu oluştuyordu (Plasticseurope, 2023).

Araştırmacılar, su ürünleri yetiştirme ortamlarındaki mikroplastik konsantrasyonunun, hızla genişleyen su ürünleri yetiştirme faaliyetleri

nedeniyle genellikle çevredeki ortamlardan daha yüksek olduğunu göstermektedir (Chen ve ark., 2018; Priscilla ve Patria, 2019). Mikroplastikler, plastik balıkçılık araçlarının yanı sıra balık yemi ve ilaçlar yoluyla su ürünleri yetiştirme ortamlarına salınabilir (Zhou ve ark., 2020). Ayrıca coğrafya ve hava durumu, su ürünleri yetiştirme ortamlarında mikroplastik birikimini ve dağılımını etkiler (Chen ve ark., 2018; Wang ve ark., 2019). Su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerindeki mikroplastik bolluğu genellikle doğadaki su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinden daha yüksektir. Örneğin, bir çalışmada, kültür midyelerindeki mikroplastik bolluğunun yabani midyelere göre 1,4-1,7 kat daha fazla olduğu tespit etmişlerdir (Mathalon ve Hill, 2014). Yetiştirilen çipura balıkları üzerinde yapılan çalışmalar, balıklar kafeslerine yerleştirildikten sonra mikroplastik alımının hızla arttığını göstermiştir (Capo ve ark., 2022). Su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerindeki mikroplastiklerin özelliklerinin ve karakteristiklerinin su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki mikroplastiklerle yüksek oranda ilişkili olduğunu göstermektedir. Örneğin, su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında yaygın olarak bulunan lif mikroplastikleri su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde de bulunmaktadır (Zhang ve ark., 2020; Wu ve ark., 2023).

Çin’de yapılan bir çalışmada, kültüre alınan ekonomik çift kabuklu yumuşakçalarda mikroplastik kirlilik iç su kültür ortamında MP bolluğunun deniz ortamından 2,5 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. MP tehlike indeksi, iç, kıyı ve deniz su kültürü türlerinin yüzey sularında sırasıyla, 655, 390 ve 23 olarak bulunmuştur. İç moddaki çift kabuklu deniz hayvanlarındaki MP bolluğu, diğer iki moddakinden önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur (Song ve ark., 2023).

Deniz canlılarının çeşitli dokularındaki mikroplastik dağılım desenleri hakkında sınırlı veri bulunmaktadır. Deniz suyundaki mikroplastikler ve üç farklı kıyı bölgesi su ürünleri yetiştiriciliği alanından Zhikong deniz tarağına (*Chlamys farreri*) ait dokuz tür doku analizi yapıldı. Sonuçlar, deniz suyundaki mikroplastiklerin çoğunlukla lifli olduğunu gösterdi. Üç alan arasında mikroplastik bolluğu açısından önemli bir fark yoktu. Deniz tarağı anüsünde, bağırsak kanalında ve böbrekte mikroplastik konsantrasyonları diğer dokulardakinden önemli ölçüde daha yüksekti. Mikroplastik bolluğu, deniz tarağı başına 8 ila 13 parçacık arasında değişiyordu. Mikroplastiklerin renkleri çoğunlukla siyah, şeffaf ve maviydi (Sui ve ark., 2020).

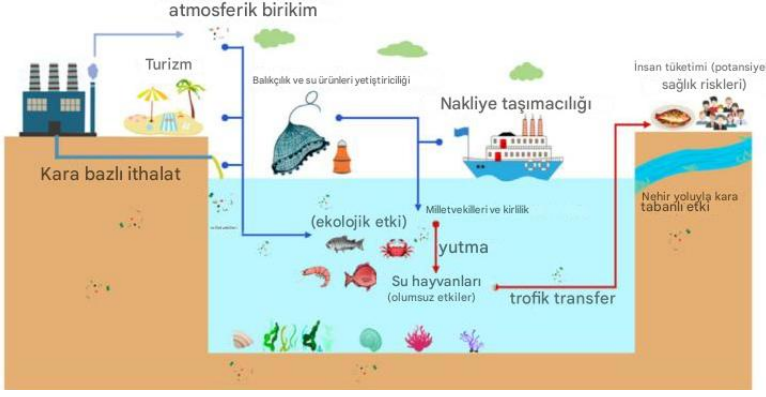
Meksika'da Kaliforniya Körfezi ekolojik bölgesinde ticari su ürünleri yetiştirme tesislerinden elde edilen beyaz bacaklı karides'nin (*Litopenaeus vannamei*) gastrointestinal sisteminde (GT), solungaçlarında (GI) ve dış iskeletinde (EX) MP'lere ilişkin ilk çalışmayı ticari yarı yoğun karides havuzlarında yetiştirilen *Litopenaeus vannamei*'nin dokularında; doku başına MP ögesinin sayısının GT'de 7,6, GI'de 6,3 ve EX'de 4,3 olduğunu, karides başına ortalama 18,5 MP adet tespit etmişlerdir (Valencia-Castañeda ve ark., 2022).

2. SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ORTAMLARINDA MİKROPLASTİKLERİN KAYNAĞI

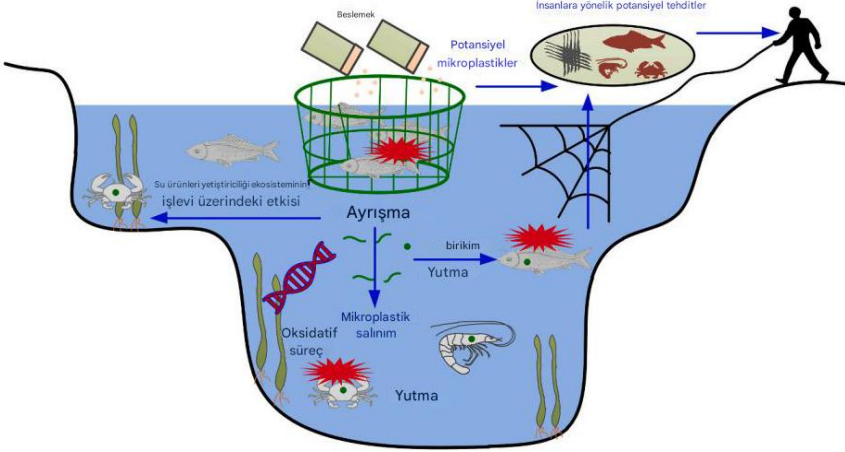
Su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarındaki MP'ler çoğunlukla Şekil 1 A ve B de görüldüğü üzere; 1) Karasal kaynaklı plastik atıklardan 2) Dünya deniz nakliye taşımacılığı ve turizmden kaynaklanan plastik atıkların bertarafından, 3) nakliye taşımacılığından, 4) balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliğinden, 5) atmosferik birikim ve taşınımından kaynaklanmaktadır.

Karasal plastik atıklar, su ortamındaki mikroplastiklerin ana kaynağıdır. Endüstriyel, tarımsal ve evsel atık sular, sucul ortamlarda mikroplastiklerin önemli bir katkısı olan mikroplastikler içerir. Örneğin, ortalama 6 kg'lık bir akrilik kumaş yıkama yükünden 700.000'den fazla lif üretilebilir ve duşta vücut peelingi kullanmak 100.000 mikroplastik boncuğunun atık su sistemine akmasına neden olabilir (Chen ve ark., 2021). Atık sularındaki mikroplastik bolluğu, atık su arıtma tesislerinde arıtıldıktan sonra aşırı bir şekilde azalmasına rağmen, Atık su arıtma tesislerinden deşarj edilen atık sular sucul ortam için hala ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Liu ve ark., 2019). Benzin, dizel ve diğer yakıtlara kalitelerini artırmak ve iyileştirmek için büyük miktarlarda birincil mikroplastik eklenmektedir. Nakliye süreci sırasında plastik parçacıkların eksik yanması atmosfere ve su ortamlarına salınmaktadır (Gasperi vd., 2018).

A



B



Şekil 1. Su ürünleri yetiştiriciliği sistemlerinde MP'lerin kaynakları (A – B)

Turizmin gelişmesi de plastik atıkların su ortamlarına yayılmasına katkıda bulunmuştur (Zhou vd., 2020). Plastik poşetler, maden suyu şişeleri ve gıda ambalaj poşetleri gibi birçok plastik ürün turistler tarafından taşınmakta ve nehirlere, göllere, kıyılara, plajlara ve okyanuslara atılmaktadır (Wang ve ark., 2019). Güneş ışığı, sıcaklık değişiklikleri ve tatlı/deniz suyu erozyonu, bu plastik ürünleri su ortamlarına giren mikroplastiklere ayırır. Deniz taşımacılığı da gemilerden atılan plastik atıklar yoluyla su ortamlarındaki mikroplastik kirliliğine önemli ölçüde artırmaktadır (Wang ve ark., 2019; FAO, 2024). Yapılan araştırmalar, 2005 yılında dünya çapında gemi taşımacılığı sonucunda

yaklaşık 5 milyon ton plastik atığın okyanusu kirlettiğini tahmin etmektedir (Chen ve ark., 2021).

Plastik ürünler, balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Balık ağıları, misinalar, şamandıralar, usturmaçalar, kafesler, kovalar ve diğer ekipmanlar gibi çoğu balıkçılık ekipmanı plastikten yapılmıştır veya plastik bileşenler içerir (Zhou ve ark., 2020). Kullanılıp atıldıkça, bu yapılar çevrelerine mikroplastik salabilirler. Örneğin, bentik tarama ve trol avcılığı faaliyetleri sırasında, balıkçılık halatlarının ve ağlarının aşınması ve yıpranması, deniz balıkçılığı sularındaki mikroplastik içeriğini artırır (FAO, 2024). Ayrıca, balıkçılık ekipmanlarının uzun süreli kullanımı ve yetersiz bakımı nedeniyle, her yıl çok sayıda plastik balıkçılık ekipmanı deniz ortamlarında kaybolmakta ve su ortamlarında ayrışmaya bırakılmaktadır. Uzun süreli suya daldırma, erozyon, aşınma ve çarpışma nedeniyle plastik ekipmanlardan plastik artıklar oluşur ve suda birikir. Ayrıca yemler ve tıbbi ürünler de su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında mikroplastiklere katkıda bulunur (Chen ve ark., 2021). Yapay yemler büyük miktarda mikroplastik içerir, çünkü MP'ler üretim, taşıma, depolama ve besleme sırasında yemlere karıştırılabilir (Zhou vd., 2020). Bu arada, doğal ortamlarda bulunan çok miktarda zooplankton, omurgasızlar, küçük balıklar ve su bitkileri mikroplastik içerir ve yapay yem yapmak için kullanılır veya su ürünleri yetiştiriciliğinde doğrudan doğal gıda olarak kullanılır (FAO, 2024). Su ürünleri yetiştiriciliği yemlerinin yapımında kullanılan yem hammaddelelerinde balık unu gibi trofik transferlerden dolayı ayrıca, hastalıkları tedavi etmek ve önlemek, su ve ürün kalitesini artırmak için kullanılan balık ilaçları, antibiyotikler ve diğer kimyasallar mikroplastiklere bağlanmakta ve bu nedenle su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında mikroplastik kirliliğinin bir farklı kaynaklarıdır (FAO, 2024).

Atmosferde mikroplastikler bulunmuştur ve atmosferde uzun mesafeler boyunca taşınabilmektedir (Allen ve ark., 2019). Yerçekimi ve çeşitli hava koşullarından etkilenen atmosferdeki mikroplastikler kara yüzeylerine ve su ortamlarına birikmektedir. Atmosferik serpinti ve çeşitli hava olayları ve göllerden gelen mikroplastiklerin benzer bozunma desenleri, su ortamındaki bazı mikroplastiklerin atmosferik serpintiden kaynaklanabileceğini göstermektedir ve yapılan çalışmalar atmosferdeki mikroplastiklerin su ekosistemlerinde önemli bir MP kaynağı olduğunu göstermiştir. Artan

kümülatif üretim ve birikim, su ürünleri yetiştirme sistemleri ve su ürünleri yetiştirme ürünlerinin ve gıda zincirleri yoluyla insanların sağlığı için tehlikeli bir tehdit oluşturmaktadır (Dris ve ark., 2015; Chen ve ark., 2021).

2.1. Dış Çevreden (Nehir, Deniz, Kara ve Atmosfer) Gelen Mikroplastikler

Karasal ortamı oluşturan mp kirliliği; nehir kaynaklı mikroplastiklerin endüstriyel atıklar, insan faaliyetleri, kanalizasyon arıtma tesisleri, tarımsal faaliyetler vb. yer alır. Endüstriyel atık su açısından, tekstil atık suyu nehirlerdeki lifli mikroplastiklerin ana kaynağıdır. Çin'in Shaoxing şehrindeki bir tekstil sanayi bölgesinden boşaltılan kanalizasyonda mikroplastikler bulunmuş ve yerel tatlı su ortamı üzerinde etkisi olmuştur, yakındaki su ortamındaki yüzey suyu örneklerindeki mikroplastik bolluğu 2,1-71,0 ürün/L ve tortu örneklerindeki mikroplastik bolluğu 16,7-1323,3 ürün/kg (dw) olarak bulunmuştur (Wu ve ark., 2023).

Ayrıca, otomotiv, ambalaj ve gıda endüstrilerinden kaynaklanan atık sular da belirli miktarda mikroplastik bulunmaktadır. İnsan faaliyetleri de çevreye mikroplastik salmaktadır. Mikroplastikler, kozmetik, diş macunu ve şampuan gibi günlük ihtiyaç maddelerine eklenmektedir (Jiang, 2018). Günlük hayatta sentetik elyaf giysilerin yıkanması da mikroplastiklerin kaynağıdır. İstatistiklere göre, polyester polar kumaşlar tek yıkamada ortalama 7360 elyaf/m²/L dökmektedir. Akrilik, naylon ve diğer malzemelerden üretilen sentetik elyaf giysiler de yıkandıklarında farklı miktarlarda mikroplastik dökmektedir (Carney Almroth ve ark., 2018).

Bu mikroplastikler evsel atık sularla nehre karışacaktır. Yukarıdaki iki tür atık su, nehir boyunca sanayi alanları ve yerleşim alanlarının doğrudan deşarjı yoluyla nehir mikroplastiklerinin noktasal olmayan kaynak kirliliğini oluşturacaktır. Şehirlerden ve büyük sanayi alanlarından gelen atık su ise genellikle kanalizasyon arıtma tesislerinde yoğunlaşmaktadır. Bu da kanalizasyon arıtma tesisinin karmaşık mikroplastik kaynakları toplamasına ve emisyonlarının noktasal kaynağı haline gelmesine yol açmaktadır. Mevcut atık su arıtma sürecinin mikroplastikler üzerinde belirli bir arıtma etkisi olmasına rağmen, büyük miktarda kanalizasyon deşarjı nedeniyle nehirlere giren mikroplastik miktarı hala yüksektir (Sun ve ark., 2019). Avustralya'daki üç atık su arıtma tesisinden çıkan atık su üzerinde yapılan çalışmalar, arıtılmış atık su

ile günlük olarak yaklaşık $22,1 \times 106$ ila 133×106 mikroplastığın deşarj edildiğini göstermektedir. Plastik filmler, boru hatları vb. dahil olmak üzere tarımsal üretimde çok sayıda plastik ürün kullanılmaktadır. Bu plastiklerin aşınması mikroplastiklerin oluşmasına ve bu mikroplastiklerin rüzgâr ve yağmur yoluyla nehirlerle taşınmasına neden olacaktır. Plastik sulama borularının kullanımı ve sonrasında çevreye terk edilmesi, mikroplastiklerin bir kaynağı olarak belirlenmiştir (Wu ve ark., 2023).

Yangtze Nehri havzasında yılda yaklaşık $3,3 \times 105$ ton plastik üretildiği, yaklaşık $1,2 \times 105$ ton plastiğin ise Ganj Nehri havzasında yıllık olarak üretilmektedir. Kıyı boyunca gelişmiş istiridye çiftçiliğinin yapıldığı Dafeng Nehri'ndeki mikroplastik yükü yılda $8,3 \times 108$ parçacıktı. Nehirler tatlı su ve deniz su ürünleri yetiştirme ortamlarıyla yakından bağlantılı olduğundan, nehirlerdeki mikroplastiklerin su ürünleri yetiştirme ortamları üzerinde çok çeşitli etkileri vardır. Çok sayıda çalışma, haliçlerdeki su ürünleri yetiştirme alanlarının ve haliçlere yakın kıyı bölgelerinin mikroplastik kirliliğinin, yerel nehirlerde yüksek miktarda mikroplastik bulunmasıyla ilişkili olduğunu göstermiştir (Lam ve ark., 2022; Wu ve ark., 2023) Bu nedenle, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğinin önemli bir kaynağı olan nehirler ciddiye alınmalıdır.

Küresel denizlerdeki 5,25 trilyon parçacığın %92'sinin mikroplastik olduğu tahmin edilmektedir. Deniz mikroplastik kirliliği deniz su ürünleri yetiştiriciliği için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. İstatistiklere göre, yalnızca 2010 yılında karadan denize 4,8-12,7 milyon ton plastik atık karışmıştır (Jambeck ve ark., 2015). Nehirler tarafından taşınan mikroplastikler denizlerdeki mikroplastiklerin önemli kaynaklarıdır. Nehirlerden her yıl denize 1,15 ila 2,41 milyon ton plastik atığın karıştığı tahmin edilmektedir (Lebreton ve ark., 2017). Denizlere karışan bu plastik atıklar büyük miktarlarda mikroplastik üretimine yol açmıştır. Kıyı bölgelerinde turizm, eğlence ve ticari balıkçılık, nakliye ve denizcilik endüstrisi de denize deşarj edilen büyük miktarda mikroplastik üretmektedir (Cole ve ark., 2011 -1 tr mak.).

Dünya denizcilik sektörünün gelişmesiyle birlikte denizlerdeki mikroplastik kirliliği de artmıştır. Gemi gövdesindeki plastik parçalar, boya aşınması ve gemiye atılan diğer plastik atıklar mikroplastik oluşumuna neden olmaktadır (Food and Nations, 2018). İstatistiklere göre, yolcu gemilerinden

atılan mikroplastik miktarı yılda 100 bin ton olduğunu göstermektedir. Deniz taşımacılığı sektörünün oluşturduğu mikroplastik kirliliği deniz akıntıları aracılığıyla taşınacak ve kıyı su ürünleri yetiştiriciliğini etkileyecektir. İstatistiklere göre, denizlerdeki mikroplastiklerin yaklaşık %15'i kıyı bölgelerinde yüzmektedir ve bu da kıyı su ürünleri yetiştiriciliğinde önemli bir mikroplastik kaynağıdır. Bu durum, Sarı Deniz, Bohai Denizi ve Maowei Denizi'ndeki deniz suyu çiftliklerinden kaynaklanan mikroplastik kirliliğiyle kanıtlanmıştır (Wo ve ark., 2023; Zhu ve ark., 2021).

Ayrıca atmosferik ortamda mikroplastiklerin varlığı tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin atmosferik sedimentasyon yoluyla su ürünleri yetiştirme ortamına girme riski vardır. Araştırmalar, atmosferik serpintideki mikroplastiklerin şehre 175 ila 313 parçacık/m² /gün arasında değiştiğini göstermektedir. Bu yolla su ürünleri yetiştirme ortamına giren mikroplastik sayısı sınırlı olsa da birikimi su ürünleri yetiştiriciliğini de etkileyecektir. Normal atmosferik birikime ek olarak, aşırı hava koşulları da su ürünleri yetiştirme ortamındaki mikroplastiklerin bolluğunu etkiler. Örneğin, tayfun karasal mikroplastikleri göç ettirerek ve su tortularına mikroplastikleri bırakarak su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki mikroplastik varlığını artırabilir (Wang ve ark., 2019; Wu ve ark., 2023). Bir çalışmada, tayfunun Sanggou Körfezi su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki tortulardaki mikroplastik konsantrasyonunu yaklaşık %40 oranında artırdığını bulmuştur (Wang vd., 2019).

2.2. Su Ürünleri Yetiştiriciliği Sırasında Oluşan Mikroplastikler (Plastik Balıkçılık Ekipmanlarının Eskimesi ve Aşınması, Su Ürünleri Yetiştiriciliği Ürünlerinin Beslenmesi ve Paketlenmesi)

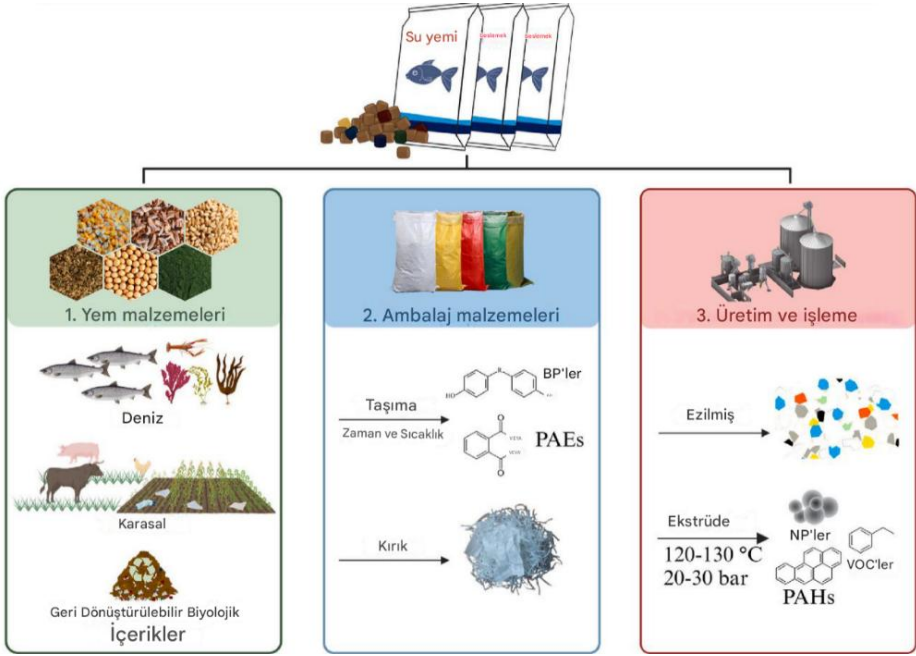
Su ürünleri yetiştiriciliğinde kullanılan balıkçılık araçları, kaçınılmaz olarak su ürünleri yetiştiriciliği ortamına mikroplastikler taşıyacaktır. Uzun süreli suya batırma, erozyon, aşınma ve çarpışma nedeniyle, kafes kültürü ve sal kültürü için kullanılan ağlar, olta ipleri, yüzen toplar ve diğer plastik ürünler mikroplastikler üretebilir (Food and Nations, 2018). Su ürünleri yetiştiriciliğinde yaygın olarak kullanılan bükümlü halat, örgülü halat ve filament, bir metre sahil şeridi başına tahmini 0,78 ila 6,39 cm³ plastik hacmi oluşturabilir ve potansiyel olarak bir metre sahil şeridi başına 300 ila 1277 mikroplastik parçası yayabilir (Wright ve ark., 2021). Çin'in Weihai kentindeki

kıyı deniz su ürünleri yetiştiriciliği üzerine yapılan bir çalışma, deniz ürünleri yetiştiriciliği alanlarındaki mikroplastik konsantrasyonunun 11,49 parçacık/m³ olduğunu, bunun deniz ürünleri yetiştiriciliği yapılmayan diğer alanlardan (1,57 parçacık/m³) çok daha yüksek olduğunu göstermektedir (Wu ve ark., 2023). Bu mikroplastiklerin deniz ürünleri yetiştiriciliği alanlarındaki balık ağları, ipler ve köpükten yüzen toplardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Plastik çitlerin güneş ışığına maruz kalması ve yengeç ve kerevitlerin çitlere tırmanması mikroplastik üretimini teşvik edecektir (Xiong ve ark., 2022). İzopodlar, su ürünleri yetiştiriciliği iskelelerinin altındaki genişmiş polistiren şamandıralara zarar verecek ve bol miktarda mikroplastik parçacığı dışarı atacaktır. Köpükten yapılan istiridye salları da su hareketi ve hava koşullarının etkisiyle mikroplastik üretir (Wu ve ark., 2023).

Şili'de somon yetiştiriciliğinin üretim sürecinde yem torbaları, ipler ve yüzen polimerler kullanılıyor ve bu da deniz su ürünleri yetiştiriciliği ortamına mikroplastiklerin salınmasına neden olabiliyor (Jorquera ve ark., 2022). Aynı zamanda, su ürünleri yetiştiriciliğinde eskiyen balıkçılık ekipmanları da kaybolabilir. Çeşitli nedenlerden dolayı, örneğin dalgalar tarafından sürüklenme veya iplerin parçalanması (Chen ve ark., 2018) vb. balıkçılık araçları su ürünleri yetiştiriciliği alanlarında kontrolsüz bir şekilde ortaya çıkabilir ve su ürünleri yetiştiriciliğinde mikro plastik kirliliğine neden olabilir (Food and Nations, 2018).

2.3. Su Ürünleri Yemlerindeki Mikroplastiklerin Kaynakları

Su yemlerindeki plastik parçacıkların karakterizasyonu ve tanımlanmasına dayanarak, su yemlerinin MP'lerle kontaminasyonu üç ana kaynağa bağlanabilir: yem bileşenleri, ambalaj malzemeleri ve üretim süreçleri (Siddique ve ark., 2023; Muhib ve Rahman, 2023). Su ürünleri yemleri, su ürünleri yetiştiriciliği hayvanlarının ihtiyaçlarını karşılamak üzere çeşitli yem bileşenlerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla formüle edilir (Cotrell ve ark., 2020). Bu yapımla bileşenleri; bitmiş yem haline gelmeden önceki yemin yapımına dahil olan maddeleri ve yem yapım süreçlerini kapsamaktadır. Her bir bileşende mikroplastiklere kontaminasyona açık olabilen yemin içerisindeki yem hammaddeleri (Aquatik ve Karasal kaynaklar), taşıma, paketlenme, üretim ve işletme süreçleri dahil olmak üzere bir dizi işlemde geçtiği Şekil 2 de gösterilmektedir (Su ve ark., 2023).



Şekil 2: Su ürünleri yemlerinde mikroplastığın bulaşma kaynakları (Su ve ark., 2024)

2.3.1. Yem Hammaddeleri

1. Balık unu (FM): 2022'de üretilen toplam 185 milyon ton sucul organizmalar yaklaşık 164,6 milyon tonu (%89'u) insan tüketimine yönelik olup, bu da kişi başına tahmini 20,7 kg'a denk gelmektedir. Kalan 20,8 milyon ton ise ağırlıklı olarak balık unu üretimi için gıda dışı amaçlarla kullanılmıştır (FAO, 2024). IFFO tahminlerine göre, 2021 yılında insanlar tarafından değerlendirilmeyen 20,8 milyon ton sucul canlılar balık unu ve yağı yapımında kullanılmaktadır. Balık ununun %87'sinden fazlası su ürünleri yetiştiriciliğinde, %7'sinden fazlası domuz yetiştiriciliğinde, %4'ü diğer kullanımlar için (çoğunlukla evcil hayvan yemi) ve %1'i kümes hayvancılığında kullanıldı. Aynı yıl, balık yağının yaklaşık %74'ü su ürünleri yetiştiriciliğinde, %16'sı insan tüketiminde ve %10'u diğer kullanımlar (evcil hayvan yemi ve biyoyakıt dahil) için kullanıldı. Dünyada, 2022 yılında 5 milyon ton balık unu üretimi gerçekleşmiştir. Bu üretimin 2022 yılında küresel balık unu üretiminin %34'ü su ürünleri işleme endüstrisinin balık yan ürünlerinden balık unu giderek artan bir kısmı üretilmekte, balık ununa alternatif protein kaynakları üzerine bilim adamlarının çalışmalara yoğunlaşmakta ve böylece atıklar azaltılmakta ve

kaynak değerlendirmesi iyileştirilmektedir (FAO, 2024; Yeşilayer ve ark., 2013).

Su ürünleri yemlerinde geleneksel bir protein kaynağı olan FM, okyanus ve denizlerden yakalanan düşük değerli balıklardan veya balık işleme atıklarından elde edilir (Eroldogan ve ark., 2023). Pelajik balıklarda yaygın olarak bulunan MP'lerin varlığı, su yemlerinin kirlenmesi konusunda endişelere yol açmıştır (Su ve ark., 2023). Sucul ekosistemlerde, mikroplastikler fitoplanktonlara tutunmakta sonrasında zooplankton ve balık larvaları tarafından yem gibi algınarak yutulmakta, büyüme ve gelişmelerini etkilemekte ve besin zincirindeki diğer balıklara trofik transfere neden olmaktadır (Chen ve ark., 2021; Wu ve ark., 2023). Bu trofik transferin sonucunda denizel ortamlarda FM için avlanan balıklarda MP'ler tespit edilmişlerdir. Yapılan çalışmalarda, FM içinde MP'lerin özellikleri ve şekillerin parçaları, filamentler, filmler ve lifler olduğunu ve ana polimerlerin PE, PP, PET ve PS olduğunu tespit edilmiştir. Çalışmalar deniz suyundan MP'leri araştırmış ve karakterizasyon ana şekillerin lifler, filmler, parçalar ve peletler olduğunu, ana polimer bileşenlerinin ise suni ipek, PP, PET ve PE olduğunu ortaya koymuştur (Ye ve ark., 2023). Deniz suyundaki ve FM'deki MP'lerin benzer özellikleri ve polimer bileşimi, FM'nin deniz MP'lerinin iletilmesinin önemli yollarından biri ve su yemlerindeki MP kirliliğinin ana kaynağı olduğunu doğrulamaktadır (Su ve ark., 2024).

Balık unu ve karides unu, esas olarak doğadan yakalanmış balık ve karideslerden elde edilen, su ürünleri yetiştiriciliğinde yüksek proteinli yem bileşenleridir. Mikroplastik kirliliğinin yaygın varlığı nedeniyle, kirlenmiş yem olarak doğadan avlanılan balık ve karides, besleme işlemi sırasında su ürünleri yetiştiriciliği ortamına mikroplastik taşıyacaktır (Su ve ark., 2024). İtalya'dan gelen balık ununda yaklaşık 50-100 mg/kg polistiren, 50-100 mg/kg yüksek oksitlenmiş poli-olefinler ve 12,9 mg/kg polyester bulunmuştur (Castelvetto ve ark., 2021). Dört çeşit balık ununda mikroplastik bulunduğunu ve bunların içeriğinin kültür sazanlarındaki mikroplastiklerle pozitif korelasyon gösterdiğini tespit etmişlerdir (Su ve ark., 2024; Wu ve ark., 2023).

2. Karasal İçerikli Yem hammaddeleri: İçerikler esas olarak hayvansal ve bitkisel kaynaklar olarak kategorize edilebilir (Glencross ve ark., 2020). Yaygın hayvansal içerikler arasında et ve kemik unu, kümes hayvanı yan ürünü unu, tüy unu ve kan unu bulunur ve bunlar esas olarak hayvancılık ve kümes

hayvanı işleme yan ürünlerinden işlenir (Woodgate ve ark., 2022). Mevcut kanıtlar, bu içeriklerde MP kontaminasyonu riskinin yüksek olduğunu göstermektedir. Örneğin, Güney Çin'deki hayvancılık ve kümes hayvanı çiftçiliği sistemlerinde yapılan bir araştırma, MP kontaminasyonu için potansiyel yolları belirlemiştir (Wu ve ark., 2021). Ayrıca, çiftlik domuzlarının akciğerlerinde ve dışkılarında MP'ler bulunmuş ve bu da MP'lerin hayvancılık ve kümes hayvanlarında besin zinciri ve solunum yolları aracılığıyla bulaştığını göstermektedir (Li ve ark., 2023). Bitkisel içeriklerle ilgili olarak, iki çalışmada soya küspesindeki MP kontaminasyonu sonuçları, biri kontaminasyon olmadığını belirtirken diğeri 1,23 MP/g'lık bir bolluk bildirmiştir (Walkinshaw ve ark., 2022). Ancak, bu sonuçların araştırmanın kapsamı ve doğruluğu nedeniyle sınırlamaları olabilir. Daha küçük parçacıklar geri kazanılmamış olabilir ve mikron altı ($0,2 \mu m$) veya mikron ($2,0 \mu m$) seviyesindeki plastik parçacıklar bitki köklerine nüfuz ederek çeşitli yer üstü organlarına girebilir. Mevcut bulgulara göre, sakatat veya diğeri yan ürünlerden işlenen hayvansal kaynaklı bileşenler daha büyük bir kontaminasyon riski oluştururken, analitik tekniklerin sınırlamaları güvenlik değerlendirmeleri için önemli bir zorluk teşkil etmektedir (Su ve ark., 2024).

3. Diğeri yüksek besin değerine sahip yem proteinleri: Su ürünleri yemlerinde ortaya çıkan araştırma yönü, böcekler, mikrobiyal tek hücreli organizmalar ve deniz yosunu da dahil olmak üzere yüksek besin değerine sahip yem proteinleri yetiştirmek için geri dönüştürülebilir biyolojik bileşenlerin (atık akışları, endüstriyel yan ürünler, gıda atıkları ve deniz suyu gibi) kültür ortamı olarak kullanılmasını içermektedir (Colombo ve Turchini, 2021). Ancak, bu geri dönüştürülmüş ortamlar çok sayıda MP biriktirebilir. Örneğin, atık ayırma konusunda yoğun çabalara rağmen, gıda ambalajlarından gelen önemli miktarda plastik, çoğunlukla polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS), kompost, sindirim ürünü ve gıda atıklarında varlığını sürdürmektedir (Porterfield, ve ark., 2023).

Bu alanda popüler bir araştırma konusu olan böcekler, gıda atıklarını kültür ortamı olarak kullanarak hızla yetiştirilebilir. Araştırmalar, kara asker sineklerinin MP'leri minimum biyolojik birikimle yuttuğunu veya büyük ölçüde elimine edildiğini göstermiştir (Su ve ark., 2024). Ayrıca, Çin'in doğu kıyılarında yapılan bir araştırma, beş büyük alg türünde MP'lerin ortalama bolluğunun $1243,0 \pm 1394,0$ adet/kg'a ulaştığını ortaya koymuştur. Geri

dönüştürülmüş biyolojik kaynaklarda MP birikme riskinin yüksek olduğu görülmüştür (Li ve ark., 2022).

2.3.2. Ambalaj Malzemeleri

Maliyet etkinliği ve pratiklik açısından, yem torbaları genellikle PE ve PP'den oluşan tek katmanlı plastikten yapılır. Taşıma sırasında bu torbalar genellikle hasar görür ve bu da küçük plastik parçacıklarının oluşmasına neden olur (Dong, 2021). Bu parçacıklar yem bileşenlerine karışabilir ve daha sonra sıkıştırılarak balık yemi peletleri oluşturabilir. Siddique ve arkadaşları, su yemlerinden elde edilen MP'leri analiz ederek, çok renkli MP'lerin ipler veya yem torbaları gibi renkli ambalaj malzemelerinden kaynaklanabileceğini öne sürmüşlerdir (Siidique ve ark., 2023).

Ambalaj torbalarındaki (kısa zincirli klorlu parafinler ve orta zincirli klorlu parafinler gibi) depolama sıcaklığına ve zamana bağlı olarak yeme kademeli olarak geçebilir. Malzemenin plastisitesini, esnekliğini ve dayanıklılığını artırmak için kullanılan endüstriyel kimyasallar olan plastikleştiriciler, yutma, solunum veya deri teması yoluyla insanlar için toksisiteye sahiptir. Bir araştırma, test edilen tüm domuz yemi örneklerinin dibütil ftalat (DBP) ve bis (2-etilheksil) ftalat (DEHP) dahil olmak üzere plastikleştiriciler içerdiğini ortaya koydu. Wang ve arkadaşları, 30 yem torbası örneğinde ortalama 1179 ng/g bisfenol bileşikler (BP'ler) tespit ettiler [66]. Xu ve arkadaşları, hayvan yemlerinde DEHP ve PET MP'ler arasında önemli bir pozitif korelasyon buldular ve bu da bunların çoğunlukla işleme ve paketleme malzemelerinden kaynaklanan homolog olduklarını göstermiştir (Su ve ark., 2024).

2.3.3. Balık Yemi Üretim ve işleme süreçleri

Balık yemi üretimi, taşıma, kırma, eleme ve karıştırma, ardından yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında ekstrüzyon ve peletleme ve son olarak soğutma ve paketleme dahil olmak üzere birkaç devam eden işlemi kapsar (Chaabani ve ark., 2022). Su ürünleri yemi bileşenleri genellikle yüksek derecede kırma gerektirir (Xue ve Gao, 2022), örneğin büyük sarı ispinoz (*Pseudosciaena crocea*) yemindeki bileşenlerin 200-250 μ m açıklıklı bir elekten geçmesi gerekir (TMAO, 2003). Ezme ve eleme işlemlerinden sonra hem bileşenlerden hem de ortamdan gelen MP'ler boyut olarak daha ince ve

miktar olarak daha büyük hale gelir. Genişletilmiş balık yemi üretiminde, hazırlanan yem karışımı yüksek sıcaklıklar (120-130 °C) ve basınçlar (20-30 bar) altında ekstrüzyona tabi tutulur (Sorensen, 2012). Ancak, yüksek sıcaklıklar plastik ambalajlardan/kaplardan önemli miktarda mikro ve nano plastik salınımına yol açabilir. Bir araştırmada, çeşitli plastik ürün türlerinin 100 °C'de milyonlarca alt mikron ve mikron boyutunda plastik parçacık saldığını doğruladı (Liu ve ark., 2021). Isıl bozulmaya veya zincir bozulmasına maruz kalan plastik polimerler, daha küçük parçalara ve monomerlere bölündükleri görülmüştür (Su ve ark., 2024).

3. SONUÇLAR

Plastik ürünlerin yaygın kullanımı nedeniyle, mikroplastik artık birçok yoldan su ürünleri yetiştiriciliği ortamına girmiştir. İnsan faaliyetleri, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğinin ana dış kaynağı olan nehirlerle ve kıyı alanlarına mikroplastik deşarj etmektedir. Ayrıca, arazi atıklarının ayrışması, atmosferik taşınım, okyanus mikroplastik kirliliği de mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliği ortamına girmesine neden olacaktır. Su ürünleri yetiştiriciliği balıkçılık araçları, balık yemleri, balık işleme ve ambalajlar su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki mikroplastik kirliliğinin ana iç kaynağıdır. Su ürünleri yetiştiriciliği ortamı için, mikroplastiklerin kirlenmesi su ürünleri yetiştiriciliği ortamının bozulmasına neden olacak, su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki malzeme ve enerji döngüsünü etkileyecek ve su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin su ürünleri yetiştiriciliği faydasını etkileyecektir. Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde oksidatif strese neden olabilir, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin davranışını, büyümesini ve üremesini etkileyebilir ve hatta su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin ölümüne yol açarak su ürünlerinin ekonomik faydalarını azaltabilir. Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri aracılığıyla insan vücuduna giren mikroplastikler, insan sağlığını da birçok düzeyde etkileyecektir (Wu ve ark., 2023; Le ve ark., 2024; Su ve ark., 2024; Miao ve ark., 2023).

Bazı ülkeler, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğini kontrol altına almak için bazı etkili yöntemler benimsemiştir. Bunlar arasında su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastiklerin ekolojik olarak yakalanması, su ürünleri yetiştiriciliğinde plastik balıkçılık araçlarının kullanımının azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması ve su ürünleri yetiştiriciliğinde ürünlerin

mikroplastiklerden arı olması için faaliyet yürütmektedirler. Ülkeler su ürünleri yetiştiriciliği ortamının yasal hükümlerine ve su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerindeki mikroplastik limitlerine dikkat etmeli, böylece su ürünlerinin belirlenen standartlara uygun olarak çevre koruma önlemlerini uygulayabilmesini sağlamalı ve mikroplastik kirliliğinin değerlendirilmesini kolaylaştırmak için mikroplastik kirliliği analizi için standart bir sistem oluşturulmalıdır. Ayrıca, çeşitli ülkelerdeki çevre koruma uygulayıcıları arasında iletişimin artırılması ve su ürünleri yetiştiriciliği, çevre koruma endüstrisi ve diğer endüstrilerdeki uygulayıcıların değişiminin de artırılması gerekir; bu, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikro plastik kirliliğine karşı uygun kontrol önlemlerinin bulunması zorunluluk getirilmelidir.

Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği sistemlerinde çeşitli şekillerde bulunduğu tespit edilmiştir. Bu kirlilik türü, su ürünleri yetiştiriciliği endüstrisi için su ürünlerinin potansiyel kirlenmesi, kültür balıkları için sağlık riskleri oluşturması ve nihayetinde su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetlerinden elde edilen ekonomik faydaların azalması gibi önemli sonuçlar doğurmaktadır.

Elde edilen veriler, mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliği sistemleri içindeki besin zinciri boyunca kirleticilerin taşınmasındaki potansiyel rolünü ve dolayısıyla insana maruziyeti riskini artırdığını vurgulamıştır. Bu bakış açısıyla, bu endişeleri gidermek ve azaltma yaklaşımları şeklinde acil çözümler zorunlu hale gelmiştir. Mikroplastiklerle mücadele için yeni önerilen doğa temelli bir yaklaşım, doğal biyofiltreler, biyolojik bozunma ve arıtma sulak alanlarının kullanımını içermektedir. Özellikle, inşa edilmiş sulak alanlar, su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarından mikroplastiklerin uzaklaştırılmasında doğa temelli çözümler olarak önemli bir rol oynamaktadır. Su ürünleri yetiştirme sistemlerindeki mikroplastik kirliliğini ele almak üzere özel olarak tasarlanmış gelişmiş izleme ve kontrol teknolojileri oluşturmak için araştırma ve geliştirmeye yönelik stratejilere yatırım yapmak gereklidir (Wu ve ark., 2023). Düzenleyici çerçeveleri güçlendirerek, iş birliğini teşvik ederek ve su ürünleri yetiştiriciliğinde yenilikçiliği ve çevre güvenliğini sağlamak için kesin düzenlemeler geliştirerek mikroplastik kontaminasyonuna ilişkin denetimi iyileştirmek; Su ürünleri yetiştirme ortamlarındaki varlıklarının etkin bir şekilde yönetilmesi için mikro plastiklerin sınır değerlerinin belirlenmesine ilişkin açık prosedürler içeren yasal düzenlemelerin yapılmasını savunulmalıdır. Alternatif malzemeleri ve uygulamaları teşvik ederek

(Schmaltz ve ark., 2020) mikroplastik kirliliğinin önemli bir kaynağı olan tek kullanımlık plastiklerin (SUP'ler) kullanımını azaltmaya yönelik girişimleri desteklemek ve plastik atıkları daha iyi yönetmek, çevresel etkiyi en aza indirmek ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek için "3R: Azalt- Yeniden Kullan- Geri Dönüştür" (Reduce – Reuse – Recycle) yaklaşımını uygulama çabalarını güçlendirmek gereklidir (Le ve ark., 2024).

Mikroplastiklerin yetiştiricilik ortamına birçok olumsuz etkilerinin yanında insan sağlığı risklerinin önlenmesi için ise bilimsel araştırmaların hızlandırılması zorunluluğu vardır. Bu kapsamda, kamu politikaları, sektör ve akademi iş birliği ile mikroplastik kirliliğine karşı etkin stratejiler hayata geçirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Dur_antez Jim_enez, P., Simonneau, A., et al., (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat. Geosci.* 12 (5), 339e344.
- Anonim, (2024). PAGEV, Türkiye Plastik Sektör İzleme Raporu 2024, 29 s. Ankara.
- Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., et al., (2011). Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 45 (21), 9175e9179.
- Cap'ó, X., Alomar, C., Compa, M., Sole, M., Sanahuja, I., Soliz Rojas, D.L., Gonz'alez, G.P., Garcinu~no Mart'inez, R.M., Deudero, S., (2022). Quantification of differential tissue biomarker responses to microplastic ingestion and plasticizer bioaccumulation in aquaculture reared sea bream *Sparus aurata*. *Environ. Res.* 211, 113063.
- Carney Almroth, B.M., Åstr'om, L., Roslund, S., Petersson, H., Johansson, M., Persson, N. K., (2018). Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 1191–1199.
- Castelvetto, V., Corti, A., S. Bianchi, G. Giacomelli, A. Manariti, V. Vinciguerra, (2021). Microplastics in fish meal: contamination level analyzed by polymer type, including polyester (PET), polyolefins, and polystyrene, *Environ. Pollut.* 273 115792,
- Chaabani, A., Labonne, L., V. Durrieu, A. Rouilly, F. Skiba, P. Evon, (2022). Preconditioner influence on twin-screw extrusion cooking of starch-based feed pellets: the example of fish feed, *Aquacult. Eng.* 98, 102268, <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102268>.
- Chen, C.-L., Kuo, P.-H., Lee, T.-C., Liu, C.-H., (2018). Snow lines on shorelines: solving Styrofoam buoy marine debris from oyster culture in Taiwan. *Ocean Coast. Manag.* 165, 346–355.
- Chen, G., Li, Y., Wang, J., (2021). Occurrence and ecological impact of microplastics in aquaculture ecosystems. *Chemosphere*, 274, 129989.

- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 2588–2597.
- Colombo, S.M., Turchini, G.M., (2021). ‘aquafeed 3.0’: creating a more resilient aquaculture industry with a circular bioeconomy framework, *Rev. Aquacult.* 13 (3), 1156–1158, <https://doi.org/10.1111/raq.12567>.
- Cottrell, R.S. J.L. Blanchard, B.S. Halpern, M. Metian, H.E. Froehlich, (2020). Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030, *Nat. Food* 1 (5), 301–308.
- Dong, J., (2021). Novel ideas for the development of China’s feed green packaging products under the concept of international environmental protection, *China Feed* 14, 145–148, <https://doi.org/10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20211437>.
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., Tassin, B., (2015). Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environ. Chem.* 12(5), 592e599.
- Eroldogan, O.T., Glencross, B. L. Novoveska, S.P. Gaudencio, B. Rinkevich, G. C. Varese, et al., (2023). From the sea to aquafeed: a perspective overview, *Rev. Aquacult.* 15 (3), 1028–1057pp.
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. 232 pp. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.
- Food, Nations, A.O. o t U., (2018). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018*. United Nations.
- Frias, J., Nash, R., (2019). Microplastics: finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 145–147.
- GESAMP, (2015). Fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment, PJ Kershaw (ed.). IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, Rep. Stud. – GESAMP, No. 90, p. 96.
- Gewert, B., Plassmann, M.M., MacLeod, M., (2015). Pathways for Degradation of Plastic Polymers Floating in the Marine Environment. *Environ. Sci.: Process. Impacts* 17, 1513–1521.

- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3 (7), e1700782.
- Glencross, B.D., Baily, J., M.H.G. Berntssen, R. Hardy, S. Mackenzie, D.R. Tocher, (2020). Risk assessment of the use of alternative animal and plant raw material resources in aquaculture feeds, *Rev. Aquacult.* 12 (2) (2020) 703–758.
- Iheanacho, S., Ogbu, M., Bhuyan, M.S., Ogunji, J., 2023. Microplastic pollution: an emerging contaminant in aquaculture. *Aquaculture and Fisheries*, 8 (6), 603–616.
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768–771.
- Jiang, J.-Q., (2018). Occurrence of microplastics and its pollution in the environment: a review. *Sustain. Prod. Consum.* 13, 16–23.
- Jorquera, A., Castillo, C., Murillo, V., Araya, J., Pinochet, J., Narváez, D., Pantoja-Gutiérrez, S., Urbina, M.A., (2022). Physical and anthropogenic drivers shaping the spatial distribution of microplastics in the marine sediments of Chilean fjords. *Sci. Total Environ.* 814, 152506.
- Lam, T.W.L., Fok, L., Ma, A.T.H., Li, H.-X., Xu, X.-R., Cheung, L.T.O., Wong, M.H., (2022). Microplastic contamination in marine-cultured fish from the Pearl River estuary, south China. *Sci. Total Environ.* 827, 154281.
- Le, V. G., Nguyen, M. K., Ngo, H. H., Barceló, D., Nguyen, H. L., Um, M. J., & Nguyen, D. D. (2024). Microplastics in aquaculture environments: Current occurrence, adverse effects, ecological risk, and nature-based mitigation solutions. *Marine pollution bulletin*, 209, 117168.
- Lebreton, L.C.M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., Reisser, J., e(2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* 8, 15611.
- Li, Q., Su, L., Ma, C., Z. Feng, H. Shi, (2022). Plastic debris in coastal macroalgae, *Environ. Res.* 205, 112464, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112464>.
- Li, H., Yang, Z., F. Jiang, L. Li, Y. Li, M. Zhang, et al., (2023). Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: a preliminary study, *Environ. Res.* 216, 114623.

- Liu, G., Wang, J., Wang, M., R. Ying, X. Li, Z. Hu, Y. Zhang, (2021). Disposable plastic materials release microplastics and harmful substances in hot water. *Sci. Total Environ.* 818,151685, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151685>.
- Liu, S., Zhao, Y., Li, T., Hu, T., Zheng, K., Shen, M., Long, H., (2023). Removal of micro/ nanoplastics in constructed wetland: efficiency, limitations and perspectives. *Chem. Eng. J.* 475, 146033.
- Lusher, A.L.; Hollman, P.C.H.; Mendoza-Hill, J.J. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 615. Rome, Italy.
- Mathalon, A., Hill, P., (2014). Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia. *Mar. Pollut. Bull.* 81, 69–79.
- Miao C, Zhang J, Jin R, Li T, Zhao Y, Shen M. (2023). Microplastics in aquaculture systems: occurrence, ecological threats and control strategies. *Chemosphere.*; 340: 139924.
- M.I. Muhib and Rahman, M.M., (2023). Microplastics contamination in fish feeds: characterization and potential exposure risk assessment for cultivated fish of Bangladesh, *Heliyon* 9 (9), e19789.
- PlasticEurope, (2023). *Plastics-the Facts 2023* An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available on the website. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>.
- Porterfield, K.K., Hobson, S.A., D.A. Neher, M.T. Niles, E.D. Roy, (2023). Microplastics in composts, digestates, and food wastes: a review, *J. Environ. Qual.* 52 (2). 225–240, <https://doi.org/10.1002/jeq2.20450>.
- Priscilla, V., Patria, M.P., (2019). Comparison of microplastic abundance in aquaculture ponds of milkfish *Chanos chanos* (Forsskal, 1775) at Muara Kamal and Marunda, Jakarta Bay. In: *Proceedings of the 4th EMBRIO International Symposium and the 7th International Symposium of East Asia Fisheries and Technologists Association*. Vol. 404.
- Schmaltz, E., Melvin, E.C., Diana, Z., Gunady, E.F., Rittschof, D., Somarelli, J.A., Virdin, J., Dunphy-Daly, M.M., (2020). Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environ. Int.* 144, 106067.

- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., Palanisami, T., (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested—A pivotal first step towards human health risk assessment. *J. Hazard. Mater.* 404, 124004.
- Shim, W.J., Hong, S.H., Eo, S., (2018). Chapter 1- marine microplastics: abundance, distribution, and composition. In: Zeng, E.Y. (Ed.), *Microplastic Contamination in Aquatic Environments*. Elsevier, pp. 1-26.
- Siddique, M.A.M., T. Tahsin, I. Hossain, M.S. Hossain, N.E. (2023). Shazada, Microplastic contamination in commercial fish feeds: a major concern for sustainable aquaculture from a developing country, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 267, 115659.
- Song, K., Wang, R., Yang, G., Xie, S., Chen, Y., Yang, F., ... & Feng, Z. (2023). Pollution concerns in mariculture water and cultured economical bivalves: occurrence of microplastics under different aquaculture modes. *Journal of Cleaner Production*, 406, 136913.
- Sørensen, M. (2012). A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods, *Aquacult. Nutr.* 18 (3), 233–248.
- Su, Z., Wei, L., Zhi, L., Huang, X., Wang, X., & Wang, J. (2024). Microplastics in aquafeeds: Occurrence, sources, effects and considerations for aquatic food production. *Trends in Analytical Chemistry*, 176, 117760.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M.C.M., Ni, B.-J., (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Res.* 152, 21–37.
- Sui, M., Lu, Y., Wang, Q., Hu, L., Huang, X., & Liu, X. (2020). Distribution patterns of microplastics in various tissues of the Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) and in the surrounding culture seawater. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111595.
- Tang, Y., Han, Y., Zhang, W., Yu, Y., Huang, L., Zhou, W., Shi, W., Tian, D., Liu, G., (2022). Bisphenol a and microplastics weaken the antimicrobial ability of blood clams by disrupting humoral immune responses and suppressing hemocyte chemotactic activity. *Environ. Pollut.* 307, 119497.

- T.M.O.A. (2003). China, Formula Feed for Large Yellow Croaker (Sc/t2012-2002), China Standards Press, Beijing.
- Xiong, X., Xie, S., Feng, K., Wang, Q., (2022). Occurrence of microplastics in a pond-riverlake connection water system: how does the aquaculture process affect microplastics in natural water bodies. *J. Clean. Prod.* 352, 131632.
- Xue, F., Gao, F., (2022). Experimental investigation of energy efficiency of an air classifier mill pulverizing a raw material of aquafeed, Part, *Sci. Technol.* 40 (1), 104–112, <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1929605>.
- Valencia-Castañeda, G., Ruiz-Fernández, A. C., Frías-Espericueta, M. G., Rivera-Hernández, J. R., Green-Ruiz, C. R., & Páez-Osuna, F. (2022). Microplastics in the tissues of commercial semi-intensive shrimp pond-farmed *Litopenaeus vannamei* from the Gulf of California ecoregion. *Chemosphere*, 297, 134194.
- Ye, Y., Zhang, A., J. Teng, X. Yang, X. Yuan, Q. Wang, et al., (2023). Pollution characteristics and ecological risk of microplastic in sediments of liaodong bay from the northern bohai sea in China, *Mar. Pollut. Bull.* 187, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114505>.
- Yeşilayer, N., Kaymak, İ. E., Gören, H. M., & Karşlı, Z. (2013). Balık yemlerinde balık ununa alternatif bitkisel protein kaynaklarının kullanım olanakları. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, (4), 12-30.
- Walkinshaw, C., Tolhurst, T.J., P.K. Lindeque, R. Thompson, M. Cole, (2022). Detection and characterisation of microplastics and microfibrs in fishmeal and soybean meal. *Mar. Pollut. Bull.* 185, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul2022.114189>.
- Wang, J., Lu, L., Wang, M., Jiang, T., Liu, X., Ru, S., (2019). Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms: a case study in Sanggou Bay, China. *Sci. Total Environ.* 667, 1–8.
- Wright, L.S., Napper, I.E., Thompson, R.C., (2021). Potential microplastic release from beached fishing gear in Great Britain's region of highest fishing litter density. *Mar. Pollut. Bull.* 173, 113115.
- Woodgate, S.L., A.H.L. Wan, F. Hartnett, R.G. Wilkinson, S.J. Davies, (2022). The utilisation of european processed animal proteins as safe, sustainable

- and circular ingredients for global aquafeeds, *Rev. Aquacult.* 14 (3), 1572–1596.
- Wu, R., Y. Cai, Y. Chen, Y. Yang, S. Xing, X. Liao, (2021) .Occurrence of microplastic in livestock and poultry manure in south China, *Environ. Pollut.* 277 116790.
- Wu, H., Hou, J., Wang, X., (2023). A review of microplastic pollution in aquaculture: sources, effects, removal strategies and prospects. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 252, 114567.
- Zhang, D., Cui, Y., Zhou, H., Jin, C., Yu, X., Xu, Y., Li, Y., Zhang, C., 2020. Microplastic pollution in water, sediment, and fish from artificial reefs around the Ma'an Archipelago, Shengsi, China. *Sci. Total Environ.* 703, 134768.
- Zhang, W., Tang, Y., Han, Y., Zhou, W., Shi, W., Teng, S., Ren, P., Xiao, G., Li, S., Liu, G., (2022). Microplastics boost the accumulation of tetrabromobisphenol a in a commercial clam and elevate corresponding food safety Risks. *Chemosphere* 292, 133499
- Zhou, W., Han, Y., Tang, Y., Shi, W., Du, X., Sun, S., Liu, G., (2020). Microplastics aggravate the bioaccumulation of two waterborne veterinary antibiotics in an edible bivalve species: Potential mechanisms and implications for human health. *Environ. Sci. Technol.* 54, 8115–8122.
- Zhu, J., Zhang, Q., Huang, Y., Jiang, Y., Li, J., Michal, J.J., Jiang, Z., Xu, Y., Lan, W., (2021). Long-term trends of microplastics in seawater and farmed oysters in the Maowei Sea. China. *Environmental Pollution*, 273, 116450.

BÖLÜM 3

SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: ETKİLERİ VE DOĞA TEMELLİ AZALTIM STRATEJİLERİ

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18047977>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü Tokat, Türkiye.
nihat.yesilayer@gop.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6995-5855

Kısaltmalar: AN, akrilonitril; BPA, Bisfenol A; CCD sensörü, yük-bağlantılı cihaz sensörü; COD, kimyasal oksijen ihtiyacı; DEHP, dietilheksil ftalat; EPDM, propilen - etilen propilen dien monomer; EPS, genleştirilmiş polistiren; EVA, etilen-vinil asetat; HDPE, yüksek yoğunluklu polietilen; HOC'ler, hidrofobik organik kirleticiler; LDPE, düşük yoğunluklu polietilen; Mt, milyon ton; MP, mikroplastik; NY, naylon; PA, poliamid; PAH'ler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar; PAN, poliakrilonitril; PCB, poliklorlu bifeniller; PE, polietilen; PE-PP, poli(etilen:propilen:dien); PES, polietersülfon; PET, polietilen tereftalat; PEVA, polietilen-vinil asetat; POM, polioksimetilen; PP, polipropilen; PP:PE, poli (propilen-etilen) kopolimer; PS, polistiren; PSA, poli (stiren ko-akrilonitril); PU, polieter üretan; PVC, polivinil klorür; ROS, reaktif oksijen türleri; RY, suni ipek; SAR, sentetik açıklıklı radar; UV, ultraviyole ışın.

GİRİŞ

Plastik ürünler modern hayata büyük kolaylıklar sağlayan, günümüzde kullandığımız her şeyin içinde bulunan çok yönlü bir malzemedir. Sentetik organik polimerler olarak da bilinir ve kömür, doğal gaz ve ham petrol gibi doğal, organik kaynaklardan polimerizasyon veya polikondenzasyon işlemleriyle elde edilir (Ahmed ve ark., 2023). Avantajlı özellikleri ve düşük fiyatları nedeniyle son 75 yıldan bu yana, küresel yıllık plastik üretimi sürekli olarak artmıştır, (Chen ve ark., 2021). Plastik üretimi, 1950'lerde 1,7 milyon tondan 2016'da 335 milyon tona çıkmıştır. Şaşırtıcı bir şekilde, yalnızca 2010 yılında yaklaşık 8 milyon metrik ton (Mt) plastik atığın kara kaynaklarından deniz ortamına girdiği tahmin edilmektedir (Talbot ve Chang, 2022). Plastik talebi katlanarak artıyor ve üretim eğilimlerinin 2050 yılına kadar dört katına çıkması bekleniyor. Küresel plastik üretimindeki eğilimler, tüketici alışkanlıkları, plastik atıkların uygunsuz şekilde bertarafı ve nüfus demografisi göz önüne alındığında, plastik tüketiminin gelecekte önemli ölçüde artacağı düşünülmektedir (Ali ve ark., 2024). Çöp haline gelen plastiğin yüzde 9'unun geri dönüştürüldüğü, yüzde 12'sinin yakıldığı ve geri kalan kısmının da çöp depolama alanlarına terk edildiği ifade edilmektedir. Karasal ortamda üretilen bu çöplerin her yıl 4.8 ila 12 milyon tonunun okyanuslara çeşitli yollarla karıştığı belirtilmektedir (Lusher ve ark., 2017).

Aquatic ekosistemlerde, mikropplastikler su canlıları tarafından yem gibi alınıp yutulmakta, büyüme ve gelişmelerini etkilemekte ve besin zincirindeki daha yüksek organizmalara trofik transfere neden olmaktadır (Chen ve ark., 2021). Bu nedenle, su ürünleri tüketimi, insanların mikropplastiklere maruz kalmasının başlıca birincil kaynağıdır.

Su ürünleri yetiştiriciliği üretimi 2022 yılı sonunda 94,4 milyon tona ulaşarak son 30 yılda %433 ün üzerinde bir artış ile en fazla büyüyen gıda sektörü olmuştur. Avcılık yoluyla 91 milyon ton su ürünleri üretimini tarihte ilk kez yetiştiriciliğin gerisinde kalmıştır (FAO, 2024). Su ürünleri, insanların besin madde ihtiyaçlarından proteinin önemli bir kısmını karşıladığı için, mikropplastiklerle kirlenmiş su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri gıda kalitesini ve güvenliğini doğrudan etkiler. Su ürünleri ortamlarındaki mikropplastikler çoğunlukla karadan gelen plastik atık ve döküntüler, turizm, nakliye taşımacılığı ve atmosferik birikim gibi dışsal kaynaklardan oluşmaktadır (Chen ve ark., 2021).

Su ürünleri yetiştiriciliği alanlarında atılan, kaybolan veya bertaraf edilen balıkçılık ekipmanları ayrışabilir ve farklı türde mikroplastikler oluşturabilir (Xue vd., 2020). Doğal su kütlelerine girdikten sonra, bunların bir kısmı su ürünleri yetiştiriciliği havuzlarına girdiğinde doğrudan veya dolaylı olarak su ürünleri yetiştiriciliği organizmaları tarafından emilir ve yetiştiricilik suyunda (Xiong ve ark., 2022) ve tortuda sürekli zenginleşmeye ve birikmeye eğilimlidir bu da mikroplastik kirliliğine neden olmaktadır (Miao ve ark., 2023).

Su ürünleri yetiştiriciliği ortamının kirlenmesi ve bunun insan sağlığı ile su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin kalitesi üzerindeki etkisi tam olarak bilinmemektedir. Günümüzde, dünya genelinde çeşitli su organizmalarının sindirim sistemlerinde mikroplastikler bulunmuştur. Bu durum, çok sayıda tüketicinin sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturabilir. Mikroplastiklere maruz kalma, çeşitli kronik komplikasyonların nedeni olan kronik inflamasyon ve oksidatif strese neden olabilir (Shen ve ark., 2019; 2023). Bu nedenlerden dolayı, su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında mikroplastiklerin dağılımını araştırmak ve potansiyel risk değerlendirmeleri yapmak özellikle gereklidir (Miao ve ark., 2023).

Çevresel güvenliği, gıda güvenliğini ve ekonomik verimliliği sağlamak için su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kontaminasyonunun kapsamlı bir şekilde anlaşılması gereklidir (Wu ve ark., 2023). Su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastiklerin azaltılması, plastiklerin su ortamlarına girişini en aza indirmeye ve etkilerini azaltmaya yönelik uygulamaların hayata geçirilmesini gereklidir. Doğa temelli çözümler, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğini en aza indirmeye yardımcı olmak için özellikle faydalı stratejilerdir. Bunlar, doğal ekosistemleri korumayı, restore etmeyi, sürdürülebilir bir şekilde yönetmeyi ve değiştirmeyi amaçlayan stratejik eylemleri ifade eder. mikroplastik kirliliğini ele almak için öncü bir doğa temelli çözüm, su ekosistemlerine mikroplastik biyofiltre görevi görecek midyeler yerleştirmeyi içerir. Bu midyeler, sudaki mikroplastikleri çıkarmak ve bunları yakalanıp çevreden uzaklaştırılabilen biyolojik tortulara dönüştürmek için çalışır (Cole ve ark., 2023). Ayrıca, sulak alan teknolojisi kullanılarak mikroplastiklerin uzaklaştırılmasının ne kadar etkili olduğuna dair kapsamlı bir araştırmalar bulunmaktadır (Liu ve ark., 2023). Plastik kullanımına yönelik etkili düzenleyici politikalar, mikroplastiklerin etkisini azaltmak ve daha temiz, daha sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliğini teşvik etmek için olmazsa

olmazdır. Özellikle mikroplastik kirliliği için kullanılan doğa temelli çözümlerin su ürünleri yetiştiriciliğinde zararlıların uzaklaştırılması, çeşitli metodolojilerin geliştirilmesi zorunludur (Le ve ark., 2024).

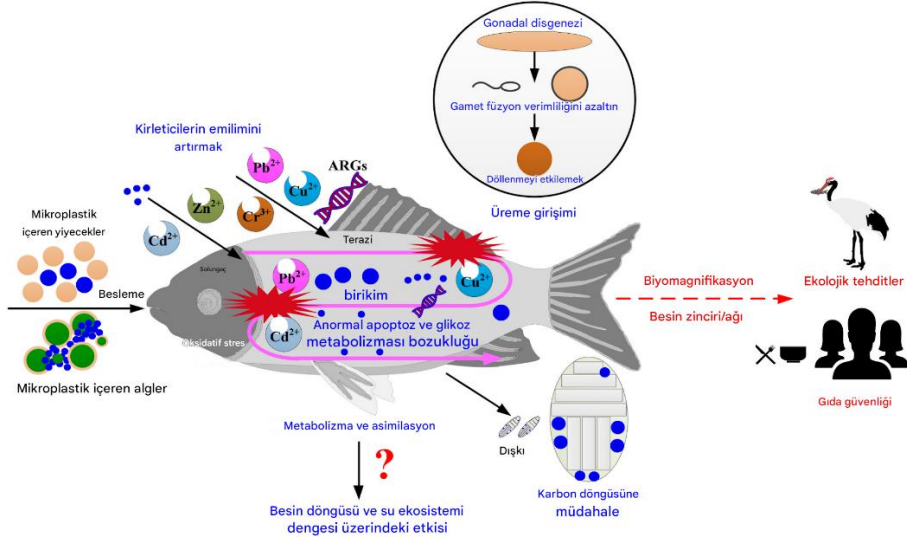
Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde organik katkı maddeleri ve antibiyotikler vb. gibi organik kirleticilerin birikmesini teşvik etme kapasitesine sahiptir ve sonuç olarak insanlar için oluşturdukları sağlık tehditlerini artırır (Wu ve ark., 2023). Senathirajah vd. (2021), dünya çapında insanların kişi başına haftada ortalama 0,1–5 g mikroplastik tükettiğini göstermiştir. Mikroplastiklerin kültür balık toplulukları üzerindeki etkileri oksidatif stres, bozulmuş büyüme, üreme toksisitesi, nörotoksisite, embriyotoksisite, immünotoksisite ve histopatolojik değişiklikleri kapsar (Iheanacho vd., 2023). Birkaç araştırma, çeşitli kültür balık türlerinin dokularında ve biyolojik sistemlerinde mikroplastiklerin biyolojik birikimini kanıtlamıştır. Su ekosistemlerinde, suda yaşayan hayvanlar tarafından mikroplastiklerin tüketimi, gelişimlerini ve büyümelerini etkiler ve besin zincirinde/ağında daha yüksek seviyelere trofik transferine yol açar (Chen vd., 2021). Sonuç olarak, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin yutulması, insanlar için mikroplastiklerle ilgili kritik bir maruziyet kaynağı görevi görür (Le ve ark., 2024).

Bu derlemede, mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliğinden elde edilen ürünlere, yetiştiricilik ortamlarına ve bu ürünleri tüketen insanlara olan etkilerini ve yetiştiricilik ortamlarındaki mikroplastik kaynaklarını doğal yollarla azaltma yöntem ve stratejileri üzerine güncel araştırma sonuçlarından su ürünleri yetiştiriciliğine etkilerini en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

1. SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜRÜNLERİNDEKİ MİKROPLASTİKLER VE OLUMSUZ ETKİLERİ

Mikroplastikler, birçok ticari balık da dahil olmak üzere 100'den fazla türde tespit edilmiştir. Bu durum su ürünleri canlılarında ve insanlarda ciddi rahatsızlıklara ve gıda güvenliği endişelerine yol açmıştır (Şekil 1) (Lusher ve ark., 2017). Balıklar, midyeler, karidesler ve yengeçler gibi ticari türler de dahil olmak üzere birçok türde mikroplastikler bulunmuştur (Rezania ve ark., 2018). Örneğin, Güney Kuzey Denizi'nin kıyı sularında ve kanal alanında yaşayan karideslerde 200 ila 1000 mm arasında değişen sentetik lifler tespit edilmiştir. Guangdong'un haliç alanlarındaki altı ticari balık türünde ise mikroplastik

bolluğu 1,0 ila 17,0 adet/birey arasında değişmiştir (Devriese vd., 2015). Benzer şekilde, Biritanya kıyılarında örneklenen yabancı midyelerin dokusunda 0,7 ila 2,9 adet/g bulunmuştur (Li ve ark., 2018a).



Şekil 1. Mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarındaki Canlılar üzerindeki potansiyel etkileri ve ekolojik riskleri (Miao ve ark., 2023'ten uyarlanmıştır).

Mikroplastikler şüphesiz tüm su ürünleri yetiştiriciliğinde koylar, kıyı alanları, nehirler, göller, göletler, yapay resifler, balıkçı çiftlikleri, ağ kafesler, pirinç ve balık yetiştirilen ortak kültür sistemleri de dahil olmak üzere alınan örneklerde mp bulunmuştur. Örneğin, kültür istiridyelerdeki mikroplastikleri ölçen bir çalışmada Çin kıyı şeridi boyunca 17 bölgede, Cakarta körfezinde, Su ürünleri yetiştiriciliğinden elde edilen süt balığında (*Chanos chanos*), başka bir araştırmada Hong Kong'daki balık çiftliklerinden elde edilen kefallerde mp görüldü, farklı olarak; Pirinç-balık ortak kültür ekosisteminde su ürünleri yetiştirme ortamı olan Şanghay'da, üç canlı türünde (yılan balığı, kerevit ve Loach spp.çopra) ortalama mikroplastik bolluğu pirinç ekimi yapılan dönemde önemli ölçüde artmıştır (Miao ve ark., 2023). Çalışmalarda ayrıca su ürünleri yetiştiriciliği türleri ile doğadaki türlerdeki mikroplastikleri de karşılaştırmıştır. Ortalama mikroplastik bolluğu midye türlerinde ve aynı şekilde pasifik istiridyelerinde kültür ortamında yetişenler doğadan avlanılanlardan daha yüksek mp bulunduğu tespit edilmiştir (Chen ve ark., 2021)

Mikroplastikler, sucul organizmalarının büyümesi ve gelişimi için zararlı olabilirler. Su içindeki tortulardaki polistiren (PS) mikroplastiklerinin, sucul organizmaların büyümesini önemli ölçüde engellediği gösterilmiştir. Kum solucanları (*Arenicola marina*) ve deniz kestanelerinin (*Tripneustes gratilla*) beslenmesini ve büyümesini engeller, ayrıca, mikroplastik yutulması su canlılarının beslenme ve davranışlarını etkiler. Çalışmalar, mikroplastiklerin *S. schlegelii*'nin beslenme ve yüzme yeteneklerini önemli ölçüde azaltabileceğini (Yin ve ark., 2018) ve polietilen mikroplastiklerine maruz kalmanın, adi gobi balığının (*Pomatoschistus microps*) yüzme ve avlanma yeteneğini azalttığını (Oliveira ve ark., 2013) göstermiştir. Bu arada, mikroplastikler suda yaşayan hayvanların doku ve organlarına girdikten sonra bir dizi bağışıklık tepkisini tetikleyebilir. Çalışmalar, 40-150 mm parçacık boyutuna sahip polivinil klorür (PVC) ve PET mikroplastiklerinin çipura (*Sparus aurata*) ve levreğin (*Dicentrarchus labrax*) beyaz kan hücrelerinde oksidatif hasara neden olabileceğini göstermiştir (Espinosa ve ark., 2018). Mikroplastikler (<80 mm) ayrıca midyenin sindirim sistemine girerek inflamatuvar bir tepkiye yol açabilir (Von Moos ve ark., 2012). Benzer şekilde, deniz kestanelerinin amino-polistiren nanoplastiklere (10 ve 25 mg/ml) maruz kalması, fagosit lizozom membranında ve apoptozda dengesizliğe neden olabilir (Marques-Santos vd., 2018).

Suda yaşayan organizmaların üremesini mikroplastikler etkileyebilir. Tortulardaki polistiren (PS) mikroplastiklerine maruz kalma, istiridyelerin enerji alımı ve dağıtımını ve üreme sağlığı üzerinde güçlü olumsuz etkilere neden olmuştur (Sussarellu ve ark., 2016). Mikroboncuklar ayrıca deniz kopepodlarının (*Paracyclopsina nana*) hücre zarlarına nüfuz edebilir ve hücresel hasara neden olarak üreme ve büyüme oranlarının azalmasına yol açtığı belirtilmiştir (Ali ve ark., 2024).

Küresel su ürünleri yetiştiriciliği üretimi avcılığı geçerek toplam küresel balık üretiminin %50'sinden fazlasını sağlamakta ve bu durum su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin insan gıdası ve protein tedarikindeki önemini karşılamaktadır. Çalışmalar, mikroplastiklerin beslenme yeteneğini etkileyebileceğini ve su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin kalitesini etkileyebilecek büyüme ve gelişmeyi engelleyebileceğini göstermektedir. Gıda güvenliği daha da önemli bir endişe kaynağıdır (Garrido Gamarro ve ark., 2020). Mikroplastikler balık, midye, istiridye ve diğer su ürünleri yetiştiriciliği

türlerinde bulunur ve gıda yoluyla insan tüketiminin ana kaynağıdır. Çoğu ticari türde gastrointestinal sistemin çıkarılmasıyla mikroplastik yutma riski azaltılır (Lusher ve ark., 2017). Bu nedenle, çoğunlukla sindirim sistemi de dahil olmak üzere bütün olarak tüketilen su ürünleriyle ilgili daha fazla endişe oluşturmaktadır. Kabuklu deniz ürünleri tüketimi nedeniyle kişi başına yılda yutulan mikroplastik sayısı 11.000'e ulaşabilir (Smith vd., 2018). Bu belirtilen konulardan dolayı, ekolojik ve insan sağlığı çıkarlarını korumak için su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin kalitesine ve güvenliğine öncelik vermemiz gerektiği açıktır. Dahası, mikroplastikler diğer toksik kirleticileri ve patojenleri taşımak için vektör görevi görme potansiyeline sahiptir ve bu da riskleri daha da artırmaktadır (Ali ve ark., 2024).

2. MİKROPLASTİKLERİN SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mikroplastiklerin ve içerdikleri kirleticilerin su ürünleri yetiştiriciliği üzerine 3 kısımda etkileri mevcuttur.

- 1- Su ürünleri yetiştiriciliği ortamı
- 2- Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri
- 3- İnsan sağlığı üzerindeki etkileri

2.1. Su Ürünleri Yetiştiriciliği Ortamına Etkileri

Plastiklerin doğada parçalanması zordur. Mikroplastik kirleticiler uzun süre stabil bir şekilde varlığını sürdürür ve su ürünleri yetiştiriciliği ortamına girdiklerinde su geçirgenliğini etkiler. Ayrıca, klor içeren bazı plastikler (PVC gibi) fotokatalitik ayrışma sırasında HCl salarak su ortamının asitlenmesine neden olabilir. Mikroplastikler ve katkı maddeleri, sudaki mikro algler üzerinde toksik etkilere sahiptir ve bu da su ürünleri yetiştiriciliği ortamının ekolojik dengesini etkileyebilir. Büyük plastik kirleticilerle karşılaştırıldığında, mikroplastikler büyük özgül yüzey alanına sahip olma özelliğine sahiptir. Yüzey hidrofobiklikleri nedeniyle mikroplastikler, PAH'lar, organoklorlu pestisitler ve PCB gibi HOC'lerle yüklenebilir. Aynı zamanda, mikroplastiklerin yüzeyleri mikroorganizmalar tarafından kolonize edilerek biyofilmler oluşturabilir ve bu da HOC'lerin su ortamına salınımını teşvik edebilir (Wu ve ark., 2023).

Yukarıda açıklamalar altında mikroplastiklerdeki zararlı katkı maddeleri ve mikroplastiklerin yüklediği kirleticiler çevreye kolayca salınabilir, bu da su ürünleri ürünlerinin toksinleri yutması riskini artırabilir ve insanlar için tehdit oluşturabilir. Mikroplastiklerin ayrıca su ortamındaki mikrobiyal topluluk üzerinde bazı olumsuz etkileri vardır. Örneğin, bazı polimerlere üretimleri sırasında antibakteriyel maddeler eklenir. Bu antibakteriyel maddeler mikroplastikler tarafından salınabilir ve su ortamındaki mikroorganizma ilaç direnci üretebilir, bu da bulaşıcı hastalıkların yayılma riskini artırmaktadır (Wu ve ark., 2023). Mikroplastikler, su ürünleri ortamlarında antibiyotik direnç genlerinin bolluğunu artırabilir ve antibiyotiklerin etkinliğini kaybetme potansiyel risklerini artırabilir (Lu ve ark., 2019).

Mikroplastikler ayrıca çok sayıda virüse de ev sahipliği yapar. Araştırmalar, su ortamlarında 1700'den fazla virüsün mikroplastiklerle taşındığını göstermiştir (Li ve ark., 2022). Bu durum, su ürünleri yetiştiriciliği ortamını kötüleştirecek, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin üretimini azaltacak ve su ürünleri yetiştiriciliğinin ekonomik faydalarını azaltacaktır. Mikroplastikler Su ürünleri yetiştiriciliği ortamında biriken mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği atık sularının deşarjı yoluyla doğal suya da karışacak ve mikroplastiklerin kirlilik alanını genişletecektir (Xiong vd., 2022). Özetle, su ürünleri yetiştiriciliği ve çevresindeki ortam için çeşitli kirlilik riskleri taşıyacaktır (Wu ve ark., 2023).

2.2. Su Ürünleri Yetiştiriciliği Ürünleri Üzerindeki Etkileri

Balık, midye, karides ve yengeç gibi çok sayıda su ürünleri yetiştiriciliği ürününde mikroplastikler bulunmuştur. Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde oksidatif stres de dahil olmak üzere çok sayıda toksikolojik etkiye ve su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin davranışı, büyümesi ve üremesi üzerinde olumsuz etkilere neden olarak su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin ekonomik faydalarını azaltır. Mikroplastiklerin balık metabolizması üzerinde lipid metabolizması, oksidatif stres, karbonhidrat metabolizması ve toksin atılımı gibi kapsamlı ve önemli etkileri vardır. Mevcut bulgular daha çok balıkların oksidatif stres tepkisi üzerine uyarıcı etkisiyle ilgilidir (Jacob ve ark., 2020). Çalışmalar, balıkların metabolik durumunu değiştirebilir, Reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini teşvik edebilir ve ardından oksidatif stres yanıtını indükleyebilir (Jeong ve ark., 2017). ROS'un

büyük üretimi ayrıca balıklardaki lipid metabolizmasıyla ilgili kolesterol seviyesini ve enzim aktivitesini olumsuz etkileyecektir (Wan vd., 2019). Mikroplastikler balık bağışıklık sistemi üzerinde toksik etkilere sahiptir. Çalışmalar, mikroplastiklerin 40-150 µm boyutlarındaki PVC ve PET mikroplastiklerinin çipura ve levrek hücrelerinde oksidatif hasara neden olabileceğini göstermiştir (Espinosa ve ark., 2018).

Beyin fonksiyonu açısından, 24 nm ve 27 nm parçacık boyutuna sahip mikroplastik parçacıkların balık beyninin gelişimini etkileyebileceği (Mattsson vd., 2015), örneğin beyin gelişiminde yavaşlama, yapısal hasar (Wan ve ark., 2019) ve asetilkolinesteraz aktivitesinde azalma gibi çalışmalarla mevcuttur. Daha küçük parçacıklar ise beyin çevresindeki kan damarlarında ve dokularda yerleşerek beyne zarar gösterebilir (Schür ve ark., 2019). Nispeten büyük bazı mikroplastik parçacıkların ise genellikle konjonktivada, kan damarlarında ve beyin çevresindeki dokularda kalarak beyin fonksiyonlarını etkileyeceği düşünülmektedir (Schür ve ark., 2019). Daha büyük parçacıklar (>500 nm) bağışıklık tepkisini tetikleyebilir, balık metabolizmasını ve bağırsak mikrobiyotasını değiştirebilir ve daha sonra beyin fonksiyonu hasarına yol açabilir. Mikroplastiklerin etkisi kalp ve solungaç fonksiyonlarını da etkileyebilir. 60 µm boyutundaki mikroplastiklerin Afrika keskin dişli yayın balığı ve *Clarias gariepinus*'un solungaçlarında doku hasarına neden olabileceğini kanıtlamıştır (Wu ve ark., 2023).

Mikroplastiklerin balık dışında su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri üzerinde de toksik etkileri vardır. Örneğin, mikroplastikler midyenin sindirim sisteminde iltihabi tepkiye yol açabilir (Von Moos ve ark., 2012). Benzer şekilde, mikroplastikler deniz kestanesinin fagosit lizozom membranında dengesizliğe ve apoptoza da neden olabilir. Triklosan ve mikroplastikler, midye (*Perna canaliculus*) oksidatif stres belirtileri (SOD aktivitesi ve lipid peroksidasyonu dahil) artırmıştır (Wu ve ark., 2023).

Mikroplastikler su ürünleri canlılarının davranışını etkilemekte ve su organizmaları tarafından yutulduktan sonra stabil bir şekilde varlığını sürdürür, bu da yalancı tokluk hissine neden olabilir ve su organizmalarının alımını etkileyebilir, hatta gastrointestinal tıkanıklığa bile yol açabilir (Colferai ve ark., 2017). Mikroplastiklerin sindirilememesi, mikroplastikleri yutan balığın sindirim sistemi üzerindeki yükü artıracak, sindirim enzimi aktivitesinin azalmasına ve tripsin ve kimotripsinin artmasına neden olacaktır (Romano ve

ark., 2018). Ayrıca çalışmalar, mikroplastiklerin *Sebastes schlegelii*'nin beslenme ve yüzme yeteneklerini azaltabileceğini (Yin ve ark., 2018), PE mikroplastiklerine maruz kalmanın ise sıradan gobi balığının yüzme ve avlanma yeteneğini azalttığını göstermiştir (Oliveira ve ark., 2013). Mikroplastikler, koku tanımlamasını ve diğer yolları engelleyen kapsamlı bir mekanizma yoluyla japon balığının koku aracılı davranışsal tepkilerini değiştirebilir. PET mikroplastikleri enerji tüketimini artırır ve yenilebilir midyenin büyüme hızını azaltır. PS mikroplastiklerinin birikimi, Manila istiridyasının solunum ve boşaltım oranlarını önemli ölçüde azaltırken, beslenme ve emilim verimliliğini önemli ölçüde azaltır ve bu da büyüme için mevcut enerjisinin miktarının azalmasına ve sonuç olarak daha yavaş büyümeye yol açar. PS mikroplastiklerine maruz kalmanın, istiridyelerin enerji alımı ve dağıtımını ile üreme sağlığı üzerinde olumsuz etkileri görülmüştür (Sussarellu ve ark., 2016). Mikroplastiklerden salınan BPA, sazan balığının üreme organlarını ve gonatlarını etkileyebilir. Mikroplastikler ve BPA ayrıca metabolizmaya müdahale ederek ve endokrin düzenlemesini bozarak beyaz bacaklı karidesin gonadal gelişimi üzerinde toksik etkilere sahip olabilir. Mikroplastikler, gamet füzyon verimliliğini azaltarak yayılmış yumurtlayan bir çift kabuklunun döllenme başarısını önleyebilir (Shi ve ark., 2022). Mikroplastiklerin ayrıca su ürünlerinin embriyoların yumurtadan çıkmayı geciktirebileceğini ve sonraki larval gelişim aşamalarını etkileyebileceğini göstermektedir. Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri üzerindeki MP'lerin çok sayıda olumsuz etkisi, su ürünleri yetiştiriciliği üretiminde düşüşe neden olmaktadır. Örneğin, genç *Thunnus orientalis* balıklarının yaklaşık %50'si kafes kültüründen sonraki 30 gün içinde ölürken, ölü balıkların yaklaşık üçte birinde polistiren mikroplastikleri ve diğer inorganik maddeler bulunmuştur. Afrika yayın balıklarında 2 g/L PE mikroplastiklere maruz kaldıklarında %10 ölüm oranı görülmüştür (Wu ve ark., 2023). Ölüm oranındaki artış Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri ve üreme verimliliğindeki azalma, su ürünleri yetiştiriciliğinin ekonomik faydalarının düşüşü anlamına gelir. Fransa'daki Charente-Maritime kabuklu deniz ürünleri yetiştiriciliği işletmelerinin sayısı 2000 li yılların başında istiridye yetiştiriciliğinin yüksek ölüm oranı nedeniyle işletme sayısında azalma ekonomiyi ciddi şekilde etkilemiştir (Girard ve P'erez Agúndez, 2014). Su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin larvaları da önemli ekonomik kaynaklardır. Balık yavrularının miktarı ve kalitesi birçok faktörden

etkilenir ve sonraki su ürünleri yetiştiriciliği süreci üzerinde derin bir etkiye sahip olacaktır. Mikroplastiklerin su ürünleri yetiştiriciliği türlerinin üremesine etkileri, balık larva sayısını ve kalitesini azaltabilir ve böylece su ürünleri yetiştiriciliğinin ekonomik faydalarını azaltabilir (Wu ve ark., 2023).

2.3. Mikroplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Mikroplastikler, otçulardan etoburlara trofik seviyeler arasında transfer olabilir; bu da mikroplastiklerin besin zincirinde biriktiği ve çoğaldığı anlamına gelir. Su ürünleri, insanların mikroplastik alımı için önemli bir risk kaynağıdır. Mikroplastikler, başlıca besin olarak tüketilen balık türlerinin yaklaşık %80'inde bulunmaktadır (Wu ve ark., 2023). Mikroplastığın su ürünleri tüketimi yoluyla insan vücuduna girme olasılığı da kanıtlanmıştır (Liu ve ark., 2023). Çin'in bazı bölgelerinden gelen ticari türlerdeki MP'lerin sağlık risk seviyeleri, tehlike seviyesi daha yüksekti, Daya Körfezi'nden gelen çift kabuklu yumuşakçalardaki mikroplastiklerin polimer tehlike indeksine (PHI) dayalı potansiyel risk değerlendirmesi II-III risk seviyelerindeydi (R. Li ve ark., 2022) ve her bir kişinin yılda balıklardan yaklaşık $3,3 \times 10^2$ ila 3×10^3 mikroplastik ve kabuklu deniz ürünlerinden yılda yaklaşık $2,6 \times 10^3$ ila $1,6 \times 10^4$ mikroplastik tükettiği tahmin edilmektedir (Senathirajah vd., 2021).

Mikroplastiklerle kirlenmiş su ürünleri ürünlerinin tüketimi insan üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir. Mikroplastikler kimyasal bozulmaya dirençlidir. Yutulması halinde mekanik olarak uzaklaştırılmaya direnç gösterirler; Biyolojik kalıcılıkları ve dozları risklerine yol açan önemli faktörlerdir. Sindirim sistemi üzerine, Tan ve arkadaşlarının çalışması, mikroplastiklerin hem lipid damlacıkları hem de lipazlarla etkileşime girebileceğini doğruladı ve mikroplastiklerin sindirimi ve emilimi etkilediği iki mekanizmayı ortaya koydu: (i) Mikroplastikler, yüksek hidrofobisite nedeniyle büyük lipid-mikroplastik heteroagregatlar oluşturarak lipid damlacıklarının biyoyararlanımını azalttı; ve (ii) Mikroplastikler lipazı adsorbe etti ve ikincil yapıyı değiştirerek ve temel açık konformasyonu bozarak aktivitesini azalttı (Wu ve ar., 2023).

Yapılan çalışmalar, çapı 130 μm 'ye kadar ulaşan mikroplastiklerin, memeli kan damarlarına ve deskuamasyon bölgelerinin villus uçlarındaki lenf düğümlerine nüfuz edebildiğini, ardından iltihaplanma ve bağışıklık tepkisini tetikleyebildiğini göstermiştir (Wright ve Kelly, 2017). Mikroplastikler su

ürünleri davranışını etkileyebilir. Mikroplastikler, su organizmaları tarafından yutulduktan sonra stabil bir şekilde varlığını sürdürür, bu da yalancı tokluk hissine neden olabilir ve su organizmalarının alımını etkileyebilir, hatta gastrointestinal tıkanıklığa bile yol açabilir (Colferai ve ark., 2017). Mikroplastiklerin sindirilememesi, mikroplastikleri yutan balığın sindirim sistemi üzerindeki yükü artıracak, sindirim enzimi aktivitesinin azalmasına ve tripsin ve kimotripsinin artmasına neden olacaktır (Romano ve ark., 2018).

Mikroplastikler kana girdikten sonra hemolize de neden olur. Çalışmalar, çapı 5 µm'den küçük olan PS mikroplastiklerinin, kontrollere kıyasla kana girdikten sonra yaklaşık %4 oranında hemolize neden olabileceğini göstermiştir Wu ve ark., 2023). Vücuda giren mikroplastikler, kan ve lenf dolaşımıyla taşınarak vücudun çeşitli bölgelerine ulaşabilir. Çalışmalar, 2,15 ila 103,27 µm arasında değişen boyutlarda mikroplastiklerin, tam kan ve beyin omurilik sıvısı vb. dahil olmak üzere 11 vücut sıvısında bulunduğunu göstermiştir (Guan ve ark., 2023). Mikroplastikler kana girdikten sonra Dolaşım sistemini etkileyerek kan yoluyla çeşitli organlara ulaşırlar ve böylece insan vücudundaki çeşitli organları etkilerler. Memeli mikroplastiklerinin deneysel çalışması referans olarak kullanılabilir. Sıçanlar tarafından yutulduktan sonra nano polistiren parçacıkları (202–535 nm) akciğerlere girerek akciğer iltihabına neden olur ve 5–110 µm PVC yuttuktan sonra köpeklerin beyinlerinde beyin yumuşaması, mikronekroz ve yara izi gözlemlenmiştir. Mikroplastikler makrofajlar aracılığıyla torasik lenf düğümlerine girebilir ve sistemik dolaşım yoluyla karaciğer, böbrek, dalak, kalp ve beyin dahil olmak üzere ikincil hedef organlara ulaşabilir ve bu organlarda farklı derecelerde olumsuz etkilere neden olabilir. PP, PE, PS ve PU gibi mikroplastikler insan plasentasında ve mekonyumunda da tespit edilmiştir (Wu ve ark., 2023), bu da mikroplastiklerin varlığının gelişmekte olan fetüsler için potansiyel bir sağlık tehdidi oluşturduğunu düşündürmektedir.

Mikroplastiklerdeki bazı katkı maddelerinin insan vücuduna ciddi zararlar verdiği doğrulanmıştır. Üreme toksisitesi (örneğin DEHP ve BPA), kanserojenlik (örneğin vinil klorür ve bütadien) ve mutajenlik (örneğin benzen ve fenol) bunlar arasındadır. Mikroplastikler, HOC'ler ve ağır metaller (kadmium, çinko, nikel ve kurşun gibi) dahil olmak üzere kirleticilerle yüklü olabilir (Wu ve ark., 2023). In vitro çalışmalar, mikroplastiklere yüklenen Cr'nin insan sindirim sistemi ortamındaki salınımının su ortamına göre daha

yüksek olduğunu ve mide fazının en fazla biyoyararlanılabilir Cr (VI) ve Cr (III)'ü uyandırdığını göstermiştir (Liao ve Yang, 2020), bu da insan iç ortamının mikroplastiklere yüklenen kirleticilerin salınımını teşvik ettiği ve mikroplastiklerin oluşturduğu sağlık risklerini artırdığı anlamına gelmektedir.

3. DOĞA TEMELLİ MİKROPLASTİKLERİ AZALTMAYA YÖNELİK ÖNERİLER

Su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarındaki mikroplastiklerin varlığı ve geleceği ciddi endişelere yol açmaktadır. Yeni önerilen bir yaklaşım, doğal biyofiltreler kullanmak, biyolojik bozulmayı teşvik etmek ve mikroplastik kirliliğini ele almak için arıtma sulak alanlarından yararlanmak gibi doğa destekli yöntemleri içermektedir. Doğa temelli çözümler, toplumsal sorunları ele almak hem insan refahını hem de yerel biyoçeşitliliği desteklemek için doğal sistemlerle iş birliği yapmayı ve bunlardan yararlanmayı gerektirir. Bu çözümler kanıtlarla desteklenmekte, geniş çapta uygulanmakta ve ekolojik mekanizmalardan ilham alan veya bu mekanizmalardan desteklenen yenilikçi çevre stratejilerini kapsamaktadır. Mikroplastiklerin biyolojik olarak parçalanması, plastik bazlı atık malzemelerin işlenmesi ve parçalanması için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu teknik, plastik tüketen böceklerin ve mikroorganizmaların polimerleri dimer veya monomer gibi daha küçük birimlere ayrıştırmasını içerir önerilmiştir. Arıtma sulak alanları, atık sudaki kirleticileri ortamdaki uzaklaştırmanın bir yolu olarak görülmektedir (Le ve ark., 2024).

3.1. Ekolojik Önleyici Müdahale

Ekolojik müdahale olarak adlandırılan yöntem, su kalitesini iyileştirmek için büyük ölçekli su bitkilerinin su hızının azaltılması yoluyla kirleticilerin tutulmasını ifade eder. Mangrovlar ve su kamışları ekolojik müdahale için yaygın olarak kullanılan su bitkileridir. Farklı bir ekolojik yöntem ise; mikroplastiklerin doğal çevreye salınımını azaltmada önemli bir yer tutan arıtma sulak alanlarıdır. Bunların haricinde yetiştirme sularının çıkış suyunun filtrasyondan geçmesi faydalı fakat pahalı bir yöntemdir.

Sudaki kirleticiler, fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler yoluyla mangrov bitkilerinde ve mangrovların altındaki topraklarda emilebilir ve birikebilir (Liu ve ark., 2023). Mangrovlar, su ürünleri yetiştiriciliği ortamının

sabit durumunu koruyabilir ve karides çiftçiliğindeki kirlilik seviyelerini azaltabilir. Mangrovun su ürünleri yetiştiriciliğindeki uygulamalarına dayanarak, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğini önleme potansiyeline sahip olduğu düşünülebilir. Araştırmalar, mangrov kenarlarındaki mikroplastik bolluğunun ve lif mikroplastiklerinin oranının, dış alanlardakilerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir (Wu ve ark., 2023). Mangrov bitki yoğunluğu arttıkça, mikroplastikler üzerindeki yakalama etkisi de güçlenir. Ayrıca, mangrovun mikroplastikler üzerinde belirli bir bozulma etkisi de vardır (Wu ve ark., 2023).

Tatlı sular su bitkileri açısından, kamış da mangrov gibi mikroplastiklerin tutulması etkisini göstermiştir. Kamış, su organizmaları için habitat ve besin kaynağı sağladığı ve fiziksel durumu ve biyojeokimyasal döngüleri etkilediği için balık havuzu biyotasının önemli bir parçasıdır (Francova ve ark., 2021). Kamışın mikroplastikler üzerinde belirli bir adsorpsiyon etkisi vardır (Plestenjak vd., 2021). Yao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma (2019), mikroplastiklerin çoğunlukla sazlıkların kenarlarında biriktiğini, yoğun bitki örtüsünün mikroplastikleri yapraklar, kökler veya saz yüzeyine tutunmuş biyofilmler aracılığıyla hapsettiğini belirtmiştir (Wu ve ark., 2023).

Aritma sulak alanları, mikroplastiklerin doğal çevreye salınımını azaltmada önemli bir durum taşımaktadır. Önceki çalışmalar, doğal sulak alanlardaki bitki örtüsü tarafından kökler, yapraklar veya biyofilm şeklinde tutunarak mikroplastiklerin etkili bir şekilde durdurulduğunu gözlemlemiştir (Zhou vd., 2022). Şekil 2'de belirtildiği gibi, yapay sulak alanlardaki mikroplastik parçacıklarını ortadan kaldırmanın baskın yöntemi fiziksel durdurma olabilir. Bu süreç, mikroplastikleri sudan yakalamak ve uzaklaştırmak için bitki/sebze köklerine, substratlara ve bunların biyofilmlerine (substratlar üzerinde oluşurlar) dayanır (Liu ve ark., 2023). Mikroplastik gideriminin etkinliğini değerlendirmek için, sulak alan bitkileri, substratlar, sulak alanlarda yaşayan mikroorganizmalar ve hayvanların bu süreçteki etkisi gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak kapsamlı bir inceleme yapılmıştır (Liu ve ark., 2023). Sonuçlar, makro omurgasızların mikroplastikleri yutma kapasitesine sahip olduğunu ve potansiyel olarak sulak alan ortamında mikroplastiklerin dağılımına katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Bu sebeplerden dolayı, çevre koruma ve ekonomik avantajları nedeniyle ekolojik müdahale, su ürünleri yetiştiriciliği ortamında mikroplastik kirliliğini kontrol etmek için etkili bir yöntemdir. Ancak, su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarının çeşitliliği nedeniyle, belirli su ürünleri yetiştiriciliği alanlarının yakınında uygun su bitki örtüsü bulunmayabilir, bu nedenle bu yöntemin uygulanması yerel çevreyle de sınırlıdır (Wu ve ark., 2023).

3.2. Çevre Dostu Balıkçılık Araçlarının Uygulanması ve Balıkçılık Araçlarının Yönetiminin Güçlendirilmesi

Çeşitli su ürünleri yetiştiriciliği araçları, mikroplastik kaynaklarıdır. Bu nedenle, bu balıkçılık araçlarının üretiminde çevresel malzemelerin kullanılması, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğini azaltma yöntemidir.

İskoçya ve Hollanda'da büyük çiftliklerin plastik balıkçılık araçlarını, midye yetiştiriciliğinde biyolojik olarak parçalanabilir file torbalar gibi malzemelerden yapılmış balıkçılık araçlarıyla değiştirildiği belirtilmiştir. Su ürünleri yetiştiriciliği ortamlarında mikroplastik kirliliğini azaltmaya yardımcı olan yeni nesil dirençli ve biyolojik olarak parçalanabilir monofilament geliştirmiştir. Parçalanabilir plastiklerin de mikroplastik kirliliği riski taşıdığı, ancak su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerine etkilerinin nispeten zayıf olduğu unutulmamalıdır (Wu ve ark., 2023).

Bu aynı zamanda, benzer plastik malzemelerden yapılmış ürünlere alternatif olarak plastik olmayan su ürünleri yetiştirme araç ve tesislerinin kullanılmasının daha iyi olabileceği anlamına da gelir. Su ürünleri yetiştiriciliğinde sıradan plastik olan araçların kullanımı azaltılırken, su ürünleri yetiştiriciliğinde mevcut plastik ürünlerin yönetimi de güçlendirilmelidir. Alınabilecek önlemler arasında mevcut teçhizat takımlarının tasarımının iyileştirilmesi de yer almaktadır.

Çiftliklerde çalışan personel tarafından kullanılan lastik eldivenler, koruyucu giysiler ve tüketilen yiyecek ve içeceklerin ambalajları gibi çeşitli tüketici plastik ürünleri bulunmaktadır (Sandra ve ark., 2019). Su ürünleri yetiştiriciliğinde balıkçılık araçlarının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı da gerekli önlemlerdir. Uygun olmayan balıkçılık araçları geri dönüştürülebilir ve uygun şekillerde yeniden kullanılabilir, böylece su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliği riski azaltılabilir, aynı zamanda plastik atık üretimi

azaltılabilir ve su ürünleri yetiştiriciliği ile uğraşanların korunma istekleri artırılabilir.

3.3. Su Ürünleri Yetiştiriciliği Ürünlerinin Arıtılması ve Ambalajlamanın İyileştirilmesi

Mikroplastik arıtma yöntemlerinin sınırlı etkisi nedeniyle, su ürünleri kaçınılmaz olarak mikroplastikler tarafından kirletilecektir. Kirlenmiş olabilecek su ürünleri için uygulanabilir bir yaklaşım, bunları belirli bir süre saflaştırma için mikroplastikleri sıkı bir şekilde gideren temiz su ortamlarına aktarmaktır.

Bu yöntem, zararlı alg patlamaları gibi su ürünleri üretiminin azaltılması olaylarıyla başa çıkmak için kullanılır (Mardones ve ark., 2021). Havuzlarda saflaştırılmış su ile kirli suyun değiştirilmesiyle su ürünleri ortamını optimize etmek ve su ürünleri kirliliğini azaltmak için de uygulanabilir (Wang ve ark., 2023). Saflaştırma, su ürünleri ürünlerindeki mikroplastik kirliliğini azaltma potansiyelini göstermiştir. Örneğin, yapılan çalışmada, saflaştırmanın çiftlik midyelerindeki mikroplastığın %28,95'ini önemli ölçüde azalttığını tespit edilmiştir (Birnstiel ve ark., 2019).

Su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin ana mikroplastik kirlilik kaynağı olan ambalajlama kaynaklı mikroplastik kirliliğine dikkat edilmelidir. Araştırmalar, mikroplastiklerin plastik ambalajlar yoluyla gıdaları kirletme olasılığına sahip olduğunu görülmüştür (Kedzierski ve ark., 2020). Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri açısından, farklı plastik ambalajların gökkuşağı alabalığı filetolarının kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, polistiren plakalar ve sarılı filmlerle paketlenmiş gökkuşağı alabalığı filetolarında tespit edilen en fazla mikroplastığın lifler, parçalar ve peletler olduğunu göstermiştir (Alak vd., 2021). Bu nedenle, mevcut su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin ambalajlarının iyileştirilmesi de su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerindeki mikroplastik kirliliğini azaltmanın yollarından biridir. Su ürünleri yetiştiriciliğinde halihazırda uygulanan iyileştirmeler arasında istiridyeler için biyolojik olarak parçalanabilen file torbalar, istiridyeler için doğal ahşap tepsiler, vakumlu midyeler için geri dönüştürülmüş modifiye atmosfer torbalar ve somonlar için kompostlanabilir karton balık kutuları vb. yer almaktadır. Geçici olarak iyileştirilemeyen plastik ambalajlar için, plastik miktarını azaltmak üzere tasarım da iyileştirmeler yapılabilir (Wu ve ark., 2023).

4. SONUÇLAR, SINIRLAMALAR ve ÖNERİLER

Mikroplastik kirliliğinin denizel ortamdaki doğal canlılar ile, su ürünleri yetiştiriciliğine olan çok yönlü etkileri, sektörün sürdürülebilirliği açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Mikroplastik kullanımının azaltılması, çevre dostu malzemelerin tercih edilmesi, yemlerde ve ambalajlarda kontaminasyonun engellenmesi ve mikroplastiklerin izlenmesi için düzenli çevre ve biyolojik denetimler gerekmektedir.

Mikroplastikler, balıklar ve diğer su organizmaları tarafından yanlışlıkla yutulabiliyor. Bu da sadece su ürünlerinin kalitesini değil, aynı zamanda onları tüketen insanları da etkileyebilir. Mikroplastiklerin, besin zincirine entegre olmasının, toksik kimyasalların birikmesi ve bu toksinlerin insan vücuduna geçişi açısından bir tehlike oluşturduğuna dair endişeler bulunmaktadır. Özellikle, bazı mikroplastiklerin organik kirleticilerle (örneğin, pestisitler, ağır metaller) birleşerek daha da tehlikeli hale gelmesi söz konusu olabilir.

Bu endişeleri gidermek için bazı çözüm yaklaşımları şunları içerebilir:

1. **Kaynakta Önleme:** Mikroplastiklerin suya girmesinin önlenmesi, en etkili çözüm yollarından biri olabilir. Bu plastik atıkların azaltılması ve geri dönüşüm oranlarının artırılması gibi adımları içerebilir.
2. **Filtrasyon ve Temizleme Teknolojileri:** Su ürünleri yetiştiriciliği alanlarında mikroplastikleri filtreleyebilecek teknolojilerin kullanımı, suyun temizliğini sağlayarak mikroplastiklerin sistemdeki birikmesini engelleyebilir.
3. **Yasalar ve Yönetmelikler:** Mikroplastiklerin su sistemlerine girmesini engellemeye yönelik düzenleyici önlemler ve yasalar güçlendirilmelidir. Bu, su ürünleri yetiştiriciliği endüstrisi için belirli limitler koymayı ve sıkı denetimler yapmayı içerebilir.
4. **Alternatif Malzemeler:** Mikroplastiklere alternatif olan biyo bozunur malzemelerin kullanımı, plastik atıkların çevreye yayılmasını engelleyebilir.
5. **Eğitim ve Farkındalık:** Su ürünleri yetiştiriciliği yapan kişilere ve tüketicilere mikroplastiklerin etkileri hakkında eğitim vererek, çevreye duyarlı bir yaklaşım benimsemeleri sağlanabilir.

Mikroplastikler ve su ürünleri yetiştiriciliği arasındaki ilişki çok karmaşık, ancak bu gibi acil çözümlerle çevresel ve sağlık üzerindeki etkiler en

aza indirilebilir (Le ve ark., 2024; Wu ve ark., 2023; Miao ve ark., 2023; Chen ve ark., 2021).

Su ürünleri yetiştiriciliği balıkçılık araçları, yemler ve ambalajlar su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki mikroplastik kirliliğinin en önemli kaynağıdır. Su ürünleri yetiştiriciliği ortamı için, mikroplastiklerin kirlenmesi su ürünleri yetiştiriciliği ortamının bozulması su ürünleri yetiştiricilik ürünlerinin faydasını azaltacaktır. Su ürünleri yetiştiriciliği ortamındaki mikroplastikler biriktikten sonra doğal su ortamına da salınacak ve daha geniş çevresel risklere neden olacaktır. Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinde oksidatif strese neden olabilir, su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin davranışını, büyümesini ve üremesini etkileyebilir ve hatta su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerinin ölümüne yol açarak su ürünlerinin ekonomik faydalarını azaltabilir. Su ürünleri yetiştiriciliği ürünleri aracılığıyla insan vücuduna giren mikroplastikler, insan sağlığını da birçok düzeyde etkileyecektir (Wu ve ark., 2023).

Bazı ülkeler, su ürünleri yetiştiriciliğinde mikroplastik kirliliğini azaltmak için etkili yöntemler kullanmaktadır. Bu yöntemler arasında mikroplastiklerin ekolojik olarak yakalanması, plastik balıkçılık araçlarının azaltılması veya tamamen kaldırılması ve ürünlerin saflaştırılması yer almaktadır. Ayrıca, uzaktan algılama ve taşınabilir tespit teknolojileri ile mikroplastik tespit sistemlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir. Ülkeler, yasal düzenlemelerle su ürünleri yetiştiriciliği ürünlerindeki mikroplastik limitlerini belirlemeli ve çevre koruma önlemlerini güçlendirmelidir.

Mikroplastikler, su ürünleri yetiştiriciliği sistemlerinde su, tortu ve ürünlerde tespit edilmiştir. Bu kirlilik hem ekolojik hem de ekonomik riskler doğurmaktadır. Bu durum, mikroplastiklerin besin zinciri boyunca insan sağlığına da zarar verebileceği anlamına gelir. Bu riskleri azaltmak için doğa temelli çözümler, örneğin biyofiltreler ve sulak alanların kullanımı önerilmektedir. Gelişmiş izleme ve kontrol teknolojilerine yatırım yapmak. Sıkı izleme ve atık yönetimi ile temiz ve güvenli yetiştirme ortamları sağlamak. Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırarak risk azaltma stratejileri geliştirmek. Toksikolojik araştırmalarla çevresel etkiyi daha iyi anlamak. Düzenleyici yasal çerçeveleri güçlendirerek denetimi artırmak (Le ve ark., 2024; Su ve ark., 2024; Wu ve ark., 2023; Miao ve ark., 2023; Chen ve ark., 2021; Lin ve ark., 2022; Ali ve ark., 2024).

Bu adımlar, mikroplastik kirliliğini kontrol altına alarak su ürünleri yetiştiriciliğinde çevre güvenliğini ve insan sağlığını korumayı amaçlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, A.S., Billah, M.M., Ali, M.M., Bhuiyan, M.K.A., Guo, L., Mohinuzzaman, M., Cai, W., (2023). Microplastics in aquatic environments: a comprehensive review of toxicity, removal, and remediation strategies. *Sci. Total Environ.* 876, 162414.
- Alak, G., Köktürk, M., Atamanalp, M., (2021). Evaluation of different packaging methods and storage temperature on MPs abundance and fillet quality of rainbow trout. *J. Hazard. Mater.* 420, 126573.
- Ali, N., Khan, M. H., Ali, M., Ahmad, S., Khan, A., Nabi, G., ... & Kyzas, G. Z. (2024). Insight into microplastics in the aquatic ecosystem: Properties, sources, threats and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 913, 169489.
- Birnstiel, S., Soares-Gomes, A., da Gama, B.A.P., (2019). Depuration reduces microplastic content in wild and farmed mussels. *Mar. Pollut. Bull.* 140, 241–247.
- Chen, G., Li, Y., Wang, J., (2021). Occurrence and ecological impact of microplastics in aquaculture ecosystems. *Chemosphere* 274, 129989.
- Cole, M., Artioli, Y., Coppock, R., Galli, G., Saad, R., Torres, R., Vance, T., Yunnice, A., Lindeque, P.K., (2023). Mussel power: scoping a nature-based solution to microplastic debris. *J. Hazard. Mater.* 453, 131392.
- Colferai, A.S., Silva, R.P., Martins, A.M., Bugoni, L., (2017). Distribution pattern of anthropogenic marine debris along the gastrointestinal tract of green turtles (*Chelonia mydas*) as implications for rehabilitation. *Mar. Pollut. Bull.* 119, 231–237.
- Devriese, L.I., Van Der Meulen, M.D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L., et al., (2015). Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the southern North Sea and channel area. *Mar. Pollut. Bull.* 98 (1), 179e187.
- Espinosa, C., Beltrán, J.M.G., Esteban, M.A., Cuesta, A., (2018). In vitro effects of virgin microplastics on fish head-kidney leucocyte activities. *Environ. Pollut.* 235, 30–38.
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action*. Rome. 232 pp. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.

- Francova, K., Sumberova, K., Kucerovala, A., Sorf, M., Grill, S., Exler, N., Vrba, J., (2021). Drivers of plant species composition of ecotonal vegetation in two fishpond management types. *Wetl. Ecol. Manag.* 29, 93–110.
- Garrido Gamarro, E., Ryder, J., Elvevoll, E.O., Olsen, R.L., (2020). Microplastics in fish and shellfish e a threat to seafood safety? *J. Aquat. Food Prod. Technol.* 29 (4), 417e425.
- Girard, S., P´erez Ag´undez, J.A., (2014). The effects of the oyster mortality crisis on the economics of the shellfish farming sector: Preliminary review and prospects from a case study in Marennes-Oleron Bay (France). *Mar. Policy* 48, 142–151.
- Guan, Q., Jiang, J., Huang, Y., Wang, Q., Liu, Z., Ma, X., Yang, X., Li, Y., Wang, S., Cui, W., Tang, J., Wan, H., Xu, Q., Tu, Y., Wu, D., Xia, Y., (2023). The landscape of micron-scale particles including microplastics in human enclosed body fluids. *J. Hazard. Mater.* 442, 130138.
- Iheanacho, S., Ogbu, M., Bhuyan, M.S., Ogunji, J., 2023. Microplastic pollution: an emerging contaminant in aquaculture. *Aquaculture and Fisheries* 8 (6), 603–616.
- Jacob, H., Besson, M., Swarzenski, P.W., Lecchini, D., Metian, M., 2020. Effects of virgin micro- and nanoplastics on fish: trends, meta-analysis, and perspectives. *Environ.Sci. Technol.* 54, 4733–4745.
- Jeong, C.-B., Kang, H.-M., Lee, M.-C., Kim, D.-H., Han, J., Hwang, D.-S., Souissi, S., Lee, S.-J., Shin, K.-H., Park, H.G., Lee, J.-S., (2017). Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopina nana*. *Sci. Rep.* 7.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., Bruzard, S., (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packag. Shelf Life* 24, 100489.
- Krüger, L., Casado-Coy, N., Valle, C., Ramos, M., S_anchez-Jerez, P., Gago, J., et al., (2020). Plastic debris accumulation in the seabed derived from coastal fish farming. *Environ. Pollut.* 257, 113336.
- Le, V. G., Nguyen, M. K., Ngo, H. H., Barceló, D., Nguyen, H. L., Um, M. J., & Nguyen, D. D. (2024). Microplastics in aquaculture environments: Current occurrence, adverse effects, ecological risk, and nature-based mitigation solutions. *Marine pollution bulletin*, 209, 117168.

- Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., Rotchell, J.M., (2018). Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environ. Pollut.* 241, 35e44.
- Li, R., Zhu, L., Cui, L., Zhu, Y.-G., (2022). Viral diversity and potential environmental risk in microplastic at watershed scale: Evidence from metagenomic analysis of plastisphere. *Environ. Int.* 161, 107146.
- Liao, Y.-l, Yang, J.-y, (2020). Microplastic serves as a potential vector for Cr in an in-vitro human digestive model. *Sci. Total Environ.* 703, 134805.
- Liu, S., Zhao, Y., Li, T., Hu, T., Zheng, K., Shen, M., Long, H., (2023). Removal of micro/ nanoplastics in constructed wetland: efficiency, limitations and perspectives. *Chem. Eng. J.* 475, 146033.
- Lu, J., Zhang, Y.X., Wu, J., Luo, Y.M., 2019. Effects of microplastics on distribution of antibiotic resistance genes in recirculating aquaculture system. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 184, 109631.
- Lusher, A.L.; Hollman, P.C.H.; Mendoza-Hill, J.J. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 615. Rome, Italy.
- Mardones, J.I., Paredes, J., Godoy, M., Suarez, R., Norambuena, L., Vargas, V., Fuenzalida, G., Pinilla, E., Artal, O., Rojas, X., Dorantes-Aranda, J.J., Lee Chang, K.J., Anderson, D.M., Hallegraeff, G.M., (2021). Disentangling the environmental processes responsible for the world's largest farmed fish-killing harmful algal bloom: Chile, 2016. *Sci. Total Environ.* 766, 144383.
- Marques-Santos, L.F., Grassi, G., Bergami, E., Faleri, C., Balbi, T., Salis, A., et al., (2018). Cationic polystyrene nanoparticle and the sea urchin immune system: biocorona formation, cell toxicity, and multixenobiotic resistance phenotype. *Nanotoxicology* 12 (8), 847e867.
- Miao C, Zhang J, Jin R, Li T, Zhao Y, Shen M. (2023). Microplastics in aquaculture systems: occurrence, ecological threats and control strategies. *Chemosphere.*; 340: 139924.
- Oliveira, M., Ribeiro, A., Hylland, K., Guilhermino, L., (2013). Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). *Ecol. Indic.* 34, 641–647.

- Plestenjak, G., Eler, K., Mihelič, R., Ferlan, M., Ogrinc, N., Krajnc, B., Vodnik, D., (2021). Can additional air supply enhance decomposition processes in sludge treatment reed beds? J. Environ. Manag. 277, 111511.
- Rezania, S., Park, J., Md Din, M.F., Mat Taib, S., Talaiekhosani, A., Kumar Yadav, K., et al., (2018). Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: a review of recent studies. Mar. Pollut. Bull. 133, 191e208.
- Romano, N., Ashikin, M., Teh, J.C., Syukri, F., Karami, A., (2018). Effects of pristine polyvinyl chloride fragments on whole body histology and protease activity in silver barb *Barbodes gonionotus* fry. Environ. Pollut. 237, 1106–1111.
- Sandra, M., Devriese, L., De Raedemaeker, F., Lonneville, B., Lukic, I., Altwater, S., Compa Ferrer, M., Deudero, S., Torres Hansjosten, B., Alomar Mascaró, C., (2019). Knowledge Wave on Marine Litter from Aquaculture Sources. D2. 2 Aqua-Lit Project. Oostende, Belgium
- Schür, C., Rist, S., Baun, A., Mayer, P., Hartmann, N.B., Wagner, M., (2019). When fluorescence is not a particle: The tissue translocation of microplastics in *Daphnia magna* seems an artifact. Environ. Toxicol. Chem. 38, 1495–1503.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., Palanisami, T., (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested—A pivotal first step towards human health risk assessment. J. Hazard. Mater. 404, 124004.
- Shen, M., Zhang, Y., Zhu, Y., Song, B., Zeng, G., Hu, D., et al., (2019). Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: a review. Environ. Pollut. 252, 511–521.
- Shen, M., Zhao, Y., Liu, S., Hu, T., Zheng, K., Wang, Y., et al., (2023). Recent advances on micro/nanoplastic pollution and membrane fouling during water treatment: a review. Sci. Total Environ. 881, 163467.
- Shi, W., Sun, S., Han, Y., Tang, Y., Zhou, W., Zhang, W., Du, X., Huang, L., Liu, G., 2022. Microplastics hamper the fertilization success of a broadcast spawning bivalve through reducing gamete collision and gamete fusion efficiency. Aquat. Toxicol. 242, 106049.

- Song, K., Wang, R., Yang, G., Xie, S., Chen, Y., Yang, F., ... & Feng, Z. (2023). Pollution concerns in mariculture water and cultured economical bivalves: occurrence of microplastics under different aquaculture modes. *Journal of Cleaner Production*, 406, 136913.
- Smith, M., Love, D.C., Rochman, C.M., Neff, R.A., (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports* 5 (3), 375e386.
- Su, Z., Wei, L., Zhi, L., Huang, X., Wang, X., & Wang, J. (2024). Microplastics in aquafeeds: Occurrence, sources, effects and considerations for aquatic food production. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 176, 117760.
- Sui, M., Lu, Y., Wang, Q., Hu, L., Huang, X., & Liu, X. (2020). Distribution patterns of microplastics in various tissues of the Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) and in the surrounding culture seawater. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111595.
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M.E.J., et al., (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 113 (9), 2430e2435.
- Talbot, R., Chang, H., 2022. Microplastics in freshwater: a global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environ. Pollut.* 292, 118393.
- Xiong, X., Xie, S., Feng, K., Wang, Q., 2022. Occurrence of microplastics in a pond-riverlake connection water system: how does the aquaculture process affect microplastics in natural water bodies. *J. Clean. Prod.* 352, 131632.
- Xue, B., Zhang, L., Li, R., Wang, Y., Guo, J., Yu, K., et al., 2020. Underestimated microplastic pollution derived from fishery activities and "hidden" in deep sediment. *Environ. Sci. Technol.* 54, 2210–2217.
- Valencia-Castañeda, G., Ruiz-Fernández, A. C., Frías-Espéricueta, M. G., Rivera-Hernández, J. R., Green-Ruiz, C. R., & Páez-Osuna, F. (2022). Microplastics in the tissues of commercial semi-intensive shrimp pond-farmed *Litopenaeus vannamei* from the Gulf of California ecoregion. *Chemosphere*, 297, 134194.
- Von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., K€ohler, A., (2012). Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L.

- After an experimental exposure. *Environ. Sci. Technol.* 46 (20), 11327e11335.
- Yin, L., Chen, B., Xia, B., Shi, X., Qu, K., (2018). Polystyrene microplastics alter the behavior, energy reserve and nutritional composition of marine jacobever (Sebastes schlegelii). *J. Hazard. Mater.* 360, 97–105.
- Wan, Z., Wang, C., Zhou, J., Shen, M., Wang, X., Fu, Z., Jin, Y., 2019. Effects of polystyrene microplastics on the composition of the microbiome and metabolism in larval zebrafish. *Chemosphere* 217, 646–658.
- Wang, X. (2023). A review of microplastic pollution in aquaculture: Sources, effects, removal strategies and prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, 114567.
- Wright, S.L., Kelly, F.J., (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environ. Sci. Technol.* 51, 6634–6647.
- Wu, H., Hou, J., Wang, X., (2023). A review of microplastic pollution in aquaculture: sources, effects, removal strategies and prospects. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 252, 114567.
- Zhou, W., Han, Y., Tang, Y., Shi, W., Du, X., Sun, S., Liu, G., (2020). Microplastics aggravate the bioaccumulation of two waterborne veterinary antibiotics in an edible bivalve species: Potential mechanisms and implications for human health. *Environ. Sci. Technol.* 54, 8115–8122.

BÖLÜM 4

ATIKSULARDAKİ MİKROPLASTİKLERİN TARIM VE HAYVANCILIK EKOSİSTEMLERİ İLE ETKİLEŞİMİ VE YÖNETİMİ

Dr. Saliha DİRİM BUHAN¹
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN²
Prof. Dr. Arda YILDIRIM³

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048014>

¹ Tokat Niksar Belediyesi, Etüt Proje Müdürlüğü, Niksar/Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0009-0002-2413-8867, E-posta: ceddirim@hotmail.com

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Hayvan Yetiştirme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-4338-1758, E-posta: ekrem.buhan@gop.edu.tr

³ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID:0000-0002-5876-4228, E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

GİRİŞ

Plastikler, sunduğu benzersiz özellikler nedeniyle modern toplumun ve çok sayıda endüstrinin temel malzemelerinden biri haline gelmiştir. Ancak, üretim ve tüketimdeki üssel artış, plastikleri küresel atığın en büyük bileşenlerinden biri yapmıştır. Küresel plastik üretiminin 2060 yılında yaklaşık 1.2 milyar tona ulaşması beklenmektedir (OECD, 2024). Mevcut doğrusal ekonomi modelinde, plastiklerin büyük kısmı kısa ömürlü ürünlerde kullanılmakta ve etkin bir şekilde yönetilememektedir. Küresel olarak, plastik atığın yalnızca %9'u geri dönüştürülürken, %22'si kontrolsüz bir şekilde çevreye karışmaktadır (OECD, 2022). Bu durum, plastik kirliliğini bilim insanları ve politika yapımcılar için en ciddi çevresel zorluklardan biri haline getirmiştir (UNEP, 2022).

Çevrede biriken plastik atıklar, fiziksel ve kimyasal süreçlerle zamanla parçalanarak mikroplastik (MP, <5 mm) ve nanoplastik (NP, <0,1 µm) olarak adlandırılan daha küçük partiküllere dönüşmektedir (Andrady, 2015). MP/NP'ler artık deniz, tatlı su, toprak ve hava dahil tüm ortamlarda yaygın olarak bulunmakta ve gıda zincirlerine dahil olmaktadır. Bu partiküller yalnızca fiziksel varlıklarıyla değil, aynı zamanda üretimleri sırasında eklenen veya ortamdan adsorbe ettikleri toksik katkı maddeleri ve kirleticiler (örn. ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler) vasıtasıyla da risk oluşturmaktadır (Rochman ve ark., 2013). Tahminlere göre, plastik eşyalarda ve atıklarda 16.000'den fazla farklı kimyasal bulunmakta ve bunların en az 4.200'ü toksik özellik göstermektedir (NUST, 2024).

Tarım ve hayvancılık sektörleri, küresel plastik tüketiminde ve MP kirliliğinin yayılımında önemli bir rol oynamaktadır. Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2023), tarımda yılda en az 12,5 milyon ton plastik kullanıldığını ve bunun büyük kısmının tek kullanımlık olduğunu tahmin etmektedir. Plastik malç filmleri, sera örtüleri, sulama boruları, yem torbaları ve silaj örtüleri gibi ürünler doğrudan MP kaynaklarıdır (Bläsing ve Amelung, 2018). Özellikle tarım topraklarında plastik malç filmlerinin parçalanması sonucu yüksek MP birikimleri gözlemlenmektedir (Li ve ark., 2022). Dolaylı olarak, tarım arazilerine uygulanan atık su arıtma çamuru, kompost ve kanalizasyon çamurları da önemli MP kaynaklarıdır (Nizzetto ve ark., 2016). Atık su arıtma tesisleri (AAT'ler), MP'ler için önemli bir havuz görevi görür; ancak konvansiyonel arıtma prosesleri MP'leri tamamen uzaklaştırmada yetersiz

kalmaktadır. AAT'lerde tutulan MP'lerin %90'a varan kısmı çamurda birikir ve bu çamurun tarımda kullanılmasıyla toprağa taşınır (Mason ve ark., 2016). Ayrıca, arıtılmış suyun deşarjı ve hayvancılık atık sularının kontrolsüz kullanımı, MP'lerin yüzey ve yeraltı sularına karışmasına neden olmaktadır (Wang ve ark., 2020).

Çiftlik hayvanları, kontamine yem, su ve toprak yoluyla MP/NP'lere maruz kalmakta, bu da hayvan sağlığı ve verimliliği üzerinde endişe yaratmaktadır (Urii ve ark., 2023; Corte Pause ve ark., 2024). Daha da önemlisi, bu maruziyet, et, süt ve yumurta gibi insan tüketimine yönelik gıda ürünlerinin güvenliği açısından potansiyel riskler taşımaktadır (Safaei ve ark., 2021). MP'lerin sucul organizmalar üzerinde fiziksel hasar, besin alımında azalma ve patojen taşınımı gibi olumsuz etkileri belgelenmiştir (Aragaw, 2021). Geviş getirenler, balık ve kümes hayvanları dahil çiftlik hayvanlarının ve insanların besin zincirinin en üstünde yer alması nedeniyle, sudaki, havadaki veya topraktaki herhangi bir kirlilik sonunda çiftlik hayvanlarına ve oradan da insanlara aktarılabilir (Lackner ve Branka, 2024). Bu partiküller ayrıca hayvanların karaciğer, böbrekler, akciğer, dalak, kalp, yumurtalıklar ve testisleri gibi diğer organlarda da gözlemlenmiş olup, bu durum biyokimyasal değişikliklere, yapısal tahribata ve işlev bozukluğuna neden olmaktadır (Lackner ve Branka, 2024). Hem karasal hem de sucul çiftlik hayvanları, küresel gıda güvenliği için son derece önemli olup, insanlara protein ve diğer besinleri sağlamaktadır. Çiftlik hayvanlarının toplam küresel pazar değeri 1,61 ila 3,3 trilyon ABD Doları arasında değişmektedir (Schwabl ve ark., 2019).

Bu küresel tehditle mücadele için, MP'lerin bertarafı ve yönetimine yönelik stratejilere ihtiyaç vardır. Bertaraf teknolojileri arasında termal bozunma, fotokatalitik bozunma ve biyobozunma gibi yöntemler ümit vaat etse de (Uheida ve ark., 2021), her birinin teknik ve ekonomik zorlukları bulunmaktadır. Plastik birikimi ve parçalanmasının, hem karasal hem de sucul ekosistemlerde biyolojik çeşitlilik ve ekosistem işleyişi üzerinde zararlı etkileri küresel olarak kabul edilmektedir (Duis ve Coors, 2016). Plastikler okyanusların en uzak noktalarına kadar ulaşmıştır (Kane ve ark., 2020). MP'lerin küçük boyutu, kaynaklarının izlenmesini ve ortamdaki uzaklaştırılmasını zorlaştırmakta, bu da en etkili azaltma stratejilerinin kaynağında girdiyi kesmeyi gerektirdiğini göstermektedir (Jambeck ve ark.,

2015). Bu artan farkındalık, Avrupa Birliği'nin Sıfır Kirlilik Eylem Planı gibi politikalara yansımış ve 2030'a kadar denizlerdeki mikroplastik çöplerde %50, çevreye salınımında ise %30 azalma hedefleri konmuştur (EC, 2021). Benzer şekilde, Birleşmiş Milletler Çevre Asamblesi (UNEA), plastiğin tüm yaşam döngüsünü ele alan yasal bağlayıcılığı olan uluslararası bir anlaşma geliştirilmesi çağrısında bulunmuştur (UNEP, 2022). Plastik atık yönetiminde, azaltma, yeniden kullanım ve etkin geri dönüşümü içeren döngüsel ekonomi yaklaşımları anahtar rol oynamaktadır (Al-Salem ve ark., 2009).

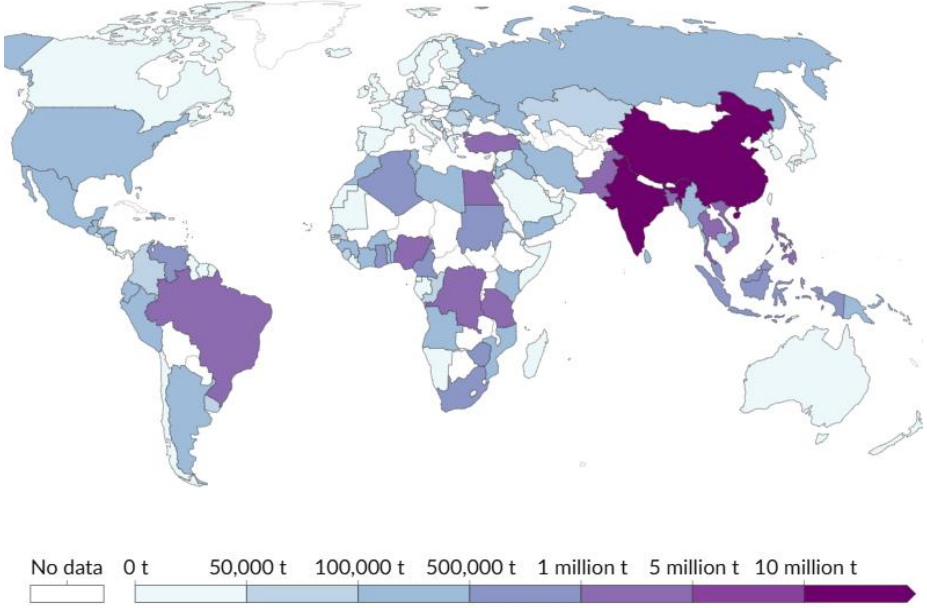
Bu derleme, mikroplastik kirliliğini, özellikle tarım-hayvancılık sektörü ve atık su arıtma tesisleri ekseninde ele almakta; mikroplastikleri her yönü ile tanıtarak; çevresel taşıyım yollarını bilimsel bir perspektifle incelemektedir. Ayrıca, mevcut bertaraf teknolojilerini, yönetim stratejilerini ve yasal çerçeveleri analiz ederek, bu küresel sorunla mücadelede kapsamlı ve bütünleşik bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır.

1. MİKROPLASTİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

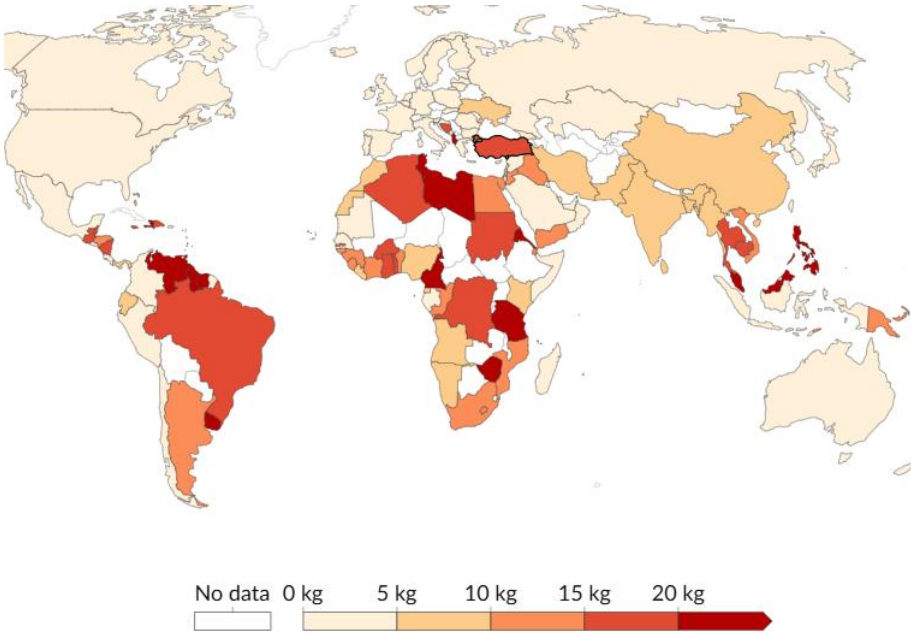
1.1. Küresel Plastik Üretimi ve Mikroplastik Oluşumu

Küresel plastik üretimi 1950 yılında yıllık 2 milyon ton iken, 2015 yılında 381 milyon tona ulaşarak yaklaşık 200 kat artmıştır (Law, 2017). Üretilen plastiklerin sadece %21'i geri dönüştürülmekte, geri kalanı çevresel koşullar altında parçalanarak mikroplastik oluşumuna katkıda bulunmaktadır (Law, 2017). Birincil mikroplastikler, kozmetiklerdeki mikrobuncuklar gibi doğrudan küçük boyutlarda üretilirken; ikincil mikroplastikler, büyük plastik atıkların UV radyasyonu, mekanik aşınma ve biyolojik bozunma gibi süreçlerle parçalanması sonucu oluşmaktadır. Her yıl yaklaşık 3 milyon ton birincil mikroplastığın küresel çevreye salındığı tahmin edilmektedir (UNEP, 2018). Ayrıca, kötü yönetilen plastik atıkların parçalanmasıyla yılda 5,3 milyon ton ikincil mikroplastik oluştuğu bildirilmiştir (UNEP, 2018). Deniz plastik kirliliğinin ekonomik maliyetinin 2040 yılına kadar 100 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (UNEP, 2016). Bu maliyet, turizm, balıkçılık, deniz taşımacılığı ve atık yönetimi gibi sektörleri doğrudan etkilemektedir (UNEP, 2016). Ayrıca, mikroplastik kirliliğinin ekosistem servislerine verdiği zarar da ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Beaumont ve ark., 2019).

Plastikler, esneklik, dayanıklılık ve düşük maliyet gibi özellikleri nedeniyle 1950'lerden itibaren seri üretimle birlikte küresel ölçekte yaygın olarak kullanılan sentetik polimerlerdir (Geyer ve ark., 2017). "Plastik" terimi, Yunanca "şekillendirilebilir" anlamına gelen "plastikos" kelimesinden türemiştir (Chae ve An, 2018). Küresel plastik üretimi 1950'de 2 milyon ton iken, bu miktar 2015'te 381 milyon tona, 2019'da ise 460 milyon tona ulaşmıştır; 2060 yılında 1.2 milyar tona çıkması beklenmektedir (Geyer ve ark., 2017). Ancak plastiklerin çevrede kalıcı olması ve kolayca parçalanmaması ciddi bir kirlilik sorununa yol açmış, her yıl yaklaşık 8-12.7 milyon ton plastik atığın okyanuslara karıştığı tahmin edilmektedir (Jambeck ve ark., 2015). Şekil 1 ve 2 ülkelerin plastik salınımını göstermektedir.



Şekil 1. Ülkelere göre kötü yönetilen (denizlere veya açık sulara dökülen veya sağlıksız çöplüklerde bertaraf edilen) plastik atık miktarları. Veri kaynağı: Meijer ve ark. (2021) OurWorldinData.org/plastik-kirliliği



Şekil 2. Kişi başına kötü yönetilen plastik atık miktarı, Veri kaynağı: Meijer ve ark. (2021), OurWorldinData.org/plastik-kirliliği

1.2. Mikroplastik Kavramının Ortaya Çıkışı

Bu makroplastik atıkların çevresel koşullar altında parçalanmasıyla ortaya çıkan daha küçük parçacıklar, bilimsel literatürde ilk kez 2004 yılında Thompson ve arkadaşları tarafından "mikroplastik" olarak terimleştirilmiştir (Thompson ve ark., 2004). Mikroplastikler (MP'ler), çapı veya en uzun boyutu 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklar olarak tanımlanır (Thompson ve ark., 2004; Cole ve ark., 2011). Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından "deniz çöpu" kapsamında değerlendirilselerde, mikroplastikler; 5 mm'den küçük boyut, katı hal, suda çözünmezlik, bozunmaya direnç ve plastisite gibi benzersiz özellikleriyle geleneksel deniz çöpu'nden ayrılırlar (Cole ve ark., 2011). Bu özellikler, onları deniz ortamında yeni ve önemli bir kirlenici sınıfı haline getirmektedir (El-Jourbagy ve ark., 2021). Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) deniz çöpu'nü "deniz ve kıyı ortamında atılan, bertaraf edilen veya terk edilen her türlü kalıcı, üretilmiş veya işlenmiş katı malzeme" olarak tanımlar ve mikroplastikler de bu kapsamda değerlendirilir (Cole ve ark., 2011).

Nanoplastikler (NP'ler) ise en az bir boyutu 100 nm'den küçük olan plastik parçacıkları ifade eder ve mikroplastiklerden daha küçük bir fraksiyonu temsil ederler (Koelmans ve ark., 2015). Biyolojik zarlardan geçme potansiyelleri nedeniyle özellikle endişe verici olmakla birlikte, tespit edilmelerindeki zorluklar nedeniyle araştırmaları daha sınırlıdır.

1.3. Mikroplastiklerin Sınıflandırması

Mikroplastikler kaynak, boyut, şekil (morfoloji) ve polimer tipi gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir;

1.3.1. Kaynağına Göre Sınıflandırma

- **Birincil (Primer) Mikroplastikler:** Doğrudan mikroskobik boyutlarda (<5 mm) üretilerek çevreye salınan parçacıklardır. Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerindeki mikroboncuklar, temizlik ürünlerindeki aşındırıcılar ve endüstriyel hammadde peletleri (nurdles) bu gruba örnektir (Fendall ve Sewell, 2009).
- **İkincil (Sekonder) Mikroplastikler:** Makroplastiklerin ultraviyole (UV) radyasyonu (fotobozunma), fiziksel aşınma, hidroliz ve biyolojik bozunma gibi çevresel koşullar altında parçalanması sonucu oluşurlar (Eriksen ve ark., 2014). Denizel plastik kirliliğinin büyük çoğunluğunu temsil ederler (Boucher ve Friot, 2017). Sentetik tekstil lifleri, lastikler ve plastik ambalaj atıklarının parçalanması önemli ikincil mikroplastik kaynaklarıdır.



Şekil 3. Mikroplastiklerin Kaynakları: Birincil kaynakların doğrudan deşarjı ve makroplastik atıkların parçalanmasıyla oluşan dolaylı oluşumlar sonucu elde edilen MP'ler ikincil kaynağı oluşturur (Borah ve ark.,2023)

1.4. Boyutuna Göre Sınıflandırma.

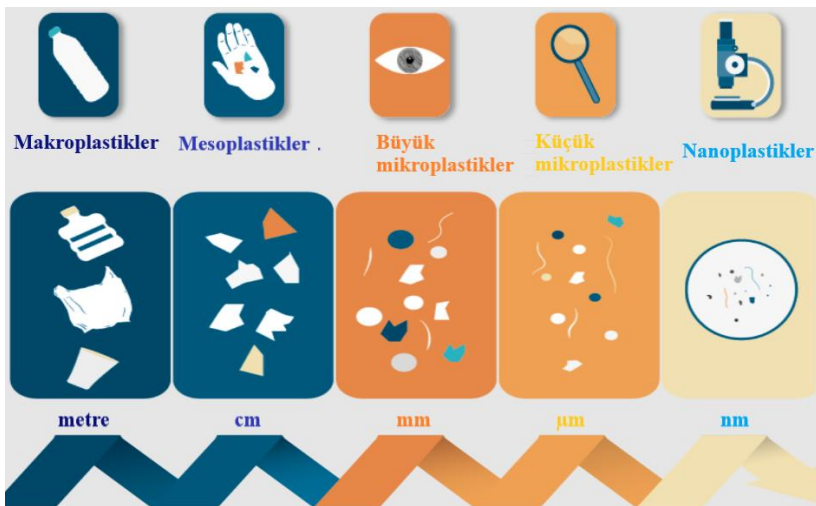
Plastik atıklar, çevresel davranışlarını ve etkileşimlerini belirleyen temel bir parametre olan boyutlarına göre sınıflandırılır (Barnes ve ark., 2009; Enyoh ve ark., 2023). Yaygın kabul gören sınıflandırma şu şekildedir:

- **Megaplastikler:** >100 cm (veya >1 m)
- **Makroplastikler:** 5 mm - 100 cm (veya 20-100 mm)
- **Mezoplastikler:** 5 mm - 2.5 cm (veya 5-20 mm)
- **Mikroplastikler:** 1 μ m - 5 mm
- **Nanoplastikler:** 1 nm - 1 μ m (veya <100 nm).

Boyut sınıflandırması literatürde farklılık gösterebilmekle birlikte, mikroplastığın üst sınırı olan 5 mm yaygın kabul görmektedir.

Tablo 1: Mikroplastik boyut sınıflaması türleri ve özellikleri (Paul ve ark., 2020).

Sınıf	Boyut Aralığı	Örnek Kaynaklar	Ana Özellikler
Nanoplastik	< 0.1 μ m	Kozmetikler, aşınmış büyük plastikler	Hücrelere nüfuz edebilir, tespiti zor
Mikroplastik	0.1 μ m – 5 mm	Mikroboncuklar, sentetik lifler, parçalanma	Su ve toprakta yaygın, besin zincirine girer
Mesoplastik	5 – 25 mm	Plastik şişe parçaları, ambalaj atıkları	Gözle görülebilir, fiziksel etkileri var
Makroplastik	> 25 mm	Plastik torbalar, şişeler, balık ağıları	Gözle görülür, parçalanma kaynağı



Şekil 4. Mikroplastiklerin boyutlarına göre sınıflaması (NOC, 2025).

1.5. Şekline (Morfolojisine) Göre Sınıflandırma

Mikroplastikler, görünümlerine ve kökenlerine göre çeşitli şekillerde bulunur (Chatterjee ve Sharma, 2019; Yu ve Singh, 2023);

- **Lifler (Fiberler):** Sentetik tekstillerin (polyester, naylon, akrilik) yıkanması veya aşınması ile veya balıkçılık ağları/iplerinin parçalanması sonucu oluşan ince, iplik benzeri parçacıklardır. Birçok deniz ve kıyı bölgesinde en bol bulunan morfoloji tipidir (Zhao ve ark., 2014).
- **Parçalar (Fragmanlar):** Sert plastik ürünlerin (şişeler, kapaklar, kaplar) kırılması ve ufalanması ile oluşan düzensiz şekilli parçacıklardır (Sun ve ark., 2018).
- **Filmler:** İnce plastik poşetler veya ambalajların parçalanması sonucu oluşan ince tabakalar.
- **Peletler/Nurdles:** Plastik üretiminin hammaddesi olan, genellikle silindirik veya küresel şekilli küçük granüllerdir. Üretim veya nakliye sırasındaki sızıntılarla çevreye karışırlar (Sherrington ve ark., 2016).
- **Köpükler (Strafor):** Polistiren (PS) bazlı köpük malzemelerin parçalanmasıyla oluşan hafif, gözenekli parçacıklardır (Cordova ve ark., 2019).
- **Mikroboncuklar:** Özellikle peeling ürünlerinde ve kozmetiklerde kullanılan, genellikle küresel şekilli, kasıtlı olarak üretilmiş parçacıklardır (Fendall ve Sewell, 2009).

1.6. Polimer Tipine Göre Sınıflandırma

Plastikler, kimyasal yapılarına (polimer tipine) göre de sınıflandırılır. En yaygın bulunan mikroplastik polimerleri, küresel üretimin büyük kısmını oluşturan türlerdir (Phuong ve ark., 2016):

- **Polietilen (PE):**

En yaygın plastiktir. Düşük yoğunluklu (LDPE) ve yüksek yoğunluklu (HDPE) formları vardır. Poşetler, şişeler, filmler.

- **Polipropilen (PP):**

Otomotiv parçaları, ambalajlar, sentetik halılar.

- **Polistiren (PS):**

Tek kullanımlık kaplar, köpükler (strafor), ambalaj malzemeleri.

- **Polietilen Tereftalat (PET):**

İçecek şişeleri, tekstil elyafları (polyester).

- **Polivinil Klorür (PVC):**

Borular, pencere profilleri, kablo izolasyonları.

- **Poliüretan (PU):**

Köpükler, yalıtım malzemeleri, kaplamalar.

Her bir polimer tipi, yoğunluk, yüzey yapısı, hidrofobisite ve bozunma direnci gibi farklı fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Bu özellikler, mikroplastığın çevredeki davranışını, taşınımını, kirletici adsorplama kapasitesini ve biyolojik etkileşimlerini doğrudan etkiler (Enyoh ve ark., 2025). Örneğin, PE ve PP deniz suyundan daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için su yüzeyinde yüzer ve uzun mesafelere taşınabilir. PVC ve PS ise daha yoğun olduğu için çökme eğilimindedir (Horton ve Dixon, 2018).

1.7. Mikroplastiklerin Temel Özellikleri

Mikroplastiklerin çevresel etkilerini belirleyen başlıca özellikleri şunlardır:

- **Kalıcılık:** Geleneksel plastikler doğada yüzlerce yıl bozunmadan kalabilir (Chamas ve ark., 2020).
- **Hidrofobisite:** Plastik yüzeyler suyu sevmez, bu da hidrofobik kirleticileri (Kalıcı Organik Kirleticiler - KOK'lar, ağır metaller) yüksek konsantrasyonlarda adsorbe etmelerine olanak tanır (Hirai ve ark., 2011).
- **Taşınabilirlik:** Küçük boyut ve hafiflik, onların rüzgar, akıntı ve nehirlerle çok uzak mesafelere taşınmasını sağlar (Cózar ve ark., 2014).
- **Biyoyararlanım:** Boyutları ve şekilleri nedeniyle çok çeşitli deniz organizmaları (planktondan balinalara kadar) tarafından yanlışlıkla besin sanılarak yutulabilirler (Browne ve ark., 2008).

2. MİKROPLASTİKLERİN ÇEVRESEL DAVRANIŞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Mikroplastiklerin kaynaklardan uzak bölgelere taşınması ve çevredeki dağılımı birçok faktöre bağlıdır:

- **Partikül Özellikleri:** Boyut (daha küçük parçacıklar daha uzun süre askıda kalır), şekil (lifler küresel parçacıklara göre farklı davranır), yoğunluk ve yüzey kimyası (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012).
- **Çevresel Koşullar:** Akıntı hızları, dalga enerjisi, rüzgar hızı ve yönü, su sıcaklığı, tuzluluk ve türbülans (Kooi ve ark., 2017).
- **Biyofouling:** Mikroorganizmaların ve diğer organizmaların mikroplastik yüzeyinde oluşturduğu biyofilm, partikülün yoğunluğunu, yüzey kimyasını ve agregasyon eğilimini değiştirir, bu da taşınımını ve biyoyararlanımını etkiler (Kaiser ve ark., 2017).
- **Agregasyon:** Mikroplastiklerin doğal organik materyaller (alg, sediment, organik döküntü) ile bir araya gelerek daha büyük agregatlar oluşturması, batma hızını artırabilir ve organizmalar tarafından farklı şekillerde algılanmalarına neden olabilir (Long ve ark., 2017).
- **Yoğunluk ve Davranış İlişkisi:** Yoğunluk statik değildir. Mikroplastiklerin yüzeyinde alg, bakteri ve diğer organik materyallerin birikmesi (biyofouling) yoğunluğu artırarak batma hızını etkileyebilir (Kaiser ve ark., 2017). Ayrıca, fotooksidasyon ve aşınma gibi çevresel yaşlanma süreçleri, plastiğin fizikokimyasal özelliklerini değiştirerek yoğunluğu ve hidrofobitesini etkileyebilir (Liu ve ark., 2019).

Polimer tipine bağlı yoğunluk, mikroplastığın su kolonundaki davranışını ve nihai kaderini belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012; Plastics Europe, 2024).

Tablo 2. Polimer tipine bağlı yoğunluk, su kolonundaki davranışını (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012; Plastics Europe, 2024).

Polimer Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Su Kolonundaki Davranış	Birikim Alanı
Polipropilen (PP)	0.85 – 0.92	Yüzeyde yüzer	Yüzey suları, kıyı şeridi
Polietilen (PE)	0.91 – 0.96	Yüzeyde yüzer	Yüzey suları, kıyı şeridi
Polistiren (PS)	1.04 – 1.08	Askıda kalır/ yavaş batar	Su kolonu, yüzey altı
PET	1.38 – 1.41	Batar	Bentik sedimentler
PVC	1.16 – 1.58	Hızlı batar	Bentik sedimentler

3. MİKROPLASTİKLERİN ÇEVRESEL YAYILIM VE TAŞINIM YOLLARI

Mikroplastikler, kaynaklarından çıktıktan sonra karmaşık fiziksel süreçlerle farklı çevresel kompartımanlar arasında hareket eder. Taşınım, birincil olarak su (yüzey akışı, nehir akışı, okyanus akıntıları) ve atmosfer yoluyla gerçekleşir.

3.1. Nehir Sistemleri ve Tatlı Su Taşınımı

Nehirler, karasal mikroplastiklerin okyanuslara taşınmasında ana arterlerdir (Lebreton ve ark., 2017). Dünya genelindeki nehirlerin her yıl 1,15-2,41 milyon ton plastiği denizlere taşıdığı tahmin edilmektedir. Taşınan miktar, nehrin debisi, havza nüfusu, arazi kullanımı ve atık yönetimi altyapısı gibi faktörlere bağlıdır (Meijer ve ark., 2021). Asya'daki büyük nehirler (Ganj, Yangtze, Indus, Sarı Irmak) küresel nehir kaynaklı plastik taşınımının yaklaşık %86'sından sorumludur (Lebreton ve ark., 2017). Nehirlerdeki mikroplastikler, su kolonunda asılı kalabilir, yüzeyde yüzebilir veya sedimentlere çökebilir. Dinamik nehir ortamında çökme, yeniden askıya alınma ve birikme süreçleri sürekli olarak gerçekleşir.

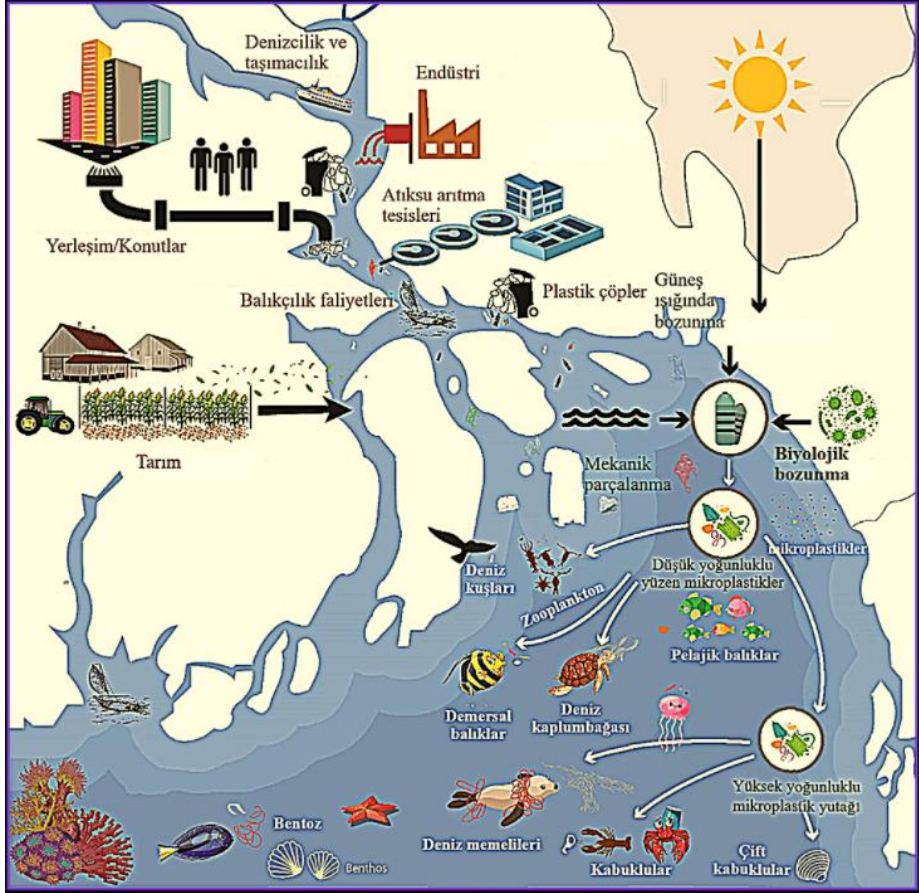
3.2. Kıyı ve Deniz Taşınım Dinamikleri

Mikroplastikler denize ulaştıktan sonra, okyanus akıntıları, dalgalar, gelgitler ve rüzgar gibi fiziksel kuvvetlerle hareket eder. Yüzey akıntıları (örneğin, Gulf Stream, Kuroshio Akıntısı) ve rüzgar, düşük yoğunluklu plastikleri (PE, PP) uzun mesafelere taşıyarak açık okyanusta "çöp yamalarının" (Great Pacific Garbage Patch gibi) oluşumuna katkıda bulunur (Lebreton ve ark., 2018). Yüksek yoğunluklu plastikler (PVC, PET) ise su kolonunda batarak veya sedimentlere çökerek bentik bölgede birikir ve derin deniz ekosistemlerini etkiler (Woodall ve ark., 2014).

3.3. Biyotik Taşınım ve Biyo-turbasyon

Deniz organizmaları, mikroplastiklerin dikey ve yatay taşınımında rol oynayabilir. Örneğin, filtrasyon yapan organizmalar (midye, balina köpekbalığı) su kolonundan mikroplastikleri alır ve feçes veya ölüm sonrası çökme yoluyla farklı derinliklere taşıyabilir (Cole ve ark., 2013). Benzer şekilde, göç eden türler (balıklar, deniz kuşları) plastikleri yuttuktan sonra

farklı bölgelere taşıyabilir. Ayrıca, bentik organizmaların (solucanlar, kabuklular) sediment içindeki hareketleri (biyo-turbasyon), mikroplastiklerin sediment içinde yeniden dağılımına neden olabilir (Huerta Lwanga ve ark., 2017).



Şekil 5. Mikroplastiklerin çeşitli yollarla su yollarına ve denize ulaşımı ve canlılara transferi (Bhuyan ve ark., 2025).

3.4. Atmosferik Kaynaklar ve Uzun Mesafe Taşınımı

Atmosfer, mikroplastiklerin kaynaktan uzak bölgelere taşınmasında kritik bir rol oynar. Sentetik tekstil lifleri, lastik aşınma parçacıkları ve diğer hafif plastik parçacıklar rüzgarla uzun mesafelere taşınabilmekte ve kuru veya ıslak çökme (yağmur, kar) yoluyla karasal ve sucul ekosistemlere birikebilmektedir (Dris ve ark., 2016). Örneğin, Paris metropol alanında atmosferik birikim yoluyla yılda 2-10 ton mikroplastik (ağırlıklı olarak lif)

depolandığı tahmin edilmektedir (Dris ve ark., 2016). Bu mekanizma, mikroplastik kirliliğinin insandan uzak, korunaklı alanlara ve hatta kutup bölgelerine kadar ulaşmasını açıklamaktadır (Bergmann ve ark., 2017).

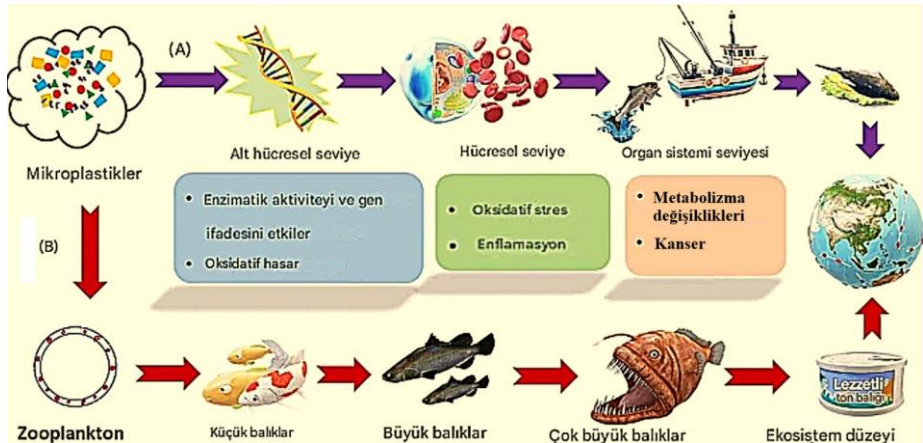
3.5. Çevresel Kompartmanlar Arasındaki Değişimler

Mikroplastikler, atmosfer, su kolonu, sediment ve biota arasında sürekli bir değişim halindedir. Bu değişimler, fiziksel (rüzgar, akıntı), kimyasal (yaşlanma, çözünme) ve biyolojik (yutma, biyofouling) süreçler tarafından yönlendirilir (Şekil 6).

Atmosfer-Su Değişimi: Kuru çökme ve yağışla atmosferden su yüzeyine inen mikroplastikler, dalga etkisiyle tekrar aerosol haline gelebilir (Allen ve ark., 2022).

Su-Sediment Değişimi: Batma ve çökme yoluyla su kolonundan sedimente geçen mikroplastikler, bentik faaliyetler, balıkçılık (trawl) veya şiddetli dalgalar nedeniyle tekrar askıya alınabilir (re-süspansiyon) (Zhang, 2017).

Biota-Su/Sediment Değişimi: Organizmalar tarafından yutulan mikroplastikler, sindirim sistemi içinde kalabilir, dışkı yoluyla tekrar çevreye salınabilir veya organizma öldüğünde dokularından ayrılarak sedimente karışabilir (Setälä ve ark., 2014).



Şekil 6. MP akış yolunu gösteren çizim: (a) MP'nin moleküler seviyeden ekosistem seviyesine taşınması ve (b) MP'nin alt trofik seviyelerden üst trofik seviyelere alınması (Borah ve ark.,2023)

4. MİKROPLASTİKLERİN KAYNAKLARI

Mikroplastik kirliliği, çok sayıda insan faaliyetinden kaynaklanan karmaşık bir sorundur. Kaynaklar genel olarak **karasal denizel** ve **atmosferik** olarak sınıflandırılabilir.

4.1. Karasal Kaynaklar

Karasal kaynaklar, mikroplastiklerin deniz ortamına girişinde en büyük paya sahiptir; deniz çöpünün yaklaşık %80'inin karasal faaliyetlerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Jambeck ve ark., 2015).

4.1.1. Evsel ve Kentsel Atık Sular

Evsel atık sular, sentetik tekstil lifleri (çamaşır yıkama), kişisel bakım ürünlerindeki mikroboncuklar ve diğer plastik kökenli parçacıklar açısından zengindir (Mason ve ark., 2016). Geleneksel atık su arıtma tesisleri (AAT), mikroplastiklerin tamamını giderememekte ve özellikle 0,02 mm'den küçük parçacıklar arıtılmış su ile alıcı ortamlara deşarj edilmektedir (Iyare ve ark., 2020). AAT'lerde uzaklaştırılan mikroplastiklerin büyük kısmı ise arıtma çamurunda (biyokatı) birikmekte ve bu çamurun tarım arazilerinde gübre olarak kullanılmasıyla toprağa ve dolaylı olarak su kaynaklarına karışmaktadır (Nizzetto ve ark., 2016).

4.1.2. Endüstriyel Deşarjlar

Plastik üretim tesisleri, pelet (nurdle) ve toz formunda mikroplastik kaybına neden olabilmektedir (Kim ve ark., 2017). Örneğin, Tuna Nehri üzerindeki bir endüstriyel tesisin yılda 94,5 ton mikroplastik salınımı yapabileceği ve bunun nehrin Karadeniz'e toplam plastik ihracatının %6'sından fazlasına denk gelebileceği belirtilmiştir (Lechner ve ark., 2014).

4.1.3. Katı Atık Sahaları ve Atık Yönetimi

Yetersiz atık yönetimi, plastik atıkların çevreye sızmasının ana nedenidir. Düzensiz depolama alanları, rüzgar ve yağmur suyu akışı ile mikroplastiklerin nehirlerle ve denizlere taşınmasına yol açar (Jambeck ve ark., 2015). Gelişmekte olan ülkelerde atık yönetim altyapısının zayıf olması, bu bölgeleri mikroplastik kirliliğinin başlıca kaynağı haline getirmiştir.

4.1.4. Tarımsal Faaliyetler

Tarımda plastik malç filmlerin, sera örtülerinin ve diğer plastik ürünlerin kullanımı, zamanla parçalanarak mikroplastik oluşumuna katkıda bulunur (Bläsing & Amelung, 2018). Ayrıca, arıtma çamuru uygulaması tarım topraklarına önemli miktarda mikroplastik girişi sağlamaktadır (Zubris ve Richards, 2005).

4.1.5. Kara Ulaşımı

Lastik aşınması, önemli bir mikroplastik kaynağıdır. Araç lastiklerinin yola sürtünmesi sonucu oluşan mikro parçacıklar, yağmur suyu ile yüzey akışına karışarak su sistemlerine taşınır (Kole ve ark., 2017). Yol işaretlerinin aşınması da benzer bir etki yaratmaktadır.

4.1.6. Kentsel Yüzey Akışı

Yağmur suyu, kentsel yüzeylerde biriken plastik toz, lif ve parçacıklarını toplayarak kanalizasyon sistemine ve oradan da nehir ve denizlere taşır (Horton & Dixon, 2018). Bu, özellikle yoğun nüfuslu şehirlerde önemli bir mikroplastik giriş yoludur.

4.2. Denizel Kaynaklar

Doğrudan deniz ortamında gerçekleşen faaliyetler, mikroplastik kirliliğine doğrudan katkıda bulunur.

4.2.1. Balıkçılık Faaliyetleri

Terk edilmiş, kaybolmuş veya atılmış balıkçılık ekipmanları (ALDFG), denizel plastik atığın önemli bir bileşenidir (Richardson ve ark., 2021). Ağlar, halatlar, misinalar ve diğer ekipmanlar zamanla parçalanarak mikroplastik ve nanoplastiklere dönüşür. Ayrıca, ekipmanların kullanımı sırasında oluşan aşınma da mikrofiber salınımına neden olur.

4.2.2. Deniz Taşımacılığı ve Gemicilik

Gemilerden kaynaklanan plastik atıklar (ambalaj, atık), gemi boyalarının aşınması, sentetik halatların kullanımı ve operasyonel deşarjlar (gri su, sintine suyu) deniz ortamına mikroplastik girişini artırmaktadır (Jiang

ve ark., 2020). Özellikle antikoruyucu boyaların aşınması, mikroplastik ve tehlikeli kimyasal karışımı bir kirletici kaynağıdır.

4.2.3. Açık Deniz Platformları

Petrol ve doğalgaz çıkarma platformları, rüzgar tribünleri gibi açık deniz yapılarının inşası, bakımı ve işletilmesi sırasında plastik malzemelerin kullanımı ve atılması, yerel mikroplastik kirliliğine yol açabilmektedir.

4.2.4. Kıyı Turizmi ve Rekreatif Faaliyetler

Plajlarda bırakılan tek kullanımlık plastikler (şişe, torba, pipet, bardak), plastik şişme oyuncaklar ve diğer malzemeler, dalgalar ve rüzgar etkisiyle parçalanarak ikincil mikroplastik kaynağı haline gelir (Thushari ve ark., 2017). Turizm sezonlarında plajlardaki atık miktarı belirgin şekilde artmaktadır.

5. MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN AZALTILMASI

Mikroplastik kirliliği, küresel bir çevre sorunu olarak karşımıza çıkmakta ve bu konudaki artan farkındalık, araştırmacılar için yeni çalışma alanları yaratmaktadır. Plastik kullanımındaki hızlı artış göz önüne alındığında, bu kirleticilerin kontrol altına alınması, iyileştirilmesi ve ortamdaki uzaklaştırılması acil bir ihtiyaç haline gelmiştir. Doğrusal ekonomi modeli yerine, azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür (3R) yaklaşımını temel alan döngüsel bir modelin benimsenmesi, mikroplastiklerin sürdürülebilir yönetimi için kritik bir adım olabilir (Chen ve ark., 2022).

5.1. Atıksu Arıtma Tesisleri

Atıksu arıtma tesisleri (WWTP'ler), mikroplastiklerin (MP'ler) çevreye salınımında önemli bir nokta kaynak olarak kabul edilmektedir. Mevcut arıtma prosesleri—birincil, ikincil ve üçünlü arıtma—MP'leri tamamen uzaklaştırmak için özel olarak tasarlanmamıştır. Birincil arıtma (elekler, ızgaralar) MP'lerin %70-98'ini giderebilmekteyken, ikincil (biyolojik) arıtımın verimi oldukça düşük (%0.2-14) kalmakta ve üçünlü arıtma sonrasında dahi MP'ler çıkan suda ve arıtma çamurunda tespit edilebilmektedir (Talvitie ve ark., 2017). Bu nedenle, mevcut tesislerin, MP giderim verimliliğini artırmak için iyileştirilmesi gerekmektedir.

Atıksu Arıtma Tesisleri (WWTP'ler), MP'lerin çevreye salınımında önemli bir noktadır. Mevcut konvansiyonel arıtma prosesleri (birincil, ikincil, üçünlü) MP'leri tamamen gidermekte yetersiz kalmaktadır (Talvitie ve ark., 2017). Bu nedenle, mevcut tesislerin iyileştirilmesi gerekmektedir. **Flokülasyon/Koagülasyon**, birincil arıtımın verimini artırmak için kullanılabilir. Demir veya alüminyum bazlı koagülantlar, MP'leri floklara hapsederek çökelmelerini sağlar ve PE gibi MP'lerin %99'a varan oranlarda giderilmesini mümkün kılar (Lapointe ve ark., 2020; Rajala ve ark., 2020). **Ultrafiltrasyon (UF)** gibi membran teknolojileri, boyut bazlı ayırma mekanizmasıyla yüksek giderim verimi (%97'ye kadar) sunar (Tadsuwan ve Babel, 2022). En etkili teknolojilerden biri olan **Membran Biyoreaktörler (MBR)** ise biyolojik arıtım ile membran filtrasyonu birleştirerek MP giderim verimini %99.9'a kadar çıkarabilmektedir. Ancak, bu ileri teknolojilerin yüksek maliyet ve membran tıkanması gibi dezavantajları bulunmaktadır. MP'lerin ortamdaki uzaklaştırılması veya parçalanması, mekanik, kimyasal ve biyolojik süreçlerin kombinasyonunu gerektirir (Talvitie ve ark., 2017).

5.1.1. Atık Su Arıtma Tesislerinde (AAT) Giderim

- **Geleneksel Arıtma:** Birincil (çöktürme) ve ikincil (biyolojik) arıtma, MP'lerin %80-90'ını giderebilir, ancak çoğu çamura karışır (Talvitie ve ark., 2017).
- **İleri (Tersiyer) Arıtma:** Mikro-elektifikasyon, kum filtreleri, aktif karbon adsorpsiyonu ve membran filtrasyonu (mikro/ultra/nanofiltrasyon) gibi teknolojiler, giderim verimliliğini %99'a kadar çıkarabilir (Poerio ve ark., 2019). Ancak, nanoplastiklerin (<0.1 µm) giderimi hala bir zorluktur (Iyare ve ark., 2020).
- **Çamur Yönetimi:** AAT çamurları tarımda gübre olarak kullanıldığında, içerdikleri MP'ler toprağa ve dolaylı olarak su kaynaklarına karışır. Çamurun yakılması veya ileri işlenmesi bu riski azaltabilir (Nizzetto ve ark., 2016).

5.2. Fizikokimyasal Bertaraf Yöntemleri

- **Termal Yöntemler:** Yakma (insinerasyon) ve piroliz, plastik atıkları enerjiye veya kimyasal hammaddelere dönüştürebilir. Ancak, yanma

ürünlerinin (dioxin, furan) kontrolü ve enerji verimliliği önemli hususlardır (Geyer ve ark., 2017).

- **Kimyasal Geri Dönüşüm:** Hidroliz, gazifikasyon ve depolimerizasyon gibi yöntemlerle plastikler monomerlerine ayrıştırılabilir. Bu, yüksek kaliteli geri dönüşüm için umut vericidir, ancak yüksek maliyet ve enerji gerektirir (Shen ve Worrell, 2024).
- **Gelişmiş Oksidasyon Prosesleri (AOP'ler):** Ozon, UV/H₂O₂, fotokataliz gibi yöntemler MP'leri parçalayabilir, ancak su arıtımında yan ürün oluşumu ve ölçeklenebilirlik sorunları vardır (Liu ve ark., 2022).

5.3. Giderim Mekanizmaları ve Verimlilik

- **Birincil Arıtma (Fiziksel):** Izgara ve çökeltme havuzları, büyük ve yoğun parçacıkların bir kısmını uzaklaştırır (Carr ve ark., 2016).
- **İkincil Arıtma (Biyolojik):** Aktif çamur proseslerinde, mikroplastikler biyolojik floklara tutunabilir veya mikroorganizmalar tarafından biyofilm oluşum yüzeyi olarak kullanılabilir (Murphy ve ark., 2016).
- **Üçüncül (İleri) Arıtma:** Disk filtreler, kum filtreleri veya membran filtrasyon (mikro/ultrafiltrasyon) gibi prosesler, mikroplastik giderim verimini önemli ölçüde artırabilir (Talvitie ve ark., 2017).

Araştırmalar, geleneksel bir AAT'nin gelen mikroplastik yükünün %80-98'ini giderebileceğini, ancak üçüncül arıtma uygulanmadığında çıkış suyunda hala önemli miktarda MP bulunabileceğini göstermektedir (Sun ve diğerleri, 2019). Giderim verimliliği, parçacık boyutu, şekli, yoğunluğu ve polimer tipinden önemli ölçüde etkilenir (Liu ve ark., 2019).

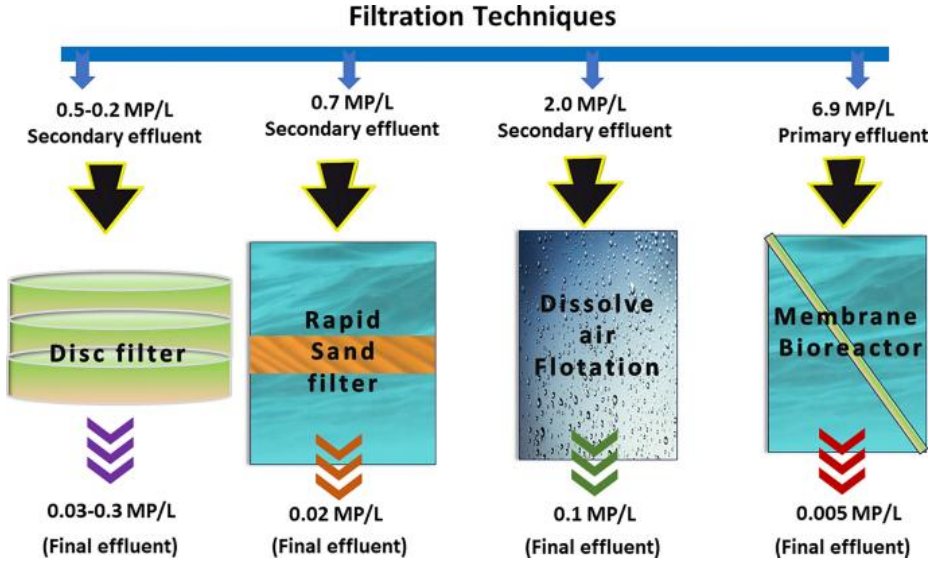
5.4. AAT'lerdeki MP Bolluğu ve Giderim Verimliliği

AAT'lerdeki MP bolluğu ve giderim verimliliği coğrafyaya, tesise ve kullanılan teknolojiye göre büyük farklılıklar göstermektedir. Ren ve ark. (2023), Shenzhen'deki AAT'lerin giriş suyunda MP konsantrasyonunun 69.4-86.3 parçacık/L, çıkış suyunda ise 0.60-2.57 parçacık/L olduğunu tespit etmiştir. Genel olarak, AAT giriş sularındaki MP bolluğunun literatürde 0.28 parçacık/L (Wuxi, Çin) ile 3.14×10^4 parçacık/L (Daegu, Kore) arasında değiştiği, ortalamanın 1.90×10^3 parçacık/L ve medyanın 57.6 parçacık/L olduğu bildirilmektedir (Liu ve ark., 2021; Ren ve ark., 2023). Bu

değişkenlik, hizmet verilen nüfus, atık su kaynağı, ekonomik gelişmişlik ve yaşam tarzı gibi faktörlere bağlanabilir. Örneğin, Zhengzhou şehri su ortamına en yüksek MP katkısını yaparken (8.70×10^8 parçacık/gün), en düşük değer İspanya'nın Cartagena kentinde elde edilmiştir (6.70×10^6 parçacık/gün). Bu farklılığın olası bir açıklaması, nüfus yoğunluğu (PD) ve arıtma verimliliğindeki farklılıklar olabilir (Ren ve ark., 2023).

Üretilen atık su miktarı çok büyük olduğu için, AAT çıkış sularından yapılan MP deşarjı göz ardı edilemez (Ren ve ark., 2023). Ren ve ark. (2023), Çin'de AAT çıkış sularının ülke genelindeki yüzey sularındaki MP'lere katkısını $734-3.10 \times 10^3$ ton/yıl, bunun da 220-950 tonunun (%7-30 oranında) yüzey suyundan denize karıştığını tahmin etmektedir. Küresel ölçekte, su ortamlarına AAT kaynaklı MP deşarjı ülkeden ülkeye önemli farklılıklar göstermekte; Almanya en yüksek ($6.30 \times 10^3 - 1.30 \times 10^4$ ton/yıl), Danimarka ise en düşük (0-3 ton/yıl) katkıyı yapmaktadır. ABD, Tayland ve Türkiye ise aynı büyüklük mertebesinde (200-650 ton/yıl aralığında) değerlere sahiptir (Ren ve ark., 2023). Bu farklılıklar, her ülkenin gelişmişlik düzeyi, nüfusu ve atık su arıtma altyapısındaki farklılıklarla açıklanabilir (Liu ve ark., 2021)

MP giderim verimliliğindeki yetersizlik, sadece kentsel AAT'ler için değil, hayvancılık sektöründeki arıtma sistemleri için de geçerlidir. Wang ve ark. (2025), Çin'in İç Moğolistan bölgesindeki dokuz büyük süt çiftliğinin atık sularını ve çevresini incelemiş, özellikle oksidasyon havuzlarına odaklanmıştır. Çalışma, tüm örnekleme noktalarında %100 tespit oranıyla değişen derecelerde MP kirliliği olduğunu göstermiştir. Oksidasyon havuzlarından gelen atık sulardaki ortalama MP konsantrasyonu 1550 ± 50 n/kg olarak bulunmuştur. Sonuçlar, başlangıçta besin giderimi için tasarlanmış **geleneksel oksidasyon havuzlarının**, MP'lerin küçük boyutu, düşük yoğunluğu ve kimyasal dayanıklılığı nedeniyle onları etkili bir şekilde gideremediğini ortaya koymaktadır (Wang ve ark., 2025). Bu bulgular, yalnızca ultrafiltrasyon ve gelişmiş oksidasyon teknolojilerinin dahil edilmesi gibi atık su arıtma tasarımındaki iyileştirmeleri bilgilendirmekle kalmaz, aynı zamanda tarımsal ortamlarda MP'lerin kontrolü için düzenleyici gelişmeleri de desteklemektedir (Wang ve ark., 2025).



Şekil. 7 Atık su çıkışlarından MP'lerin gideriminin karşılaştırmalı verimliliği, MBR yönteminde en yüksek verimliliği göstermektedir (Borah ve ark.,2023).

Atıksu Arıtma Altyapısının İyileştirilmesi;

- **İleri Arıtma Teknolojileri:** Membran biyoreaktörler (MBR), disk filtreler, elektrokoagülasyon gibi yüksek verimli MP giderim teknolojilerinin mevcut AAT'lere entegrasyonu (Talvitie ve ark., 2017).
- **Arıtma Çamuru Yönetimi:** Çamurdaki mikroplastikleri azaltacak veya yakalayacak işlemlerin (ör. piroliz) geliştirilmesi ve çamurun tarımsal kullanımına yönelik sıkı düzenlemeler getirilmesi (Nizzetto ve ark., 2016).

5.5. Arıtma Çamurundaki Birikim

Atıksulardan uzaklaştırılan mikroplastiklerin büyük çoğunluğu arıtma çamurunda (biyokatı) birikir (Mahon ve diğerleri, 2017). Bu çamurun tarım arazilerinde gübre olarak kullanılması, mikroplastiklerin karasal ekosistemlere ve dolaylı olarak yüzey sularına taşınmasına neden olan önemli bir yoldur (Nizzetto ve ark., 2016). Zubris ve Richards (2005), çamur uygulamasından 15 yıl sonra bile toprakta bozulmamış sentetik lifler tespit etmiştir.

5.6. Tarım ve Hayvancılık Atıksularında Mikroplastik ve Bertarafı

Mikroplastik kirlenme riski taşıyan en büyük "yutaklardan" bazıları, nehirlerin muazzam miktarda plastik yükü taşıdığı su kütleleri, özellikle deniz ortamıdır (Lackner ve Branka, 2024).

Büyük miktarda atık suyu işleyen ancak konvansiyonel arıtma proseslerinin MP'leri tamamen uzaklaştıramaması nedeniyle **Atıksu Arıtma Tesisleri (AAT'ler)**, MP'lerin çevreye, özellikle de yüzey sularına ve tarım arazilerine girişinde kritik bir **nokta kaynağı**nı oluşturmaktadır (Ren ve ark., 2023). Arıtılmış atık suyun deşarjı ve özellikle arıtma çamurunun tarımda kullanımı, MP'lerin tarımsal sistemlere doğrudan girdisi anlamına gelmektedir. Bu durum, plastik malç filmi, atmosferik birikim ve kontamine organik gübreler gibi diğer kaynaklarla birleşerek tarım topraklarında MP birikimine yol açmaktadır. Söz konusu toprak kirliliği, besin zinciri yoluyla hem çiftlik hayvanlarını hem de insanları etkilemekte, potansiyel toksikokinetik etkiler ve sağlık riskleri barındırmaktadır. Bu rapor, atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik kirliliğine katkısını, bu kirleticilerin tarımsal ortamlara geçiş yollarını ve hayvancılık sektörü ile olan etkileşimlerini mevcut literatür ışığında detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

Atıksu arıtma tesisleri, evsel ve endüstriyel kaynaklı büyük miktarda atık suyu işlemeleri ve arıtma süreçleri sırasında MP'lerin eksik olarak uzaklaştırılması nedeniyle, bu kirleticilerin çevreye girmesi için bir **geçit (gateway)** olarak kabul edilir (Ren ve ark., 2023). MP'ler başlıca evsel atık su yoluyla AAT'lere ulaşmaktadır (Ngo ve ark., 2019; Ren ve ark., 2023). Genellikle, AAT'ler arıtılmış suyu yüzey sularına deşarj ederken, arıtma çamurunu da tarım arazilerinde toprak katkı maddesi (toprak iyileştirici) olarak kullanmaktadır (Liu ve ark., 2021; Ren ve ark., 2023).

Kaynakların MP kirliliğine nispi katkıları arazi kullanımına ve bölgeye göre değişmekle birlikte, Çin tarım toprakları için yapılan bir kaynak atama çalışması, dört ana kaynağın katkı oranlarını şu şekilde belirlemiştir: **atmosferik birikim %52, tarımsal malç filmi %30, çamur uygulaması %11 ve organik gübreler %7** (Ren ve ark., 2023). Toplamda, Çin'in tarım topraklarındaki MP miktarının yılda yaklaşık **2.10×10⁵ ton'a** ulaştığı tahmin edilmektedir (Zhang ve Liu, 2018). Topraktaki MP'ler, doğal toprak özelliklerini (yapı, geçirgenlik, mikrobiyal aktivite) değiştirebilir. Daha

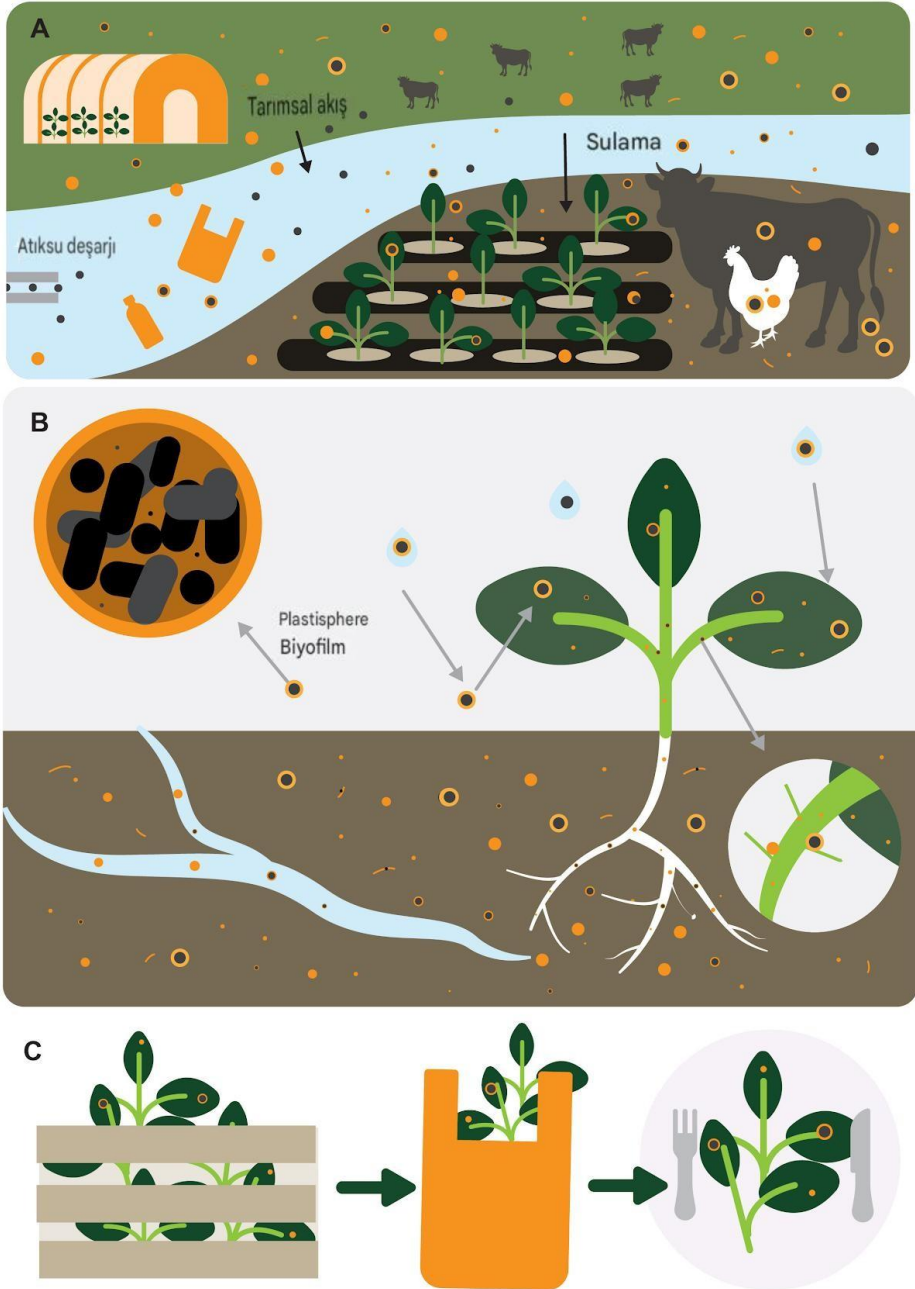
da önemlisi, çevredeki plastikler (ve mikroplastikler), hücre dışı polimerik maddelerin plastik yüzeye mikrobiyal salgılanmasıyla oluşan **mikrobiyal biyofilmler** tarafından hızla kolonize edilir ve çeşitli mikrobiyal toplulukları destekleyebilen yeni bir hidrofobik ekolojik yaşam alanı (plastisfer) sağlayabilir (Quilliam ve ark., 2023; Zettler ve ark., 2013).

5.6.1. Arıtma Çamuru ve Organik Gübre Uygulaması

Arıtma çamuru veya biyolojik atık kompostunun tarımda kullanılması, içerdikleri MP'lerin doğrudan toprağa entegre olmasına neden olmaktadır (Wang ve ark., 2025). Bu uygulama, toprağın doğal özelliklerini değiştirir ve karmaşık besin zinciri yoluyla bitki, hayvan ve hatta insan sağlığı için önemli güvenlik tehlikeleri oluşturabilir (Wang ve ark., 2025). Ren ve ark. (2023), Çin'de çamur uygulamasından kaynaklanan MP'lerin tarımsal toprağa katkısını yıllık $(1.30-3.90) \times 10^4$ ton olarak tahmin etmektedir.

5.6.2. Arıtılmış Atık Su ile Sulama ve Diğer Kaynaklar

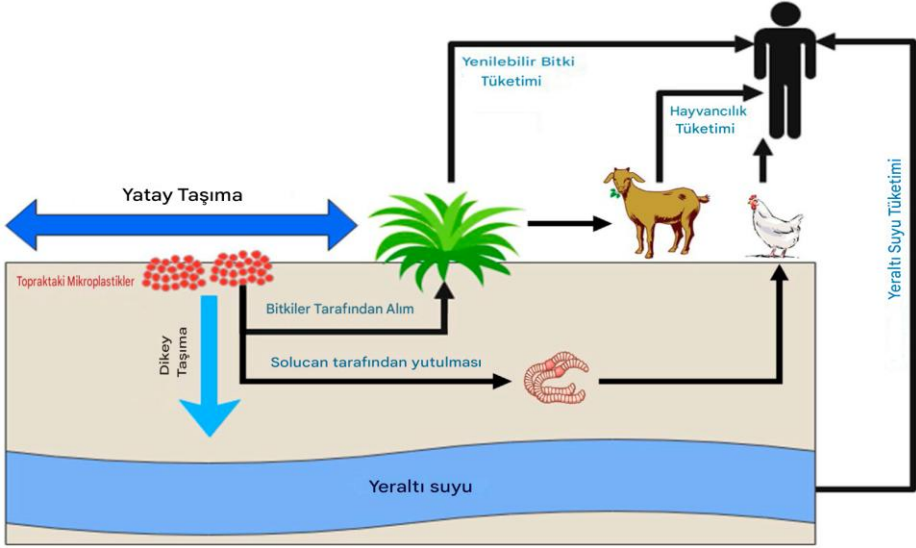
Arıtılmış ancak MP içeren atık su ile yapılan sulama, MP'lerin tarım arazilerine taşınmasının bir diğer önemli yoludur (Quilliam ve ark., 2023). Şekil 8'de gösterildiği üzere plastikler ve mikroplastikler, kirlenmiş sulama suyu, hayvan dışkısı ve organik gübrelerden veya malç filmi veya poli tünel gibi daha büyük plastik parçalarının parçalanmasından tarım sistemlerine girebilir (Quilliam ve ark., 2023).



Şekil 8. (A) Plastikler ve mikroplastikler (turuncu daireler ve lifler), kirlenmiş sulama suyu, hayvan dışkısı ve organik gübrelerden veya malç filmi veya poli tünel gibi daha büyük plastik parçalarının parçalanmasından tarım sistemlerine girebilir (Quilliam ve ark.,2023).

5.6.3. Hayvancılıkta Yem ve Su Yoluyla MP Maruziyeti

Geviş getirenler, kanatlılar ve balıklar dahil çiftlik hayvanları, besin zincirinin üst basamaklarında yer alır. Dolayısıyla, su, hava veya topraktaki herhangi bir kirlilik, önce bu hayvanlara, onların et, süt, yumurta gibi ürünleri yoluyla da insanlara aktarılabilir (Lackner ve Branka, 2024). Şekil 9'da gösterildiği üzere insanlar için maruz kalma yolları hava soluma, su tüketimi ve kontamine gıdaların (hayvansal ürünler dahil) tüketilmesidir (Lackner ve Branka, 2024). Hem karasal hem de sucul çiftlik hayvanları, küresel gıda güvenliği için son derece önemli olup, insanlara protein ve diğer besinleri sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu hayvanların MP kirliliğinden etkilenmesi, doğrudan insan sağlığı ve ekonomisi ile bağlantılıdır. Bu durum, küresel gıda güvenliği ve 1.61 ila 3.3 trilyon ABD Doları arasında değere sahip olan küresel çiftlik hayvanları pazarı için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Schwabl ve ark., 2019).



Şekil 9. Mikroplastiklerin hayvanlara ve insanlara aktarılmasına yönelik yollar (Kurniawan, ve ark., 2021; Lackner ve Branka, 2024)

Çiftlik hayvanları, MP'lere topraktan, sulama suyundan, yemden ve solunan havadan maruz kalabilir. Kontamine sulama suyu, hayvan dışkıları, organik gübreler veya daha büyük plastik parçaların parçalanması, MP'lerin tarım sistemlerine ve dolayısıyla hayvanların yaşam alanına girmesine yol açar (Quilliam ve ark., 2023).

Tarımsal uygulamalar, hayvan yemi, su temin koşulları ve kanalizasyon çamuru kullanımı yoluyla sütü ve eti kirlitebilir (Safaei ve ark., 2021). MP'ler, üretimleri sırasında eklenen veya çevreden adsorbe ettikleri toksik kimyasalları taşıyabilir. Plastikler, ağırlıklı olarak ham petrol olmak üzere fosil kaynaklardan elde edilen monomerlerden yapılır. Reçineyi bir ürüne dönüştürürken performansı ve görünümü artırmak için çok çeşitli katkı maddeleri (dolgu maddeleri, plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, stabilizatörler, antimikrobiyal maddeler, renklendiriciler gibi) eklenir. Plastik eşyalarda ve dolayısıyla plastik atıklarda 16.000'den fazla farklı kimyasalın bulunduğu ve bunlardan en az 4.200'ünün toksik olduğu tahmin edilmektedir (NUST, Norwegian University of Science and Technology, 2024).

5.6.4. Tarımsal Plastik Uygulamaları

Plastik örtü ile malçlama ve tohum kaplamalarında plastik taşıyıcıların kullanımı, plastiklerin ve mikroplastiklerin tarım topraklarında yaygınlaşmasına neden olmuştur (Quilliam ve ark., 2023). Daha yoğun tarım sistemlerinde, örneğin Çin'de, mikroplastiklerin kaynakları ve göç yolları kapsamlı bir şekilde incelenmiş olup, ana toprak girdileri plastik örtü ile malçlama, plastik taşıyıcılar içeren tohum kaplamalarının uygulanması ve sulamadan gelmektedir. Ren ve ark.,(2023), Çin'de plastik malç filmi aşınmasının tarım toprağına yıllık $\sim 80 \times 10^2$ ila 1.00×10^3 ton MP girdisi sağladığını ve toplam tarımsal MP girdisine katkı oranının $\sim 30\%$ olduğunu belirtmektedir.

Tarım ve hayvancılık, küresel plastik tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmakta ve bu sektörlerde kullanılan plastikler, çevreye MP/NP salınımının başlıca kaynakları arasında yer almaktadır (Kumar ve ark., 2020). Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2021), küresel tarım sektöründe yılda en az 12.5 milyon ton plastik kullanıldığını ve bunun büyük çoğunluğunun tek kullanımlık ürünler olduğunu tahmin etmektedir. Bu plastikler, başlıca aşağıdaki kaynaklar yoluyla MP/NP'lere dönüşmektedir (Tablo 3).

- **Plastik Malç Filmleri:** Özellikle su tasarrufu ve verim artışı amacıyla yoğun şekilde kullanılan plastik malç filmleri, tarımsal plastik kullanımının yaklaşık 75% 'ini oluşturur (APE Europe, 2019). Bu filmler, UV ışınımı, mekanik stres ve biyolojik parçalanma sonucu

zamanla fragmantasyona uğrayarak toprakta yüksek konsantrasyonlarda MP birikimine neden olur (Li ve ark., 2020). Biyobozunur alternatifler dahi toprakta parçalanarak MP oluşturabilmekte ve ekotoksikolojik riskler taşıyabilmektedir (Serrano-Ruiz ve ark., 2021).

- **Hayvancılık Uygulamaları:** Silaj örtüleri, yem paketleme malzemeleri, sulama boruları ve hayvan barınaklarında kullanılan plastikler, hayvancılık sektöründen kaynaklanan önemli MP/NP kaynaklarıdır. Bu malzemelerin aşınması, yırtılması veya doğru bertaraf edilmemesi, çevreye direkt plastik girdisi sağlar.
- **Kaplı Gübreler ve İlaçlar:** Kontrollü salım sağlamak amacıyla polimer kaplı gübreler ve veteriner ilaçları, toprağa ve su sistemlerine kasıtlı NP/MP girdisi oluşturan kaynaklardır (Katsumi ve ark., 2021). Bu kaplamalar, zamanla aşınarak veya parçalanarak çevrede birikir.
- **Tarım Ekipmanı Aşınması:** Traktör lastikleri ve diğer tarım makinelerinden kaynaklanan aşınma ürünleri, nano ve mikro boyutta kauçuk/karbon siyahı parçacıkları içeren önemli bir MP kaynağıdır (Kole ve ark., 2017).

Tablo 3. Tarım ve Hayvancılık Kaynaklı Başlıca MP/NP Kaynakları ve Özellikleri

Kaynak Kategorisi	Spesifik Örnekler	Oluşum Mekanizması / Özellikler	İlgili Çalışma
Doğrudan Tarımsal Kullanım	Plastik malç filmleri, sera örtüleri	UV ve mekanik parçalanma; toprakta yüksek konsantrasyon birikimi	Li ve ark., 2020; Steinmetz ve ark., 2016
Hayvancılık Uygulamaları	Silaj örtüleri, yem paketleri, sulama boruları	Fiziksel aşınma, yırtılma; barınak ve mera alanlarına yayılım	(Genel literatür)
Kaplı Girdiler	Polimer kaplı gübreler, tohumlar, ilaçlar	Kontrollü salım kaplamalarının aşınması ve parçalanması; kasıtlı nano/mikro parçacık salınımı	Katsumi ve ark., 2021; Accinelli ve ark., 2019
Ekipman Aşınması	Traktör lastikleri, makine parçaları	Sürtünme ile nano/mikro boyutta kauçuk parçacık oluşumu; yayılı kirletici	Kole ve ark., 2017
Organik Gübreler	Arıtma çamuru (biosolid), hayvan gübresi	Atıksu arıtma tesislerinden veya hayvan atıklarından gelen MP'lerin toprağa uygulanması	Corradini ve ark., 2019; Weithmann ve ark., 2018

5.6.5. Tarım ve Hayvancılık Kaynaklı Atıksuların MP/NP İçeriği

Tarım ve hayvancılık faaliyetleri, yüzey akışı, drenaj suları ve hayvansal atıklar yoluyla önemli miktarda atıksu üretir. Bu atıksular, sektörel plastik kullanımı nedeniyle yüksek MP/NP konsantrasyonları içerebilir.

- **Hayvancılık Atıksuları:** Büyükbaş ve kümeshanelerden kaynaklanan atıksular (gübre sıvısı, yıkama suları), hayvan barınaklarındaki plastik malzemelerin (örtüler, yemlikler, borular) aşınmasından kaynaklanan MP'leri taşıyabilir. Bu atıksular genellikle depolanarak veya doğrudan tarım arazilerine uygulanarak toprak ve yeraltı suyu kirliliği riski oluşturur. (Scheurer ve Bigalke, 2018).
- **Sera ve Mandıra Drenaj Suları:** Seralarda kullanılan plastik malzemelerden ve mandıralardaki hijyenik yıkamalardan kaynaklanan atıksular, MP için önemli bir taşıyıcı ortamdır (Scheurer ve Bigalke, 2018).
- **Yüzey Akışı ve Erozyon:** Plastik malç parçacıklarını veya gübreyle karışmış MP'leri taşıyan tarımsal yüzey akış suları, yakındaki su kaynaklarına ve dolayısıyla atıksu toplama sistemlerine MP/NP girdisi sağlar (Scheurer ve Bigalke, 2018).

5.6.6. Atıksu Arıtma Tesislerinin (AAT) MP/NP Giderim Etkinliği ve Tarımsal Geri Dönüşüm Riski

Tarımsal ve evsel kaynaklı atıksuların büyük kısmı AAT'lere ulaşır. AAT'ler, MP'ler için önemli bir "havuz" görevi görür, ancak giderim etkinliği proses tasarımına bağlıdır (Tablo 4).

- **Giderim Etkinliği:** İkincil (biyolojik) arıtma ve özellikle üçüncül (ileri) arıtma aşamaları (kum filtreleri, membran biyoreaktörler) MP'leri yüksek oranda (%90'ın üzerinde) çamur fazında tutar (Iyare ve ark., 2020; Gatidou ve ark., 2019). Ancak, özellikle NP boyutundaki parçacıklar ve suda kolloidal halde bulunan küçük MP'ler, arıtma proseslerinden geçebilir ve alıcı ortama deşarj edilebilir.
- **Arıtma Çamuru (Biosolid) ve Tarımsal Geri Dönüşüm:** AAT'lerde tutulan MP'lerin büyük kısmı arıtma çamurunda birikir. Bu çamurun, organik madde ve besin elementi kaynağı olarak tarım arazilerinde gübre olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır. Ancak bu uygulama,

toprağa konsantre MP girdisi sağlayarak uzun vadeli kirlilik riski oluşturur (Corradini ve ark., 2019). Li ve ark. (2018b), Çin'deki AAT çamurlarında ortalama 22.7×10^3 parçacık/kg kuru madde MP konsantrasyonu tespit etmiştir.

- **İçme Suyu Arıtımı ve Risk:** Yeraltı sularına sızan veya yüzeysel su kaynaklarına karışan MP/NP'ler, içme suyu arıtma tesisleri için de bir risk oluşturur. Geleneksel arıtma proseslerinin (özellikle NP'leri) tamamen gideremeyebileceği gösterilmiştir (Pulido-Reyes ve ark., 2019). Yavaş kum filtrasyonu gibi bazı prosesler etkili olsa da (Pulido-Reyes ve ark., 2022), standardize edilmiş giderim verimliliği verileri sınırlıdır.

Tablo 4: Atıksu Arıtma Süreçlerinde MP/NP'nin Kaderi Tarımsal Etkileşim

Süreç / Aşama	MP/NP Kaderi ve Davranışı	Tarımsal Sistemle İlişkisi ve Risk	İlgili Çalışma
Ön ve Birincil Arıtma	Büyük partiküller çöktürülür, ancak çoğu MP/NP askıda kalır.	Çamurda biriken kısım tarıma uygulanırsa risk.	Gatidou ve ark., 2019
İkincil (Biyolojik) Arıtma	Biyolojik floklara tutunma ve çamurda birikim artar. Yüksek giderim (>%90) sağlanabilir.	Giderim verimi yüksek, ancak çamur MP konsantrasyonu artar.	Iyare ve ark., 2020
Üçüncül (İleri) Arıtma	Membran filtrasyon, disk filtre, UV: Çok yüksek giderim sağlanır, NP'ler için zorluk devam eder.	Deşarj kalitesi iyileşir, ancak membran tıkanması ve NP geçişi sorunları olabilir.	(Genel literatür)
Arıtma Çamuru İşleme	Çamur çürütme, susuzlaştırma: MP/NP çamur matrisinde kalır, konsantre olur.	ANA RİSK: Bu çamurun tarımda gübre olarak kullanılması, toprağa direkt ve yoğun MP/NP girdisi demektir.	Corradini ve ark., 2019; Weithmann ve ark., 2018
Alıcı Ortam Deşarjı	Arıtılmış su ile kalan (özellikle küçük/nano) MP/NP'ler nehirlere, göllere karışır.	Bu sular sulamada kullanılırsa kirlilik tarım arazilerine taşınır.	(Genel literatür)

5.6.7. Toprak ve Yeraltı Suyunda MP/NP Taşınımı ve Çevresel Etkileri

Tarım arazilerine giren MP/NP'ler, çeşitli fizikokimyasal ve biyolojik süreçlerle taşınarak yeraltı sularına ulaşma potansiyeli taşır (Goeppert ve Goldscheider, 2021).

- **Taşınımı Kontrol Eden Faktörler:** Parçacık boyutu (küçük parçacıklar daha mobil), şekli (lifler daha az mobil), toprak gözenek yapısı, organik madde içeriği (taşınımı artırabilir), toprak kimyası (yüksek pH ve düşük iyonik güç taşınımı artırır) ve biyotürbasyon (solucan faaliyeti) başlıca kontrol mekanizmalarıdır (Keller ve ark., 2019).
- **Kirletici Taşıyıcılık (Vector Etkisi):** MP/NP'lerin hidrofobik yüzeyleri, pestisitler, antibiyotikler ve ağır metaller gibi tarımsal kirleticileri adsorplayabilir (Atugoda ve ark., 2020). Bu durum, kirleticilerin mobilitesini, biyoyararlanımını ve toksisitesini değiştirebilir. Ancak, bu etkinin şiddeti kirletici ve plastik türüne bağlı olup, bazı çalışmalar etkinin sınırlı olabileceğini öne sürmektedir (Castan ve ark., 2021).
- **Toprak Sağlığına Etkileri:** MP/NP birikimi, toprak porozitesini, su tutma kapasitesini, agregat stabilitesini ve mikrobiyal topluluk yapısını olumsuz etkileyebilir, bu da toprak verimliliğini ve ekosistem işlevlerini tehdit edebilir (Zhang ve ark., 2019).
- **Yeraltı Suyu Kirliliği:** Sınırlı sayıdaki çalışma, yeraltı sularında MP/NP varlığını doğrulamıştır. Konsantrasyonlar bölgelere göre büyük farklılık göstermekte (0.001 parçacık/L'den 2100 parçacık/L'ye kadar) ve bu durum standart örnekleme/analiz yöntemlerine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır (Johnson ve ark., 2020).

6. MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN YÖNETİMİ: KAYNAKLAR, ETKİLER VE BÜTÜNLEŞİK ÇÖZÜM STRATEJİLERİ

MP'lerin biyolojik çeşitlilik ve ekosistem işleyişi üzerindeki olumsuz etkileri artık yaygın olarak kabul görmektedir (Duis & Coors, 2016). Kıyısız ve deniz ekosistemlerinde birikerek, hem ekosistem sağlığı hem de bu ekosistemlerden elde edilen ekonomik faydalar üzerinde tehdit oluştururlar

(Beaumont ve ark., 2019). Çiftlik hayvanlarının bu partiküllere maruz kalması, hayvan sağlığı ve verimliliğinin yanı sıra, et, süt, yumurta gibi insan tüketimine yönelik ürünlerin güvenliği açısından da endişe yaratmaktadır (Urii ve ark., 2023).

6.1. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Çevresel Geçiş Yolları

Mikroplastik kirliliğinin yayılmasında bu derleme için iki ana sektör kritik rol oynamaktadır: tarım-hayvancılık ve atık su arıtma sistemleri.

6.1.1. Tarım ve Hayvancılık Sektörü

MP kirliliğinin önemli bir kaynağı tarım ve hayvancılık sektörleridir. Bu sektörler, küresel plastik tüketiminin önemli bir kısmını (yılda en az 12,5 milyon ton) oluşturmaktadır (FAO, 2023). Tarım sektörü, FAO (2023) verilerine göre bitki ve hayvan üretiminde yıllık 12.5 milyon ton plastik kullanmaktadır. Plastik malç filmleri, sera örtüleri, silaj örtüleri ve ambalajlar gibi ürünler, zamanla parçalanarak MP'leri toprağa ve su kaynaklarına bırakır (Steinmetz ve ark., 2016; Bläsing & Amelung, 2018). Bu sektördeki plastik kullanımının azaltılması için plastik ürün kullanımının, özellikle hayvanların doğrudan temas ettiği alanlarda, mümkün olan her yerde minimize edilmesi gerekmektedir (Lackner & Branka, 2024).

6.1.2. Atıksu Arıtma Tesisleri (AAT'ler)

Atıksu arıtma tesisleri (AAT'ler) de kritik bir geçiş noktasıdır. Geleneksel arıtma prosesleri MP'leri tamamen uzaklaştırmada sınırlı etkinliğe sahiptir, bu nedenle arıtılmış su ve özellikle tarımda gübre olarak kullanılan arıtma çamuru, MP'lerin toprak ve su sistemlerine girişinde önemli bir yol oluşturur (Mason ve ark., 2016). Mevcut veriler, atıksu arıtma tesislerinin, geleneksel arıtma proseslerinin yetersizliği nedeniyle, mikroplastik kirliliğinin tarım ve hayvancılık sistemlerine yayılmasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Arıtılmış su deşarjı ve çamur uygulaması, MP'leri doğrudan çevreye ve tarım arazilerine taşımakta; buradan da besin zinciri yoluyla çiftlik hayvanlarına ve insanlara ulaşabilmektedir. Bugün, 2024'te, halen yalnızca %9'luk geri dönüşüm oranı ve yaklaşık %0.5 veya yılda 10 milyon ton okyanuslara karışmakta olan ~450 milyon ton üretimden yılda ek ~350 milyon ton plastik atıktan bahsediyoruz (Lackner ve Branka, 2024).

AAT'ler, mikroplastiklerin su kütlelerine ulaşmasında önemli bir bariyer oluşturur. Gelişmiş arıtma prosesleri (membran biyoreaktörler, nano-filtrasyon), çamur ayırma ve çöktürme yöntemleri etkili olabilmektedir (Singh ve ark., 2021). Ancak, arıtılmış suyun tarımda kullanılması durumunda, partikül başına düşük konsantrasyonlar bile büyük su hacimleri nedeniyle toprağa önemli miktarda MP girişine neden olabilmektedir (Singh ve ark., 2021). Uygun olmayan ömür sonu yönetimi, plastik atıkların kontrolsüz bir şekilde bertaraf edilmesi, çeşitli ekosistemlerde uzun süreler boyunca bozulmadan kalan malzemelere yol açmaktadır (Lackner & Branka, 2024).

6.2. Yasal ve Politik Çerçeve

Plastik kirliliğiyle mücadele, ulusal yasalarla sınırlı kalamayacak küresel bir sorundur. Partiküllerin sınır tanımayan hareketliliği ve kalıcılığı, koordineli uluslararası eylemleri zorunlu kılmaktadır (Lackner & Branka, 2024).

Bu küresel soruna yönelik artan farkındalık, uluslararası ve bölgesel düzeyde politik tepkilere yol açmıştır. Avrupa Komisyonu, Sıfır Kirlilik Eylem Planı kapsamında 2030 yılına kadar denizlerdeki mikroplastik çöplerde %50 ve çevreye salınan mikroplastiklerde %30 azalma hedefi koymuştur (EC, 2021). Benzer şekilde, Birleşmiş Milletler Çevre Asamblesi (UNEA), plastik kirliliğini önlemek amacıyla tüm yaşam döngüsünü kapsayan, yasal olarak bağlayıcı uluslararası bir anlaşma geliştirilmesi çağrısında bulunmuştur (UNEP, 2022).

- **Mevcut Uluslararası Araçlar:** "Okyanusların Anayasası" olarak da bilinen Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi (UNCLOS), deniz çevresinin korunması için temel bir çerçeve sunar. Küresel ve bölgesel mevzuatın kapsamlı bir değerlendirmesi Costa ve arkadaşları (2020) tarafından, Akdeniz özelindeki durum ise Sharma ve ark., (2021) tarafından özetlenmiştir.
- **Küresel Bir Anlaşma İhtiyacı:** Mevcut parçalı yaklaşım, sorunun boyutunu çözmekte yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, UNEP'in "Plastik Kirliliği Üzerine Hükümetlerarası Müzakere Komitesi" (INC) çalışmaları kritik bir fırsat sunmaktadır (UNEP, 2024). Mart 2022'de başlayan müzakerelerle, plastiklerin tam yaşam döngüsünü (üretimden bertarafa) kapsayan, uluslararası bağlayıcılığı olan bir

anlaşma geliştirilmesi hedeflenmekte ve 2024 sonunda tamamlanması planlanmaktadır.

6.3. Mikroplastiklerle Mücadele için Çözüm Stratejileri

Mikroplastik kirliliğinin azaltılmasına yönelik çözümler, temel olarak üç stratejik kategoriye ayrılabilir: sınırlama (kaynakta önleme), azaltma (salınım kontrolü) ve ayırma (ortamdan uzaklaştırma) (Zurier ve Goddard, 2021). MP kirliliğinin yönetimi, kaynağında azaltma, gelişmiş atık su arıtma teknolojileri ve etkin geri dönüşüm stratejilerini içeren çok yönlü bir yaklaşım gerektirir.

6.3.1. Sınırlama ve Kaynakta Önleme Stratejileri

Bu yaklaşım, plastik kullanımını azaltmayı ve döngüsel ekonomi ilkelerini uygulamayı hedefler. Bunlar (Lackner & Branka, 2024):

- **Ürün Yaşamı ve Kısıtlama:** Kozmetiklerde mikroplastik kullanımının yasaklanması ve tek kullanımlık plastiklere yönelik kısıtlamalar, önemli önleyici adımlardır.
- **Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR):** Üreticileri ürünlerinin yaşam sonu yönetiminden sorumlu tutan EPR politikaları, daha sürdürülebilir ürün tasarımını teşvik edebilir.
- **Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm:** Uygun atık yönetimi ve geri dönüşüm altyapısının iyileştirilmesi, makroplastiklerin çevreye karışarak mikroplastığa dönüşmesini önlemeye yardımcı olur. Ancak, mevcut geri dönüşüm teknolojileri malzeme kısıtlamaları ve kalite sorunlarıyla karşı karşıyadır.
- **Plastik Atığın Tehlikeli Atık Olarak Sınıflandırılması:** Plastik atığın tehlikeli atık olarak ilan edilmesi, bertaraf ve yönetim uygulamalarında daha sıkı kontroller sağlayarak çevresel sızıntıyı azaltabilir (Rochman ve ark., 2013).
- **Okso-bozunur Plastiklerden Kaçınılması:** Bu ürünler, hızlı parçalanarak çok sayıda MP/NP ürettikleri için birçok ülkede yasaklanmıştır ve tamamen kaçınılması gereken bir seçenektir. En temel ve kalıcı çözüm, plastik kullanımını azaltmak, geri dönüşümü artırmak ve doğrusal plastik ekonomisinden döngüsel bir modele geçişi hızlandırmaktır (Lackner & Branka, 2024). Plastik üretiminin ve

atığının artış eğilimi kırılmadıkça, sorunun uç noktalardaki (AAT'ler, tarım) yönetimi giderek zorlaşacaktır.

6.3.2. Azaltma (Salınım Kontrolü) Stratejileri

Bu strateji, plastiklerin kullanım ömrü boyunca MP/NP salınımını minimize etmeye odaklanır.

- **Tarım ve Hayvancılık Uygulamaları:** Tarımda kullanılan plastiklerin (özellikle malç filmleri) biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerle değiştirilmesi, hayvan yemi ve suyundan plastik kontaminasyonunun önlenmesi, silolama gibi işlemlerde plastik kullanımının azaltılması veya beton/metal gibi alternatiflere geçilmesi önerilmektedir (Urii ve ark., 2023). Plastik malç filmi kullanımının azaltılması, biyobozunur alternatiflere geçiş teşvik edilmelidir. Kontamine olmayan, güvenli organik gübre kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Kapalı sistem sulama ve damla sulama gibi su tasarruflu ve kontaminasyon riskini azaltan yöntemler desteklenmelidir.
- **Biyoplastikler ve Alternatif Malzemeler:** Polihidroksialkanoatlar (PHAlar) gibi hem biyolojik kaynaklı hem de tamamen biyolojik olarak parçalanabilen polimerler, özellikle doğada kalması amaçlanan tarımsal ürünlerde (ağaç koruyucuları, ipler) umut vaat etmektedir. Ancak, bozunma hızları ortam koşullarına (kompost, deniz suyu) bağlıdır ve formülasyonlarında sorunlu katkı maddeleri içermemeleri kritik önem taşır (Lackner ve ark., 2023). Malç filmleri, silaj örtüleri, ambalajlar gibi ürünlerde biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin (PHA, PLA, PBAT) tercih edilmesi önerilmektedir.

6.3.3. Ayırma ve Giderim Teknolojileri

MP/NP'ler çevreye salındıktan sonra uzaklaştırılmaları genellikle zor ve maliyetlidir.

- **Atıksu Arıtma Tesislerinin İyileştirilmesi:** AAT'lerde, özellikle de hayvancılık atık sularının arıtıldığı sistemlerde, MP giderim verimliliğini artırmak için ileri teknolojiler (ultrafiltrasyon, ileri oksidasyon prosesleri vb.) entegre edilmelidir (Wang ve ark., 2025). Geleneksel oksidasyon havuzları gibi sistemlerin MP giderimindeki

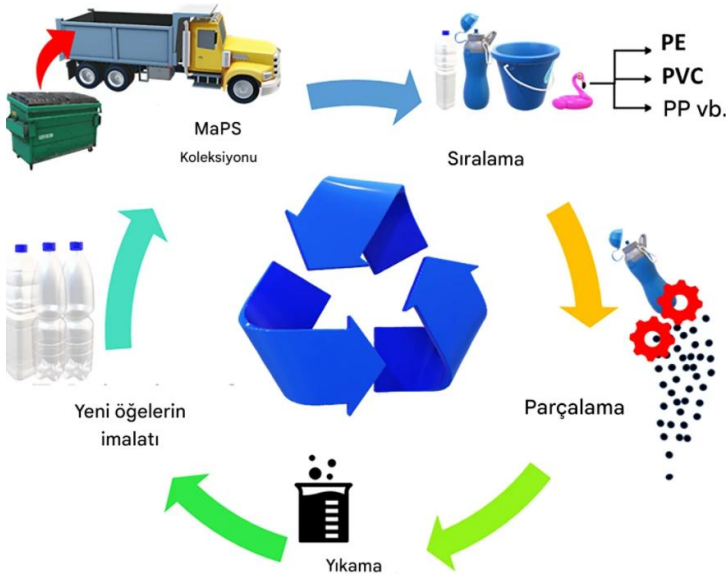
yetersizliği kabul edilmeli ve bu tesisler için yükseltme planları yapılmalıdır.

- **Biyolojik ve Enzimatik Bozundurma:** Bertaraf için termal bozunma, fotokatalitik bozunma ve biyobozunma gibi yöntemler araştırılmakta olsa da (Uheida ve ark., 2021), PETaz gibi spesifik enzimlerin plastikleri parçalamak için kullanımı üzerine araştırmalar devam etmekte, ancak büyük ölçekli uygulama henüz bir zorluk olarak kalmaktadır (Conley ve ark., 2019).
- **İçme Suyu Arıtımı:** Kaynatmanın, içme suyundaki MP/NP'leri çökelterek gidermede basit ve etkili bir yöntem olabileceği gösterilmiştir (Yu ve ark., 2024).

6.3.4. Geri Dönüşüm

MP'lerin uzaklaştırılması ve bozundurulmasındaki teknolojik zorluklar, plastik geri dönüşümünün döngüsel bir ekonominin parçası olarak teşvik edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Plastik atıkların geri dönüşümü genellikle dört ana strateji ile sınıflandırılır (Joseph ve ark., 2021):

- **Birincil Geri Dönüşüm:** Atık malzemelerin herhangi bir ön işlem olmaksızın orijinal kalitede ürünlere dönüştürüldüğü kapalı döngü bir mekanik geri dönüşüm sürecidir.
- **İkincil Geri Dönüşüm:** Karışık plastik atıklardan düşük kaliteli yeni ürünlerin üretildiği, toplama, ayırma, parçalama, yıkama ve peletleme gibi işlemleri içeren mekanik bir geri dönüşüm yöntemidir (Şekil.
- **Üçüncül Geri Dönüşüm (Kimyasal Geri Dönüşüm):** Plastik atıkların piroliz, gazlaştırma veya solvent ekstraksiyonu gibi yöntemlerle monomerler, kimyasallar veya yakıtlar gibi değerli ürünlere dönüştürülmesidir. Huang ve ark. (2022), polistirenin (PS), asit katalizörlüğünde ve görünür ışık altında, değerli kimyasallara başarıyla dönüştürülebildiğini göstermiştir.
- **Dördüncül Geri Dönüşüm (Enerji Geri Kazanımı):** Plastik atıkların yüksek sıcaklıkta yakılması yoluyla enerji elde edilmesidir. Ancak, sera gazı emisyonları gibi çevresel zorluklar barındırır.



Şekil 10. Mekanik geri dönüşümde yer alan çeşitli süreçlerden bazılarının gösterimi. *MaPs* Makroplastikler, PVC polivinilklorür, PP polipropilen, PE polietilen (Borah ve ark.,2023)

Geri dönüşüm, yüksek işlem maliyetleri, kirlenmiş plastikler ve bazı plastik türlerinin geri dönüştürülebilirliğinin sınırlı olması gibi engellerle karşılaşmaktadır (Al-Salem ve ark., 2009; Walker & Xanthos, 2018). Bununla birlikte, doğal kaynakların korunması, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve atık depolama sahalarına olan ihtiyacın hafifletilmesi gibi önemli çevresel faydalar sunmaktadır.

6.4. Çiftlik Hayvanlarında Maruziyeti Azaltmaya Yönelik Özel Stratejiler

Tarım sektörü, FAO (2023) verilerine göre bitki ve hayvan üretiminde yılda 12.5 milyon ton plastik kullanmaktadır. Hayvan sağlığı ve gıda güvenliği için aşağıdaki önlemler göz önünde bulundurulmalıdır (Lackner ve Branka, 2024):

1. **Kullanımı Sınırlama:** Plastik ürün kullanımının, özellikle hayvanların doğrudan temas ettiği alanlarda, mümkün olan her yerde minimize edilmesi.

2. **Alternatif Malzemelere Geçiş:** Malç filmleri, silaj örtüleri, ambalajlar gibi ürünlerde biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin (PHA, PLA, PBAT) tercih edilmesi.
3. **Yem ve Su Kalitesi:** Hayvan yemlerinin ve sularının MP/NP kontaminasyon düzeyinin izlenmesi ve düşük kontaminasyonlu kaynakların seçilmesi.
4. **Atık Yönetimi:** Tarımsal plastik atıkların uygun şekilde toplanması ve bertarafı, ikincil mikroplastik oluşumunu azaltır. Atık yönetimi politikaları, MP içeriğini dikkate alacak şekilde revize edilmelidir.
5. **Tohum Kaplamaları:** Mikroplastik içermeyen tohum kaplamalarının talep edilmesi ve kullanılması.

6.5. Ekosistem Sağlığı için Paydaş Temelli Çözümler

MP kirliliğiyle mücadelede Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na (SKA) ulaşılmasına katkıda bulunmak için üreticiler, tüketiciler, politika yapımcılar ve araştırmacılar dahil olmak üzere tüm paydaşların iş birliği içinde hareket etmesi esastır (UN, 2023). Paydaşların sorumlulukları Tablo'da özetlenmiştir.

Tablo 5. Denizel MP kirliliğini azaltmada paydaşların sorumlulukları (Acarer Arat, 2025'in literatür bildirışinden özetlenmiştir).

Üreticiler	Tüketiciler	Politika Yapıcılar ve Uygulayıcılar	Araştırmacılar ve Mühendisler
MP içeren ürünler kullanmaktan kaçının	Tek kullanımlık plastiklerden kaçının	Tek kullanımlık plastik üretimini kısıtlayan/ yasaklayan düzenlemeler yapın	MP analizi için standart yöntemler geliştirin
Tek kullanımlık plastik üretimini sınırlandırın	Cam, metal gibi yeniden kullanılabilir ürünleri tercih edin	Plastik atık yönetiminde 4R ilkesini (Azalt, Yeniden Kullan, Geri Dönüştür, Kazan) temel alın	Atıksulardan MP giderim verimliliğini artıran teknolojiler geliştirin
Biyobozunur plastik üretimine öncelik verin	Sentetik tekstiller yerine doğal lifleri (pamuk, keten) tercih edin	Geri dönüşüm tesislerinin kurulumunu ve kapasitesini teşvik edin	Biyobozunur plastik alternatiflerini araştırın
Plastik ürün tasarımını sadeleştirin, katkı maddelerini sınırlandırın	Çamaşır makinesi mikrofiber filtresi kullanın	Kaynakta ayrı toplamayı teşvik edici (vergi indirimi vb.) sistemler geliştirin	Plastikleri biyobozundurabilecek mikroorganizmaları inceleyin

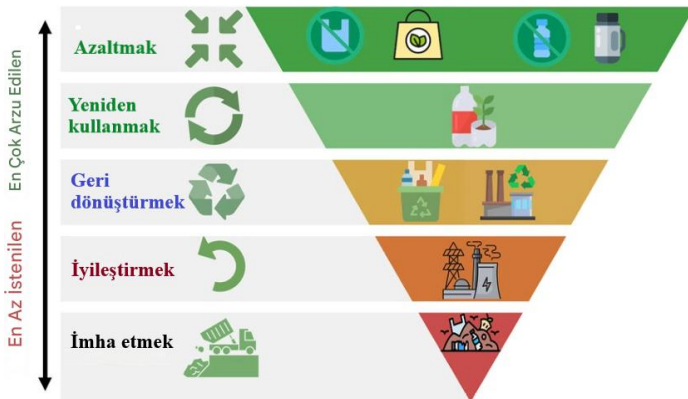
Tablo 5. Devamı

Üreticiler	Tüketiciler	Politika Yapıcılar ve Uygulayıcılar	Araştırmacılar ve Mühendisler
Üretimde geri dönüştürülmüş plastik kullanımını artırın	Plastik atıkları kaynağında ayırın ve geri dönüşüme katkı sağlayın	Atıksu arıtma tesisleri ve endüstriyel deşarjlardaki MP kirliliğini sıkı denetleyin	Deniz çöprü toplayıcılarının etkinliğini artırmak için optimizasyon çalışmaları yapın
Üretim sonrası atıkları etkin yönetin	Kıyı temizleme etkinliklerine katılın	Halk, endüstriler ve denizciler için farkındalık ve eğitim faaliyetleri düzenleyin	Ulusal kurumlarla iş birliği yapın

Üreticiler, ürünlerde MP kullanımını durdurmalı, tek kullanımlık plastik üretimini azaltmalı, geri dönüştürülebilirliği artırmak için daha az polimer çeşidi ve katkı maddesi kullanmalı, biyobozunur plastik üretimine yönelmeli ve geri dönüştürülmüş plastik kullanımını artırmalıdır.

Tüketiciler, tek kullanımlık plastikleri reddetmeli, yeniden kullanılabilir ürünler (cam, metal) tercih etmeli, MP içermeyen kişisel bakım ürünleri ve doğal lifli giysiler satın almalı, çamaşır makinesi filtresi kullanmalı, plastik atıkları kaynağında ayırmalı ve geri dönüşüme katkıda bulunmalıdır.

Politika Yapıcılar ve Uygulayıcılar, tek kullanımlık plastikleri sınırlayan/yasaklayan düzenlemeleri hayata geçirmeli, etkin bir plastik atık yönetimi için 4R ilkesini (Azalt, Yeniden Kullan, Geri Dönüştür, Kazan) temel alan stratejiler geliştirmeli, geri dönüşüm altyapısını güçlendirmeli, kaynakta ayrı toplamayı teşvik edici ödül sistemleri oluşturmali, atıksu arıtma tesislerinin çıkış sularındaki MP seviyelerini izlemeli ve toplum genelinde farkındalık çalışmaları yürütmelidir (Şekil 11).



Şekil 11. Plastik atık yönetimi için atık hiyerarşisi (Acarer Arat, 2025)

Araştırmacılar ve Mühendisler, MP analizi için standart ve güvenilir yöntemler geliştirmeli, atıksulardan MP giderim verimliliğini artıran ileri arıtma teknolojileri üzerine çalışmalı, biyobozunur plastik alternatiflerini ve plastikleri parçalayabilen mikroorganizmaları araştırmalı, deniz yüzeyi temizleme teknolojilerini optimize etmeli ve politika yapıcılara bilimsel veri sağlamak üzere ulusal kurumlarla iş birliği yapmalıdır.

6.6. Politika Önerileri

- 1. Küresel Düzey:** INC sürecinde geliştirilecek küresel anlaşmanın, plastik üretimi üzerinde katı sınırlamalar getirmesi, tek kullanımlık plastikleri azaltması ve sürdürülebilir alternatifleri teşvik etmesi sağlanmalıdır (Lackner ve Branka, 2024).
- 2. Ulusal Düzey:** Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) politikaları uygulanmalı, MP içeren ürünlere yönelik yasaklar genişletilmeli ve plastik atığın yönetimi iyileştirilmelidir (Lackner & Branka, 2024).
- 3. Yerel Düzey:** Belediyeler, gelişmiş atıksu arıtma altyapısına yatırım yapmalı ve topluluk tabanlı eğitim programlarıyla farkındalığı artırmalıdır (Lackner ve Branka, 2024).
- 4. Sektörel Düzey:** Tarım ve hayvancılık sektörleri, plastik kullanımını en aza indiren, doğal ve biyolojik olarak parçalanabilir malzemeleri önceleyen uygulamalara geçmelidir (Lackner ve Branka, 2024).

Davranışsal ve Teknolojik Çözümler

- **Teknoloji:** Gelişmiş filtrasyon sistemleri, biyoplastik araştırmaları ve makroplastik yakalama teknolojileri, sorunun hem kaynağında hem de "boru sonunda" çözülmesine katkı sağlayabilir (Lackner & Branka, 2024).
- **Davranış Değişikliği:** Kamuoyu farkındalık kampanyaları, sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının teşviki, topluluk temizlik etkinlikleri ve tüketicilerin bilinçlendirilmesi, plastik tüketimini ve atığını azaltmada hayati bir rol oynar (Lackner ve Branka, 2024).

6.7. Gelecekteki Araştırma Öncelikleri

- 1. Standardizasyon:** Farklı ortamlarda ve matrislerde (doku, yem, su) MP/NP'lerin örneklenmesi, analizi ve miktar tayini için standart metodolojiler geliştirilmelidir (Lackner ve Branka, 2024).

2. **Toksikoloji ve Sağlık Etkileri:** MP/NP'lerin çiftlik hayvanları ve insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri, özellikle diğer kirleticilerle sinerjistik etkileşimleri araştırılmalıdır (Lackner & Branka, 2024). MP'lerin farklı tarım-hayvancılık sistemlerindeki akıbeti, hayvan sağlığı üzerindeki kronik etkileri (büyüme, üreme verimi, genel sağlık durumu) ve nihai insan sağlığı riskleri üzerine daha kapsamlı ve uzun vadeli araştırmalar yapılmalıdır. Özellikle plastiklerde bulunan 16.000'den fazla kimyasalın tarım-hayvancılık besin zincirindeki hareketi ve etkileri daha iyi anlaşılmalıdır.
3. **Maruziyet Sınırları:** Hayvan yemlerinde ve insan tüketimine sunulan hayvansal ürünlerde (et, süt, yumurta) MP/NP'ler için güvenli veya izin verilebilir maruziyet seviyeleri belirlenmeli ve düzenlemeler geliştirilmelidir (Lackner ve Branka, 2024).
4. **Alternatif Malzeme Geliştirme:** Biyolojik kaynaklı, tamamen biyolojik olarak parçalanabilen polimerler ve bunların güvenli katkı maddeleri için araştırma teşvik edilmelidir (ve Branka, 2024).

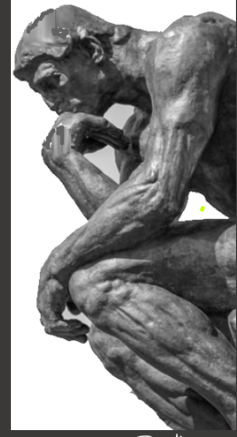
7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikro ve nanoplastik kirliliği, çok boyutlu bir küresel çevre ve halk sağlığı krizidir. Sorunun üstesinden gelmek için, kaynakta azaltma en etkili strateji olarak öne çıkmakta, ancak bunun yanı sıra teknolojik giderim, politika ve düzenlemeler ile toplumsal davranış değişikliği bir arada ilerlemelidir (Lackner ve Branka, 2024). Çiftlik hayvanları, ekosistemden insan gıda zincirine uzanan bu kontaminasyon yolunda kritik bir bağlantı noktasıdır. UNEP INC sürecinde ortaya çıkacak küresel anlaşma, bu kapsamlı mücadelenin temel taşını oluşturma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, tarım ve hayvancılık kökenli atıksuların toplandığı atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan mikroplastik kirliliği, sadece bir çevre sorunu olmayıp, gıda güvenliği, halk sağlığı, hayvan refahı ve sürdürülebilir tarım-hayvancılık faaliyetlerini doğrudan ilgilendiren disiplinler arası bir tehdittir. Sorunun çözümü, teknolojik yenilik, etkin politika ve düzenlemeler, sektörel iş birliği ile toplumsal farkındalığın artırılmasını gerektiren bütünleşik ve küresel bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bilimsel araştırma, politika geliştirme ve endüstriyel inovasyon arasındaki işbirliği, plastiklerin faydalarından vazgeçmeden, onların çevre ve canlı sağlığı üzerindeki olumsuz

etkilerini azaltmanın tek yolu olarak görülmelidir. Konuya yöneticiler ve kamuoyu yakın ilgi göstermelidir.

Öz ve son söz: Türünün bilimsel isim anlamı "düşünen ve bilge insan" olan *Homo sapiens*, üzerine düşen sorumluluğu yerine getirmeli ve isimsel onurunu korumalıdır. Aksi halde evrilme ve yaşam kaynağımız denizlerin "ekolojik hasarı", iklim krizinin de çarpan etkisiyle; güncel *Homo sapiens sapiens*e tanık ve sanık olarak feci afetler yaşatacaktır. Yüğü, masum diğer canlıların günahları olan "Nuh'un Gemisi" ise; son yolculuğu için yelkenlerini kasırgalarla doldurup, dümenini "altın kitlesel yok oluşa" kırarak, muhtemelen meçhul rotasına son kez akacaktır (E.Buhan, 2025).



August Rodin
(1840-1917)'in
"düşünen adam"
tasviri

KAYNAKÇA

- Abreu, A., & Pedrotti, M. I. (2019). Microplastics in the oceans: The solutions lie on land. *Field Actions Science Reports*, (Özel Sayı 19), 62–67.
- Acarer Arat, S (2025). Microplastic pollution in marine ecosystems: sources, impacts, and stakeholder-based solutions. *Turkish Journal of Biology* 49 (5): 421-440. <https://doi.org/10.55730/1300-0152.2759>
- Accinelli, C., Abbas, H. K., Shier, W. T., Vicari, A., Little, N. S., Aloise, M. R., & Giacomini, S. (2019). Degradation of microplastic seed film-coating fragments in soil. *Chemosphere*, 226, 645–650.
- Allen, D., Allen, S., Abbasi, S., Baker, A., Bergmann, M., & et al. (2022). Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(6), 393–405.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643.
- Andrady, A. L. (2015). Persistence of plastic litter in the oceans. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter* (pp. 57-72). Springer.
- Aragaw, T. A. (2021). Microplastic pollution in African countries' water systems: a review on findings, applied methods, characteristics, impacts, and managements. *SN Applied Sciences*, 3(6), 1-21.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Beaumont, N. J., Aanesen, M., Austen, M. C., Börger, T., Clark, J. R., Cole, M., Hooper, T., Lindeque, P. K., Pascoe, C., & Wyles, K. J. (2019). Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine Pollution Bulletin*, *142*, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>
- Bergmann, M., Collard, F., Fabres, J., Gabrielsen, G. W., Provencher, J. F., Rochman, C. M., van Sebille, E., & Tekman, M. B. (2022). Plastic

- pollution in the Arctic. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(5), 323–337.
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*, 612, 422–435.
- Borah, S. J., Gupta, A. K., Gupta, A., Bhawna, Kumar, S., Sharma, R., ... & Kumar, V. (2023). Grasping the supremacy of microplastic in the environment to understand its implications and eradication: a review. *Journal of Materials Science*, 58, 12899–12928.
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis*. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026–5031.
- Castan, S., Henkel, C., Hüffer, T., & Hofmann, T. (2021). Microplastics and nanoplastics barely enhance contaminant mobility in agricultural soils. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 193.
- Carr, J. N., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Wastewater treatment: Primary physical processes. A. B. Editör (Ed.), *Handbook of water and wastewater treatment technologies* (ss. 45–67).
- Chae, Y., & An, Y.-J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511.
- Chatterjee, S., & Sharma, S. (2019). Microplastics in our oceans and marine health. *Field Actions Science Reports*, Special Issue 19, 54–61.
- Chen, C. K., Zhang, J., Bhingarde, A., Matotek, T., Barrett, J., Hardesty, B. D., Banaszak Holl, M. M., & Khoo, B. L. (2022). A portable purification system for the rapid removal of microplastics from environmental samples. *Chemical Engineering Journal*, 428, 132614.
- Cole, M. (2013). Microplastic swallowing zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>

- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Conley, K., Clum, A., Deppe, J., Lane, H., & Beckingham, B. (2019). Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year. *Water Research X*, 3, 100030.
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671, 411–420.
- Corte Pause, F., Urii, S., Crociati, M., Stradaoli, G., & Baufeld, A. (2024). Connecting the Dots: Livestock Animals as Missing Links in the Chain of Microplastic Contamination and Human Health. *Animals*, 14(2), 350.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Ubeda, B., Hernández-León, S., ... & Ruiz, A. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28), 10239-10244.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C. ve Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1–2), 290–293.
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2.
- EC. (2020). Circular Economy Action Plan. European Commission. https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en
- El-Jourbagy, J., Roessing, M., Hair, H., & Banks, C. (2021). Plastikleri azaltmak için endüstriyel bir düzenleme çerçevesi oluşturma. *Berkeley Business Law Journal*, *18*(1), 94–134.
- Enyoh, C. E., Devi, A., Kadono, H., Wang, Q., & Rabin, M. H. (2023). The plastic within: Microplastics invading human organs and bodily fluids systems. *Environments*, 10(11), 194.

- Enyoh, C. E., Devi, A., Kadono, H., Wang, Q., & Rabin, M. H. (2023). The plastic within: Microplastics invading human organs and bodily fluids systems. *Environments*, 10(11), 194.
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., ... & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, 9(12), e111913.
- European Commission. (2021). Communication from the Commission to the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Pathway to a Healthy Planet for All. EU Action Plan: "Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil." COM(2021) 400 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400&from=EN>
- FAO (2023) Breaking the plastic cycle in agriculture. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/transform/article-detail/breaking-the-plastic-cycle-in-agriculture/en>
- Fendall, L. S., & Sewell, M. A. (2009). Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1225–1228.
- Gatidou, G., Arvaniti, O. S., & Stasinakis, A. S. (2019). Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants. *Journal of Hazardous Materials*, 367, 504–512.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. ve Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Goeppert, N., & Goldscheider, N. (2021). Experimental field evidence for transport of microplastic tracers over large distances in an alluvial aquifer. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124844.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075.
- Hirai, H., Takada, H., Ogata, Y., Yamashita, R., Mizukawa, K., Saha, M., Kwan, C., Moore, C., Gray, H., Laursen, D., Zettler, E. R., Farrington,

- J. W., Reddy, C. M., Peacock, E. E., & Ward, M. W. (2011). Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1683–1692.
- Horton, A. A., & Dixon, S. J. (2018). Microplastics: An introduction to environmental transport processes. *WIREs Water*, 5(2), e1268.
- Huang, Z., Shanmugam, M., Liu, Z., Brookfield, A., Bennett, E. L., Guan, R., Vega-Herrera, A., Lopes, D. D., Gabor, I., & Xiao, J. (2022). Chemical recycling of polystyrene to valuable chemicals via selective acid-catalyzed aerobic oxidation under visible light. *Journal of the American Chemical Society*, 144(14), 6532–6542.
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M., ... Geissen, V. (2017). Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 220, 523–531.
- Iyare, PU, ve ark., 2020, 'Atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik giderimi: kritik bir inceleme', *Çevre Bilimi: Su Araştırması ve Teknolojisi*6(10), s. 2664-2675 (DOI: 10.1039/D0EW00397B).
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- Jiang, Y., Zhao, Y., Wang, X., Yang, F., Chen, M., & et al. (2020). Characterization of microplastics in the surface seawater of the South Yellow Sea as affected by season. *Science of The Total Environment*, 724, 138375.
- Johnson, A. C., Ball, H., Cross, R., Horton, A. A., Jurgens, M. D., Read, D. S., ... & Svendsen, C. (2020). Identification and quantification of microplastics in potable water and their sources within water treatment works in England and Wales. *Environmental Science & Technology*, 54(19), 12326–12334.
- Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2021). Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 199–208.

- Kaiser, D., Kowalski, N., & Waniek, J. J. (2017). Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics. *Environmental Research Letters*, 12(12), 124003.
- Kane, I. A., Clare, M. A., Miramontes, E., Wogelius, R., Rothwell, J. J., Garreau, P., & Pohl, F. (2020). Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science*, 368(6495), 1140–1145.
- Katsumi, N., Kusube, T., Nagao, S., & Okochi, H. (2021). Accumulation of microcapsules derived from coated fertilizer in paddy fields. *Chemosphere*, 267, 129185.
- Keller, A. S., Jimenez-Martinez, J., & Mitrano, D. M. (2019). Transport of nano- and microplastic through unsaturated porous media from sewage sludge application. *Environmental Science & Technology*, 54(2), 911–920.
- Kim, M. Y., Kim, C., Moon, J., Heo, J., Jung, S. P., & Kim, J. R. (2017b). Polymer film-based screening and isolation of polylactic acid (PLA)-degrading microorganisms. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(2), 342–349.
- Koelmans, A. A., Besseling, E., & Shim, W. J. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter* (pp. 325–340). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_12
- Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F., & Ragas, A. (2017). Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265.
- Kooi, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., & Koelmans, A. A. (2017). Ups and downs in the ocean: effects of biofouling on vertical transport of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 51(14), 7963–7971.
- Kurniawan, S.B.; Said, N.S.M.; Imron, M.F.; Abdullah, S.R.S. (2021). Microplastic pollution in the environment: Insights into emerging sources and potential threats. *Environ. Technol. Innov.*, 23, 101790.
- Lackner, M., & Branka, M. (2024). Microplastics in Farmed Animals—A Review. *Microplastics*, 3(4), 559–588.

- Lapointe, M., Farner, J. M., Hernandez, L. M., & Tufenkji, N. (2020). Understanding and improving microplastic removal during water treatment: Impact of coagulation and flocculation. *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8719–8727.
- Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8(1), 4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., ... Schludermann, E. (2014). The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Environmental Pollution*, 188, 177–181.
- Li, Z., Junaldi, M., Chen, G., & Wang, L. (2022). Interactions and associated resistance development mechanisms between microplastics, antibiotics and heavy metals in the aquaculture environment. *Reviews in Aquaculture*, 14 (2), 1028–1045.
- Liu, J., Zhang, T., Tian, L., Liu, X., Qi, Z., Ma, Y., ... & Chen, W. (2019). Aging significantly affects mobility and contaminant-mobilizing ability of nanoplastics in saturated loamy sand. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 5805–5815.
- Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., ... & Zhang, T. (2021). A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. *Environment International*, 146, 106277.
- Liu, X., Guo, Y., & Zhang, Z. (2022). Advanced oxidation processes for micropollutant removal in water treatment: A review. *Environmental Science & Technology*, *56*(12), 1234-1245.
- Long, M., Moriceau, B., Gallinari, M., Lambert, C., Huvet, A., Raffray, J., & Soudant, P. (2015). Interactions between microplastics and

- phytoplankton aggregates: impact on their respective fates. *Marine Chemistry*, 175, 39-46.
- Long, Z., Yu, X., Jin, X., & Ren, J. (2017). Progress in Marine Microplastics Pollution Research. *Journal of Applied Oceanography*, 36(4), 586-596.
- Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Rogers, D. L. (2016). Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent. *Environmental Pollution*, 218, 1045–1054.
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5800–5808.
- Ngo, P. L., Su, H. M., & Kibbey, T. C. (2019). Urban stormwater runoff: A major pathway for anthropogenic particles, including microplastics, to aquatic systems. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(9), 1453–1461.
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777-10779.
- NOC / National Oceanography Centre. (2021). Sources, amounts & pathways of plastics entering the global ocean. <https://noc.ac.uk/files/documents/science/report-plastics-entering-the-global-ocean-noci-december-2021.pdf>
- NUST- Norwegian University of Science and Technology (2024). More Than 16,000 Chemicals Can Be Found in Plastic, and Many Are Harmful: Report. <https://phys.org/news/2024-03-chemicals-plastic.html>
- OECD, 2020, Sentetik tekstillerden mikroplastikler üzerine çalıştay: bilgi, azaltma ve politika — özet not , 11 Şubat 2020, OECD Merkezi, Paris, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü.
- OECD. (2024). Policies to reduce microplastics pollution in water. https://www.oecd.org/en/publications/policies-to-reduce-microplastics-pollution-in-water_7ec7e5ef-en.html
- Paul, M. B., Stock, V., Cara-Carmona, J., Lisicki, E., Selo, M. A., Döring, N., ... & Voss, L. (2020). Micro- and nanoplastics—current state of

- knowledge with the focus on oral uptake and toxicity. *Nanoscale Advances*, 2(10), 4350–4367.
- Phuong, N. N., Vergnoux, A. Z., Poirier, L., Kamari, A., Châtel, A., Mouneyrac, C., & Lagarde, F. (2016). Is there any consistency between the microplastics found in the field and those used in laboratory experiments? *Environmental Pollution*, 211, 111–123.
- Poerio, T., Piacentini, E., & Mazzei, R. (2019). Membrane processes for microplastic removal. *Molecules*, 24(22), 4148.
- Pulido-Reyes, G., Magherini, L., Bianco, C., Sethi, R., von Gunten, U., Kaegi, R., & Mitrano, D. M. (2022). Nanoplastic removal during drinking water treatment: Laboratory-and pilot-scale experiments and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129011.
- Pulido-Reyes, G., Mitrano, D. M., Kägi, R., & Gunten, U. V. (2019). Effect of drinking water ozonation on different micro-sized plastic particles. In *International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea* (pp. 152–157). Springer.
- Scheurer, M., & Bigalke, M. (2018). Microplastics in Swiss floodplain soils. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3591–3598.
- Quilliam, R. S., Pow, C. J., Shilla, D. J., Mwesiga, J. J., Shilla, D. A., & Woodford, L. (2023). Microplastics in agriculture – a potential novel mechanism for the delivery of human pathogens onto crops. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1152419.
- Rajala, K., Grönfors, O., Hesampour, M., & Mikola, A. (2020). Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals. *Water Research*, 183, 116045. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116045>
- Ren, S. Y., Sun, Q., Xia, S. Y., Tong, D., & Ni, H. G. (2023). Microplastics in wastewater treatment plants and their contributions to surface water and farmland pollution in China. *Chemosphere*, 343, 140239.
- Richardson, K., Hardesty, B. D., & Wilcox, C. (2021). Tackling abandoned, lost and discarded fishing gear. The Royal Society.
- Rochman, C. M., Hoh, E. M., Kurobe, T., & Teh, Y. A. (2013). Ingested plastic debris causes physical harm to marine fish. *Environmental Science & Technology*, 47(11), 6170–6176.

- Safaei, P., Seilani, F., Eslami, F., Sajedi, S. R., & Mohajer, A. (2021). Determination of essential nutrients and heavy metal content of raw cow's milk from east Azerbaijan province, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *101*(14), 2368-2378.
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171(7), 453–457.
- Serrano-Ruiz, H., Martin-Closas, L., & Pelacho, A. M. (2021). Biodegradable plastic mulches: Impact on the agricultural biotic environment. *Science of The Total Environment*, 750, 141228.
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, 185, 77–83.
- Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2021). Microplastics in the Mediterranean Sea: Sources, Pollution Intensity, Sea Health, and Regulatory Policies. *Frontiers in Marine Science*, 8, 634934.
- Shen, L., & Worrell, E. (2024). Plastic recycling. In *Handbook of Recycling* (pp. 497-510). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00014-2>
- Sherrington, C. (2016). *Plastics in the marine environment* (Rapor No: 123). Eunomia.
- Singh, N., & Walker, T. R. (2024). Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *Npj Materials Sustainability*, 2(1), 17.
- Steinmetz, Z., ve ark. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690-705.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21–37.
- Sun, X., Liang, J., Zhu, M., Zhao, Y., & Zhang, B. (2018). Microplastics in seawater and zooplankton from the Yellow Sea. *Environmental Pollution*, 242, 585–595.

- Tadsuwan, K., & Babel, S. (2022). Unraveling microplastics removal in wastewater treatment plant: A comparative study of two wastewater treatment plants in Thailand. *Chemosphere*, 307, 135733.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution - removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401–407.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838-838.
- Thushari, G. G. N., Suchana, C., & Amararatne, Y. (2017). Coastal debris analysis in beaches of Chonburi Province, eastern of Thailand as implications for coastal conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1–2), 121–129.
- Uheida, A., Mejía, H. G., Abdel-Rehim, M., Hamd, W., & Dutta, J. (2021). Visible light photocatalytic degradation of polypropylene microplastics in a continuous water flow system. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124299.
- UNEP (2016). Mapping of global plastic value chain and plastic losses to the environment: With a particular focus on marine environment. United Nations, https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26745/mapping_plastics.pdf
- UNEP (2018). SINGLE-USE PLASTICS: A Roadmap for Sustainability. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/25496>
- UNEP (2022). End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument [Draft resolution]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38522>
- UNEP (2023). Draft text of the international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment. UNEP/PP/INC.3/4.
- UNEP (2024). Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>

- UNIDO (2019). Addressing the challenge of marine plastic litter using circular economy methods: Relevant considerations. United Nations Industrial Development Organization.
- UNEA (United Nations Environment Assembly) , (2014). Resolution 1/6 on marine plastic litter and microplastics (UNEP/EA.1/6). United Nations Environment Programme.
- Urii, S., Corte Pause, F., Crociati, M., Baufeld, A., Monaci, M., & Stradaoli, G. (2023). Impact of Microplastics and Nanoplastics on Livestock Health: An Emerging Risk for Reproductive Efficiency. *Animals*, 13(7), 1132.
- Walker, T. R., & Xanthos, D. (2018). A call for Canada to move toward zero plastic waste by reducing and recycling single-use plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 99–100. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.014>
- Wang, X., Liu, L., Zheng, H., Wang, M., Fu, Y., Luo, X., & diğ. (2020). Polystyrene microplastics impaired the feeding and swimming behavior of mysid shrimp *Neomysis japonica*. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110660.
- Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Airborne microplastics: A review on the occurrence, migration and risks to humans. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 657–664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- Wang, Y., Yao, N., Xv, X., Guo, X., Shao, T., Gao, C., & Xing, B. (2025). A survey of microplastics in wastewater from large-scale dairy farms and their surroundings in Inner Mongolia of China. *Emerging*
- Weithmann, N., ve ark. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, 4(4), eaap8060.
- Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z., & Zeng, E. Y. (2024). Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(3), 273–279.
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146.

- Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20.
- Zhang, G., Zhang, F., & Li, X. (2019). Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment*, 670, 1–7.
- Zhang, H. (2017). Transport of microplastics in coastal seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 74–86.
- Zhang, H. (2017). Transport of microplastics in coastal seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 74-86.
- Zhao, S., Zhu, L., & Li, D. (2015). Microplastic in three urban estuaries, China. *Environmental Pollution*, 206, 597–604.
- Zubris, K. A., & Richards, B. K. (2005). Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution*, 138(2), 201-211.
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37–44.

BÖLÜM 5

PLASTİKLEŞEN TOPRAKLAR: MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN TOPRAĞIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Dr. Cabir Çağrı GENÇE¹

Doç. Dr. Halil ERDEM²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048263>

¹ Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aksaray, Türkiye. cabircagrigence@aksaray.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-9748-1303

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Tokat, Türkiye. erdemh@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-3296-1549

GİRİŞ

Plastikler; düşük maliyetleri, yüksek dayanıklılıkları, kolay taşınabilirlikleri ve diğer pek çok avantajları sayesinde hem günlük yaşamda hem de endüstriyel alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu yaygın kullanım, ciddi bir çevresel sorunu da beraberinde getirmektedir. Dünya plastik üretimi 1964'te 15 milyon ton iken, 2020'lerde 360 milyon tona ulaşmıştır. Modellemeler, bu üretimin 2040'a kadar iki katına çıkacağını ve 2050'de dört katına (yaklaşık 1.5 milyar ton) ulaşacağını öngörmektedir (Anonim, 2025). Bu artış, plastik atık birikimini de doğrudan etkileyecektir. Bu plastik atıklar içinde özellikle mikroplastikler (MP'ler), çevresel açıdan önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Mikroplastikler, çapı 5 mm'den küçük olan plastik parçacıkları ya da partikül olarak tanımlanmakta ve giderek artan miktarlarda çevresel ortamlarda tespit edilmektedir (Sharma ve ark., 2021).

Son yıllarda, mikroplastiklerin çevre üzerindeki etkilerine ilişkin ilgi, deniz ekosistemlerden karasal ortamlara kaymıştır (Duis ve Coors, 2016). Bu yönelme tesadüfi değildir; zira denizlerde biriken plastik atıkların yaklaşık %80'inin kara kökenli olduğu bilinmektedir (H. Yang ve ark., 2021). Tarım toprakları, atık suyla sulama, biyokatı ve kanalizasyon çamuru uygulamaları, atmosferik birikim ve plastik malç kullanımı gibi çeşitli kaynaklar yoluyla mikroplastiklerin biriktiği önemli karasal yutaklardır (Mohasin ve ark., 2025). Örneğin, Şili'de bir kanalizasyon arıtma tesisinden çıkan çamurun gramında 18 – 41 mikroplastik parçacığına rastlandığı ve bu çamurun tarım topraklarına uygulanmasıyla birlikte, topraktaki MP içeriğinin de arttığı gösterilmiştir (Corradini ve ark., 2019). Bu bulgular, toprağın MP'ler için geçici ya da kalıcı bir birikim ortamı olabileceğini ve bu durumun MP'lerin denizel ortamlara taşınmasını geciktirebileceğini ya da bütünüyle engelleyebileceğini düşündürmektedir.

Toprak; kayaların ayrışması sonucu oluşan ve yeryüzünü ince bir tabaka halinde kaplayan karmaşık bir doğal sistemdir. Aynı zamanda yeraltı suyundaki safsızlıkları filtreleme kapasitesi sayesinde insan sağlığı için hayati öneme sahiptir. Toprak sağlığı, toprağın bitkileri, hayvanları ve insanları destekleme kapasitesinin bir göstergesi olarak tanımlanır ve bu sağlığın değerlendirilmesinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin birlikte dikkate alınması gerekir (Fausak ve ark., 2024). Bu parametrelerden herhangi birinin ihmal edilmesi, toprağın ekosistem hizmetlerinin tam olarak

anlaşılmasını ve sürdürülebilir yönetimini zorlaştırabilir (Meersmans ve ark., 2024).

Mikroplastikler, bileşim ve fiziksel özellikleri bakımından toprak mineralleri veya organik maddelerden oldukça farklıdır. Bu nedenle, MP'lerin toprak ortamında birikimi; pH, kation değişim kapasitesi, besin elementlerinin mobilitesi ve ağır metallerin bağlanabilirliği gibi temel kimyasal özelliklerde değişikliklere yol açabilir. MP'lerin bu etkileri, toprak sağlığı üzerinde potansiyel olumsuz sonuçlara neden olabileceği yönünde artan bir endişeyi beraberinde getirmiştir.

Bu kitap bölümünde, mikroplastiklerin toprakların temel kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerinin bilimsel literatür doğrultusunda değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bu etkilerin mekanizmalarını, ortaya çıkan bulgular arasındaki farklılıkları ve gelecekte bu alanda yapılması gereken araştırma önceliklerini tartışmaya açacaktır.

1. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK pH'SI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak pH'sı; minerallerin ve toprak organik karbonunun (SOC) bağlanma kapasitesi, besin elementleri ile kirleticilerin biyoyararlanımı ve adsorpsiyonu, ayrıca mikrobiyal toplulukların bileşimi ve aktivitesi gibi pek çok temel toprak özelliğini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür (Liu ve ark., 2017). Bu bağlamda, toprak pH'sındaki değişiklikler, ekosistem işleyişi üzerinde geniş kapsamlı sonuçlar doğurabilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin toprak pH'sı üzerinde anlamlı etkiler yaratabildiğini göstermektedir. Örneğin, %1 ve %10 (w/w) oranlarında uygulanan polilaktik asit (PLA) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) mikroplastiklerinin toprak pH'ını artırdığı bildirilmiştir (W. Yang ve ark., 2021). Benzer şekilde, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) mikroplastik, biyoplastik malç filmleri ve %0.4 oranında polyester (PES) mikroplastikler de toprak pH'sında artışa neden olmuştur (Lozano ve ark., 2021).

Bununla birlikte, MP'lerin tümü aynı etkiyi göstermemektedir. Bazı çalışmalar, mikroplastik uygulamalarının toprak pH'ını düşürdüğünü ya da anlamlı bir değişiklik yaratmadığını da ortaya koymuştur (Erdem ve ark., 2025). Örneğin, 30 günlük inkübasyon süresinin sonunda HDPE MP'lerinin toprak pH'ını düşürdüğü; buna karşın PLA ve tekstil lifi kaynaklı MP'lerin

anamlı bir etki göstermediği bildirilmiştir (Boots ve ark., 2019). Ayrıca, aynı mikroplastik türünün farklı dozları veya parçacık boyutlarının da farklı etkiler yaratabileceği gözlemlenmiştir. Nitekim Dong ve ark. (2018), PS ve politetrafloroetilen (PTFE) mikroplastiklerinin artan konsantrasyonlarıyla birlikte toprak pH'ında doza bağlı bir azalma meydana geldiğini ve küçük boyutlu MP'lerin büyük parçalara kıyasla daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Mikroplastiklerin toprak pH'sı üzerindeki etkileri, yalnızca kendilerine özgü yapısal ve kimyasal özelliklerden değil, aynı zamanda toprak tipi, nem durumu, organik madde içeriği ve tarımsal uygulamalardan da etkilenmektedir. Örneğin, mikro fiberlerin (MF) varlığı, özellikle kurak koşullarda toprak nemi ile ilişkili olarak pH'ı artırmıştır (Lozano ve ark., 2021). Tarım topraklarında PE mikroplastiklerinin birikimi ise homojen olmayan pH değişikliklerine neden olmuş; bu değişikliklerin toprak tipi ve gübreleme geçmişine göre çeşitlilik gösterdiği belirlenmiştir. %0.2 (w/w) oranında PE uygulaması, gübrenememiş kırmızı toprakta pH'yı düşürürken, gübrenememiş ya da bileşik gübre uygulanmış çeltik topraklarında pH'yı artırmış; ancak taban suyu yüksek olan topraklarda ve inorganik gübre uygulanan koşullarda anlamlı bir etki yaratmamıştır (H.-Z. Li ve ark., 2021).

Toprak pH'sında meydana gelen bu değişimlere ilişkin çeşitli mekanizmalar öne sürülmüştür. MP'lerin ayrışması sırasında yapılarında bulunan kimyasal bileşiklerin toprak çözeltisine salınması, pH'ta değişimlere yol açabilmektedir. Örneğin, foto oksidasyon süreci sonrasında HDPE MP'lerinden elde edilen alikot pH'ta azalmaya neden olmuştur (Bandow ve ark., 2017). Geniş yüzey alanına sahip MP'ler, topraktaki katyon değişim miktarını etkileyerek hidrojen iyonlarının (H^+) serbest kalmasını kolaylaştırmakta ve bu durum pH üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Ayrıca, toprak mikrobiyal topluluklarının bileşimi ve işlevi de pH'a karşı oldukça hassas olduğundan, MP'lerin mikrobiyal yapıyı değiştirmesi dolaylı yoldan pH üzerinde değişiklik yaratabilmektedir. Nitekim, LDPE MP'lerinin amonyak oksitleyen bakterilerin bolluğunu etkileyerek nitrifikasyon süreçlerini değiştirdiği gösterilmiştir (Rong ve ark., 2021).

Teorik olarak, biyobozunur MP'lerin (örneğin PLA) mineralizasyonu sırasında laktik asit gibi organik asitlerin açığa çıkması, pH'ta azalmaya neden olabilirken, bazı çalışmalar PLA MP'lerinin pH'ı artırdığını da göstermiştir

(Feng ve ark., 2022). Bu çelişkili bulgular, toprak özelliklerine ve deney koşullarına bağlı olarak MP'lerin etkilerinin büyük ölçüde bağlamsal olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, toprakta biriken organik madde miktarının artması da pH'ı etkileyebilir; çünkü asidik organik maddelerin fazlalığı, pH'ın düşmesine neden olabilir. Öte yandan, mikroplastik kirliliği ile değişen mikrobiyal yapının, hidrojen iyonu salınımında görevli mikroorganizmaların aktivitesini etkileyerek pH üzerinde ikincil etkiler yaratabileceği öne sürülmektedir.

2. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞİ VE TUZLULUĞU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak elektriksel iletkenliği (EC), toprağın çözünmüş iyonları iletme kapasitesini yansıttığı için, toprak kalitesinin izlenmesinde ve tarımsal üretim sistemlerinin yönetiminde yaygın olarak kullanılan bir göstergedir. EC değeri çoğunlukla toprakta biriken sodyum (Na^+), kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) gibi çözünmüş tuz iyonlarının konsantrasyonu ile ilişkilidir; bu nedenle toprak tuzluluğu kavramı ile doğrudan bağlantılıdır (Omar ve ark., 2024).

Son dönemlerde yapılan çalışmalar, toprakta mikroplastik (MP) varlığının EC üzerindeki etkilerinin oldukça sınırlı ve değişken olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, %1 oranında uygulanan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) mikroplastiklerinin, toprak elektriksel iletkenliğinde anlamlı bir değişikliğe neden olmadığı bildirilmiştir. Qi ve ark. (2020), bu durumu bitki etkisiyle açıklamaktan ziyade, doğrudan toprak tuzluluğu düzeyleriyle ilişkilendirmiştir. Çünkü EC değeri, esasen çözünmüş iyonların miktarını ve bu iyonların iletim potansiyelini yansıtır.

Buna karşın, daha yüksek oranlarda (%10.0) LDPE ve genel polietilen MP uygulamalarının da toprak EC değerlerinde belirgin bir değişikliğe yol açmadığı görülmüştür (Brown ve ark., 2022). Bu bulgular, mikroplastiklerin toprak elektriksel iletkenliği üzerindeki etkilerinin doz bağımlı olabileceği yönünde bir varsayımı gündeme getirmiştir. Ancak, bu hipotezi doğrulayabilmek için farklı toprak türleri, mikroplastik türleri ve çevresel koşullarda daha fazla sayıda deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Mikroplastiklerin toprak tuzluluğu üzerindeki etkileri ise EC'den farklı olarak daha net gözlemlerle desteklenmektedir. Literatürde yer alan çok sayıda

çalışma, mikroplastik kirliliğinin ardından toprak tuzluluğunda artış meydana geldiğini göstermektedir (Hernández-Arenas ve ark., 2021). Bu artış, özellikle toprak tipine ve toprağın katyonları tutma kapasitesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Katyon değişim kapasitesi yüksek olan topraklarda, çözünmüş tuz iyonlarının tutulması daha etkin gerçekleştiğinden, yüzeydeki tuz birikimi ve dolayısıyla tuzluluk seviyesi artabilir.

Özellikle LDPE ve polivinil klorür (PVC) gibi plastik türleri, tarımda yaygın olarak plastik malçlama amacıyla kullanılmakta ve zamanla çevresel koşullarda bozularak toprağa mikroplastik formunda kalıntılar bırakmaktadır (Mansoor ve ark., 2022). Bu süreç, uzun vadede tuzluluk düzeylerinde artışa neden olabilir. Ancak kısa vadede plastik malç uygulamasının buharlaşmayı azaltarak tuz birikimini geciktirme yönünde faydalı olabileceği de belirtilmiştir (Koriyev ve ark., 2025). Bu nedenle, mikroplastiklerin toprak tuzluluğuna etkisi, zaman ölçeğine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişebilen dinamik bir süreçtir.

Olumlu bir yön olarak, bazı çalışmalar tuzluluğun artmasının, toprakta bulunan mikroplastiklerin fungusit gibi pestisitleri adsorbe etme kapasitesini azalttığını da ortaya koymuştur (P. Zhang ve ark., 2020). Bu durum, mikroplastik-pestisit etkileşimlerinin daima sabit olmadığını ve ortam koşullarına göre değişebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Sonuç olarak, mikroplastiklerin toprak elektriksel iletkenliği üzerinde belirgin ve tutarlı bir etkisinin olup olmadığı henüz netleşmemiştir. Ancak, özellikle uzun vadeli birikim durumlarında toprak tuzluluğunun artışı ve bununla bağlantılı ekosistem değişimleri göz ardı edilmemelidir. Bu alanda yapılacak çok yönlü ve kontrollü çalışmalar, mikroplastiklerin toprak iyon dengesine olan etkilerini daha iyi anlamamıza katkı sağlayacaktır.

3. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK ORGANİK MADDESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak organik maddesi, toprak verimliliğinin sürdürülebilirliği, bitki beslenmesi, mikrobiyal aktivite ve besin döngüleri açısından temel bir bileşen olup, tarımsal üretkenlik ve ekosistem sağlığı ile doğrudan ilişkilidir (Wang ve ark., 2025). Mikroplastiklerin toprak organik maddesi birikimi üzerindeki etkilerine yönelik yapılan araştırmalar, oldukça değişken ve yer yer çelişkili sonuçlar ortaya koymuştur. Bazı çalışmalar MP'lerin toprak organik maddesi

birikimini baskıladığını, bazıları teşvik ettiğini, bazıları ise belirgin bir etkisinin olmadığını bildirmiştir (Chen ve ark., 2020; H.-Z. Li ve ark., 2021). Bu farklılıklar, mikroplastiklerin toprak üzerindeki etkilerinin tek bir faktöre bağlı olmadığını; toprak özellikleri, MP tipi, dozajı ve çevresel koşullar gibi çok sayıda parametre tarafından şekillendirildiğini göstermektedir. Örneğin, bir çalışmada mikroplastiklerin toprak organik karbon içeriğini alkali koşullarda, asidik koşullara göre daha belirgin bir şekilde azalttığı ve toprak organik karbon içeriğinin MP konsantrasyonundaki artışla birlikte düşüş gösterdiği rapor edilmiştir. Bu bulgu, toprak pH'ının, mikroplastiklerin davranışını ve toprak içindeki etkilerini önemli ölçüde yönlendirebileceğini göstermektedir. Asidik ortamlarda MP'lerin daha hızlı yaşlanarak kimyasal yapılarını değiştirmesi, bu süreçte organik bileşiklerin daha hızlı serbest kalmasına neden olabilir (Binda ve ark., 2023).

Toprak organik maddesi içeriğindeki değişimler, mikrobiyal toplulukların yapısı ve aktiviteleriyle de yakından ilişkilidir. Mikroplastikler, bazı mikroorganizmaların metabolizmasını uyarak toprak organik karbon birikimini dolaylı yoldan hızlandırabilir (Liang ve ark., 2021). Örneğin, MP uygulamasının toprak organik maddesi içeriğini düşürmesi, toprakta CO₂ fiksasyonunu gerçekleştiren Chloroflexi bakterilerinin bolluğunda gözlenen benzer azalmayla ilişkilendirilmiştir (Liu ve ark., 2021). Ayrıca, mikroplastik kirliliğine maruz kalan topraklarda, mikrobiyal topluluk yapısındaki zamansal değişim ve ardıllık süreçleri nedeniyle toprak organik maddesi içeriği de etkilenebilir. Nitekim bazı çalışmalarda, mikroplastiklerin, r-stratejisi sergileyen bakterilerin (örneğin Ruminiclostridium) biyokütle artışı teşvik ettiği ve bunun da toprak organik maddesinin parçalanması ve CO₂ salınımının artmasıyla sonuçlandığı belirlenmiştir (Li ve ark., 2023).

MP'lerin toprak organik maddesi üzerindeki etkilerine ilişkin mevcut çalışmalar, çoğunlukla çözünmüş organik madde fraksiyonu üzerinde yoğunlaşmıştır. Çözünmüş organik madde, toprak organik maddesinin dinamik döngüsünde, nitrojen ve fosfor taşınımında ve aynı zamanda topraktaki kirleticilerin hareketliliğinde önemli bir role sahiptir. Araştırmalar, polietilen (PE) mikroplastiklerinin toprağın çözünmüş organik madde içeriğini azalttığını ortaya koymuştur. Bu etkiler, yerinde çözünmüş organik madde üretimi ile mineralizasyon arasındaki dengenin bozulmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek dozlarda mikroplastik ilavesi, toprak çözeltisindeki toplam çözünmüş

azot, çözülmüş organik azot, toplam çözülmüş fosfor ve çözülmüş organik fosfor içeriklerinde anlamlı artışlara neden olmuştur. Bu bulgular, mikroplastiklerin topraktaki C, N ve P havuzlarını aktive ettiğini ve besin maddelerinin çözültideki dolaşımını kolaylaştırabileceğini göstermektedir. Buna ek olarak, bazı MP türleri ya da bunların bozunma ürünleri doğrudan çözünür organik karbon kaynağı olarak davranabilir. Özellikle biyoplastik türlerindeki MP'ler, toprak bakterileri tarafından çözünür karbon formlarına dönüştürülebilmektedir (Guliyev ve ark., 2023). Bu bağlamda, topraktaki mikroplastik konsantrasyonunun artması, genellikle çözünür organik karbon düzeylerinde de artışa neden olmuştur. Örneğin, %2 (w/w) oranında PLA mikroplastik uygulaması, toprak çözünür organik karbon konsantrasyonunu anlamlı düzeyde yükseltmiştir (Feng ve ark., 2022).

Toprak organik maddesinin toprak sağlığı ve bitki gelişimindeki merkezi rolü dikkate alındığında, mikroplastik kirliliği altında toprak organik maddesi dinamiklerinin ve bunun bitki performansına yansımalarının daha ayrıntılı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, MP'lerin toprak organik madde üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmaların hem mikrobiyal süreçler hem de besin döngüleri perspektifinden daha bütüncül yaklaşımlarla ele alınması büyük önem arz etmektedir.

4. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK BESİN MADDELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak besin maddeleri; doğal toprak sistemlerinde esas olarak mineral ayrışması ve organik maddenin parçalanması yoluyla sağlanırken, tarım topraklarında bu süreçlere ek olarak yapay gübre uygulamaları da önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Mikroplastiklerin bu besin maddeleri üzerindeki etkilerine dair yapılan çalışmalar, çelişkili bulgular ortaya koymaktadır. Bazı araştırmalarda MP'lerin besin elementleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığı, bazı çalışmalarda ise etkilerin nötr ya da pozitif olabileceği gösterilmiştir (Feng ve ark., 2022; Yu ve ark., 2020a; Zhu ve ark., 2022).

Örneğin, %1 (w/w) oranında PVC mikroplastiklerinin bulaştığı bir çeltik tarlasında, mevcut azot (N) içeriğinde %10 – 13, mevcut fosfor (P) içeriğinde ise yaklaşık %30 oranında azalma tespit edilmiştir (Yan ve ark., 2021). Benzer şekilde, PE MP'lerinin toprakta mevcut fosfor düzeylerini düşürdüğü; PSMP ve PTFE MP'lerinin ise hem N hem de P içeriğinde azalmaya neden olduğu

bildirilmiştir. Bununla birlikte, %0.2 (w/w) oranında uygulanan bazı MP türlerinin besin elementleri üzerinde anlamlı bir değişim yaratmadığı da rapor edilmiştir (H.-Z. Li ve ark., 2021).

Öte yandan, MP'lerin besin elementleri üzerindeki bazı olumlu etkileri de gözlemlenmiştir. Örneğin, mikroplastikler, toprakta NO₃- – N sızıntısını yaklaşık %70 oranında azaltarak, toprak agregasyonunu artırmakta ve böylece besinlerin tutulmasını kolaylaştırmaktadır (Lozano ve ark., 2021).

Mikroplastiklerin toprak besin maddeleri üzerindeki farklı yönlü etkilerini açıklamak üzere çeşitli mekanizmalar ileri sürülmüştür. Bunlardan ilki, bazı MP'lerin yapısında yer alan fosforlu antioksidanlar, azot (örneğin poliakrilonitril, poliaramid) ve klor (örneğin PVC) gibi elementlerin ayrışma sonrası toprağa salınarak besin elementlerini doğrudan etkileyebilmesidir (de Souza Machado ve ark., 2019). İkinci olarak, MP'ler yüzey özellikleri ve adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle besin maddelerini adsorbe edebilir; bu da biyoyararlanımın düşmesine yol açabilir. Özellikle uzun süreli çevresel maruziyet sonrası gözenekliliği artan ve yüzey yükü kazanan MP'lerin adsorpsiyon kapasitelerinde artış gözlenmiştir (Mao ve ark., 2020).

Üçüncü olarak, besin döngüleri büyük ölçüde mikroorganizmaların yürüttüğü biyokimyasal süreçler aracılığıyla kontrol edilmektedir. MP'ler, toprak mikrobiyal topluluğunun yapısını ve aktivitesini değiştirerek, bu döngülere müdahale edebilir (Aralappanavar ve ark., 2024; Li ve ark., 2023). Örneğin, toprak fosforundaki değişikliklerin, mikrobiyal aracılı organik P mineralizasyonu ve inorganik P çözünmesi ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Ayrıca, arbusküler mikorizal mantarlar (AMF), bitki-fosfor ilişkisini artıran simbiyotik organizmalardır; ancak MP'lerin AMF'nin çeşitliliğini, topluluk yapısını ve kök kolonizasyon yeteneğini değiştirerek dolaylı yoldan P biyoyararlanımını etkileyebileceği bildirilmektedir (Lammel ve ark., 2025) Son olarak, MP'ler toprak fiziko-kimyasal özelliklerini etkilemesi, besin maddelerinin toprakta tutulmasını veya sızmasını da dolaylı olarak değiştirebilir (Cheng ve ark., 2024). MP'ler iyileştirilmiş toprak agregasyonu oluşturması, besin kayıplarının azaltılmasında fayda sağlayabilir (Lehmann ve ark., 2021).

Potasyum (K) üzerindeki etkiler ise daha az çalışılmış olmakla birlikte, bazı bulgular polietilen ve polistiren gibi MP türlerinin mevcut potasyum içeriğini azalttığını göstermektedir (Yu ve ark., 2021). Bunun temel

nedenlerinden biri, toprakta potasyumun ana kaynağı olan mika ve kil minerallerinin MP'lerin varlığı nedeniyle ayrışmamasıdır (Lamarca-Irisarri ve ark., 2019). Özellikle toprak pH'ındaki düşüş, bu ayrışma süreçlerini daha da yavaşlatabilir. Ayrıca, toprak enzim aktivitelerindeki (örneğin üreaz ve lakkaz) değişikliklerin de potasyum mobilitesi üzerinde etkili olabileceği bildirilmiştir (Yu ve ark., 2020a). Ancak, MP'lerin potasyum dinamiklerine etkileri hâlâ sınırlı sayıda çalışma ile ele alındığından, bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK KİRLETİCİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mikroplastikler, hem doğrudan hem de dolaylı yollarla toprak ortamındaki kirleticilerin (özellikle organik ve inorganik türlerin) taşınımı, biyoyararlanımı, biyobirikimi ve toksisitesi üzerinde belirgin etkiler gösterebilmektedir (Sajjad ve ark., 2022). Bu etkiler, MP'lerin içerdikleri katkı maddeleri, yüzey özellikleri ve çevresel etkileşimleri ile şekillenmektedir. İlk olarak, MP'ler çevreye bırakıldıklarında, içeriklerinde bulunan plastikleştiriciler, antioksidanlar, alev geciktiriciler gibi katkı maddeleri ile toksik metaller ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) gibi kirleticileri toprağa salabilirler (Kang ve ark., 2025). İkinci olarak, küçük boyutları, yüksek yüzey alanları ve yüzey morfolojileri sayesinde, MP'ler hem organik hem de inorganik kirleticiler için yüksek sorpsiyon kapasitesine sahiptir ve böylece bu kirleticiler için taşıyıcı rolü oynayabilirler (Wang ve ark., 2020). Bu bağlamda, MP'lerin toprak sistemine dahil olması kirleticilerin yayılımını artırarak çevresel riskleri güçlendirebilir. Üçüncü olarak, MP'lerin toprak agregasyonu, porozite, hacim yoğunluğu ve organik madde içeriği gibi toprak fiziko-kimyasal özellikleri üzerinde değişimlere neden olması, kirleticilerin dönüşüm süreçlerini de dolaylı biçimde etkileyebilir.

5.1. Ağır Metaller

MP'lerin kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), çinko (Zn), bakır (Cu), kobalt (Co), krom (Cr) ve nikel (Ni) gibi toksik ağır metalleri adsorbe edebildiği önceki çalışmalarla ortaya konmuştur (Rezaei Kahkha ve ark., 2025). Bu sayede MP'ler, bu metaller için çevresel vektör işlevi görerek mobilitelerini ve biyoyararlanımlarını değiştirebilir. Ancak, bu sorpsiyon kapasitesi MP'nin tipi

ve fiziksel-kimyasal özellikleri kadar, metal iyonunun özelliklerine de bağlıdır. Örneğin, PE ve PVC MP'leri Zn, Pb ve Cr için yüksek adsorpsiyon kapasitesi gösterirken, PET MP'lerinin bu kapasitesi oldukça düşüktür (Tumwesigye ve ark., 2023). Pb, Cu ve Cd gibi metaller arasında, MP'lerin Pb iyonlarını diğerlerinden daha güçlü adsorbe ettiği, bu durumun ise Pb'nin MP yüzeyine elektrostatik etkileşimle bağlanmasından kaynaklandığı gösterilmiştir (Zou ve ark., 2020).

Adsorpsiyon davranışları MP'lerin yüzey morfolojisi, porozitesi, partikül boyutu ve çevresel yaşlanma derecesi gibi özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir (Liu ve ark., 2025). Yaşlanma sonucu oluşan oksijenli fonksiyonel gruplar ve pürüzlü yüzeyler, ağır metaller için daha fazla bağlanma bölgesi oluşturur, örneğin, daha küçük ve yüksek yüzey alanına sahip MP'ler, genellikle daha yüksek sorpsiyon kapasitesine sahiptir (Chen ve ark., 2024; Muthuraja ve ark., 2024).

Ayrıca, MP'lerin toprak ortamında ağır metallerin davranışını da etkilediği gösterilmiştir. MP varlığı, topraktaki metal iyonlarının DTPA ile ekstrakte edilebilir fraksiyonlarını artırabilir; örneğin, %10 PE MP ilavesiyle Zn ve Pb'nin hareketliliği önemli ölçüde artmıştır (H. Li ve ark., 2021). Bu durum, MP'lerin toprak biyotası ve bitkiler için potansiyel toksisiteyi artırabileceğini düşündürmektedir.

Bununla birlikte, bazı bulgular MP'lerin metal iyonlarını daha az biyoyararlanabilir formlara dönüştürebileceğini de göstermektedir. Örneğin, PE MP'lerinin bazı metallerin organik bağlı fraksiyonlara geçişini teşvik ederek biyoyararlanımlarını azaltabileceği bildirilmiştir (Yu ve ark., 2020b). MP özellikleri (polimer tipi, partikül boyutu, yaşlanma derecesi) ve toprak koşulları (pH, iyonik kompozisyon, hümik asit varlığı) bu etkilerin yönünü belirlemede önemli rol oynamaktadır (Chen ve ark., 2023; Wu ve ark., 2025). Nitekim, biyobozunur PBAT filmlerinin PE filmlerine göre çevrede daha hızlı bozunarak daha fazla ağır metal adsorbe ettiği bildirilmiştir.

5.2. Organik Kirleticiler

MP'ler, pestisitler, antibiyotikler, PAH'lar, PCB'ler ve kişisel bakım ürünleri (PPCP'ler) gibi organik kirleticileri yüzeylerinde adsorbe edebilirler (Tumwesigye ve ark., 2023). Bu sorpsiyon kapasitesi; MP'nin polimer türü, yüzey özellikleri, bağlanma enerjisi ve yapısı ile kirleticinin çözünürlüğü,

moleküler ağırlığı, elektriksel yükü ve kararlılığı gibi faktörlerden etkilenir. Ayrıca, ortamın pH'ı, sıcaklığı ve iyonik gücü de bu etkileşimleri modifiye eder (Rai ve ark., 2022; Wang ve ark., 2020).

Toprakta MP varlığı, doğal toprak partiküllerinin adsorpsiyon kapasitesini azaltarak kirleticilerin hareketliliğini artırabilir. Örneğin, PE MP'leri PS MP'lerine ve doğal toprağa kıyasla daha fazla triklosan adsorbe etmiş ve bu kirleticiyi daha kolay salmıştır (Chen ve ark., 2021). Bununla birlikte, bazı MP'ler tetrasiklinin çözünür fraksiyonunu azaltırken değiştirilebilir (zayıf bağlı) fraksiyonunu artırabilir. Bu durum, antibiyotığın toprakta yayılımını sınırlayarak mikrobiyal etki alanını değiştirebilir.

MP'ler aynı zamanda bazı organik kirleticiler için toksisiteyi artırıcı rol de oynayabilir. MP'lere adsorbe olan sülfametoksazol gibi bileşiklerin, toprak canlılarında bağırsağa özgü mikrobiyota yapısını ve antibiyotik direnç gen profillerini etkilediği belirlenmiştir (Xu ve ark., 2021). Ayrıca, MP'lerin ekstrakte edilebilir katkı maddeleri, toprak organizmaları (örneğin nematodlar) üzerinde doğrudan toksik etkiler yaratabilir.

MP'ler, organik kirleticilerin bozunma süreçlerini de etkileyebilir. Vektör etkisiyle mikrobiyal bozunma süreçlerini hızlandırabileceği öne sürülse de, bu etkilere dair kanıtlar hâlen çoğunlukla su ortamlarındaki çalışmalarla sınırlıdır. Örneğin, 30 günlük bir toprak inkübasyon deneyinde, PP MP'lerinin glifosatın bozunması üzerinde anlamlı bir etkisi gözlemlenmemiştir (Yang ve ark., 2018). Ancak teorik olarak MP'ler, toprak mikrobiyal aktivitesini ve fiziko-kimyasal yapıyı değiştirerek, özellikle kolay bozunabilen organik kirleticilerin ayrışma hızlarını etkileyebilir.

6. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK SORPSİYON VE KATYON DEĞİŞİM KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak sorpsiyon kapasitesi, toprağın çeşitli kimyasal bileşikleri adsorbe etme ve gerektiğinde bunları desorbe etme yeteneğini ifade eder ve bu yönüyle toprak sağlığının önemli göstergelerinden biri olarak kabul edilir (Lehmann ve ark., 2020; Strawn, 2021). Buna paralel olarak, kation değişim kapasitesi (KDK) ise, toprağın başta kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}) ve potasyum (K^+) gibi temel besin elementlerini tutarak bitki köklerine sağlayabilme potansiyelini belirleyen kritik bir toprak kimyasal özelliğidir. KDK hem besin

elementlerinin korunması hem de potansiyel olarak toksik katyonların immobilizasyonu açısından büyük öneme sahiptir.

Son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalar, mikroplastik kirliliğinin toprakların sorpsiyon kapasitesi ve katyon değişim kapasitesi üzerinde değişikliğe yol açtığını ortaya koymuştur (En-Nejmy ve ark., 2024; Wen ve ark., 2022). Özellikle toprak pH'ında MP'lerin varlığıyla meydana gelen artış, bu kimyasal etkileşimlerin zayıflamasına neden olabilir. Bilindiği üzere, pH'taki yükselme, toprağın iyonları yüzeyine bağlama kapasitesini azaltmakta ve bu da sorpsiyon dinamiklerini zayıflatmaktadır.

Mikroplastikler yapısal olarak düşük kristaliniteye sahip, yüzeyinde bağlanma bölgeleri sınırlı olan polimerik materyallerdir. Bu özellikleri nedeniyle, toprak sistemine dahil olduklarında toprak partiküllerinin yüzey yük özelliklerini olumsuz etkileyerek KDK'nın azalmasına neden olurlar (Strawn, 2021). Başka bir deyişle, MP'ler toprak yüzeyine bağlanabilen katyon sayısını sınırlayarak toprak çözeltisinde besin dengesizliğine yol açabilir.

Toprakta MP birikimi sonrası sorpsiyon kapasitesinde gözlenen azalma, ağır metaller gibi çevresel kirleticilerin davranışlarını da doğrudan etkileyebilir. Örneğin, Cd gibi toksik metaller, toprak partiküllerine bağlanamadığında daha serbest hale gelerek bitkiler tarafından alınabilirliği artar ve böylece biyolojik sistemlere taşınma riski yükselir (S. Zhang ve ark., 2020). Bu durum, sadece bitki sağlığı açısından değil, gıda zinciri üzerinden hayvan ve insan sağlığı açısından da potansiyel bir tehdit oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, mikroplastiklerin toprak sistemlerine girişi, sadece fiziksel yapıyı değil, aynı zamanda toprak çözeltisiyle ilişkili kimyasal dengeyi de bozmakta; sorpsiyon ve katyon değişim kapasitesini zayıflatarak toprak sağlığı üzerinde uzun vadeli riskler doğurmaktadır. Bu nedenle, mikroplastiklerin toprak-kimyasal etkileşimleri bağlamında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

7. GELECEK PERSPEKTİFLERİ VE ARAŞTIRMA İHTİYAÇLARI

Mevcut bilimsel veriler, mikroplastiklerin dünya genelindeki farklı toprak tiplerinde yaygın olarak bulunduğunu ve bolluk, boyut, şekil, bileşim ve kaynak açısından büyük çeşitlilik gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Araştırmalar, MP'lerin toprakların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik

özelliklerini değiştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu etkilerin büyüklüğü ve yönü; kullanılan mikroplastiklerin polimer türüne, morfolojisine, uygulama dozuna ve partikül boyutuna bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Bu bağlamda MP'lerin, toprak verimliliğini azaltabileceği ve topraktaki kirleticilerin biyoyararlanımını artırarak hem bitki gelişimini hem de ürün güvenliğini olumsuz yönde etkileyebileceği anlaşılmaktadır.

Ancak, toprağın doğal yapısı oldukça karmaşıktır; mineraller, organik maddeler ve biyolojik bileşenler gibi birçok faktör bir arada bulunur ve mikroplastiklerle etkileşime girdiklerinde öngörülmesi güç sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, kuraklık, sıcaklık, atmosferik CO₂ seviyesi, tarımsal uygulamalar, organik madde kalıntıları, toprak faunası ve bitki varlığı gibi çevresel koşullar MP'lerin toprak ekosistemlerindeki davranışlarını ve etkilerini ciddi biçimde şekillendirebilir. Bu nedenle, mikroplastiklerin topraklardaki çevresel kaderi ve uzun vadeli etkileri hakkında yapılan çalışmalar hâlâ sınırlı ve sonuçlar büyük ölçüde tartışmalıdır.

Bu çerçevede, özellikle kimyasal özellikler açısından aşağıdaki öncelikli araştırma alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır:

Toprak özellikleri ve etkileşim mekanizmaları

- MP'lerin toprak mineralleri ve organik maddelerle etkileşim biçimi henüz net değildir.
- Farklı toprak ve MP türlerinin fizikokimyasal farklılıkları, etkileşim karmaşıklığını artırmaktadır.
- Bu nedenle, farklı MP ve toprak türlerinde yapılacak kapsamlı deneysel çalışmalar gereklidir.

Aşınmış ve biyobozunur mikroplastikler

- Mevcut çalışmalar genellikle kısa süreli ve bakir MP'ler ile sınırlıdır.
- Doğal koşullarda MP'ler zamanla aşınır, parçalanır ve biyolojik olarak bozunabilir hale gelir.

Çoklu kirletici etkileşimleri

- MP'ler, topraktaki ağır metaller, pestisitler ve antibiyotiklerle etkileşebilir.
- Bu etkileşimler sinerjik veya antagonistik olup, toprak biyotası üzerinde öngörülemeyen etkilere yol açabilir.

- MP ile kirletici etkileşimleri daha kapsamlı biçimde araştırılmalıdır. *Tuzluluk, sodiklik ve diğer kimyasal parametreler*
- MP'lerin tuzluluk ve sodisite üzerindeki eşzamanlı etkileri yeterince bilinmemektedir.
- Sodyum adsorpsiyon oranı, $\text{CaCO}_3 - \text{CaSO}_4$ içeriği, elektriksel direnç ve pH gibi parametrelerin MP etkisiyle değişimi detaylandırılmalıdır.

Toprak sistemleri ile mikroplastiklerin etkileşimi oldukça karmaşık ve çok katmanlıdır. Bu nedenle, mikroplastiklerin toprak kimyasına olan etkilerini açıklamak için disiplinlerarası yaklaşımı benimseyen, uzun süreli, gerçek çevre koşullarını taklit eden deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu tür araştırmalar yalnızca mikroplastiklerin çevresel risklerinin daha iyi anlaşılmasını değil, aynı zamanda sürdürülebilir toprak yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini de mümkün kılacaktır.

KAYNAKÇA

- Anonim. (2025). *Plastik meselesi*. Erişim Tarihi: Haziran 2025
<https://plastikgirisimi.org/plastik-meselesi>
- Aralappanavar, V. K., Mukhopadhyay, R., Yu, Y., Liu, J., Bhatnagar, A., Praveena, S. M., Li, Y., Paller, M., Adyel, T. M., Rinklebe, J., Bolan, N. S., Sarkar, B. (2024). Effects of microplastics on soil microorganisms and microbial functions in nutrients and carbon cycling – A review. *Science of The Total Environment*, 924, 171435.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171435>
- Bandow, N., Will, V., Wachtendorf, V., Simon, F.-G. (2017). Contaminant release from aged microplastic. *Environmental Chemistry*, 14(6), 394–405. <https://doi.org/10.1071/EN17064>
- Binda, G., Zanetti, G., Bellasi, A., Spanu, D., Boldrocchi, G., Bettinetti, R., Pozzi, A., Nizzetto, L. (2023). Physicochemical and biological ageing processes of (micro)plastics in the environment: a multi-tiered study on polyethylene. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 6298–6312. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22599-4>
- Boots, B., Russell, C. W., Green, D. S. (2019). Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11496–11506.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- Brown, R. W., Chadwick, D. R., Thornton, H., Marshall, M. R., Bei, S., Distaso, M. A., Bargiela, R., Marsden, K. A., Clode, P. L., Murphy, D. V., Pagella, S., Jones, D. L. (2022). Field application of pure polyethylene microplastic has no significant short-term effect on soil biological quality and function. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108496.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108496>
- Chen, H., Wang, Y., Sun, X., Peng, Y., Xiao, L. (2020). Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function. *Chemosphere*, 243, 125271.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125271>
- Chen, P.-W., Hsiao, M.-N., Xiao, L.-W., Liu, Z.-S. (2024). Adsorption behavior of heavy metals onto microplastics derived from conventional and biodegradable commercial plastic products. *Science of The Total*

- Environment*, 951, 175537.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175537>
- Chen, X., Gu, X., Bao, L., Ma, S., Mu, Y. (2021). Comparison of adsorption and desorption of triclosan between microplastics and soil particles. *Chemosphere*, 263, 127947.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127947>
- Chen, Y., Tang, H., Cheng, Y., Huang, T., Xing, B. (2023). Interaction between microplastics and humic acid and its effect on their properties as revealed by molecular dynamics simulations. *Journal of Hazardous Materials*, 455, 131636. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131636>
- Cheng, Y., Wang, F., Huang, W., Liu, Y. (2024). Response of soil biochemical properties and ecosystem function to microplastics pollution. *Scientific Reports*, 14(1), 28328. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80124-8>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Dong, Q. g., Yang, Y., Zhang, T., Zhou, L., He, J., Chau, H. W., Zou, Y., Feng, H. (2018). Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area. *Agricultural Water Management*, 201, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.011>
- Duis, K., Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- En-Nejmy, K., El Hayany, B., Al-Alawi, M., Jemo, M., Hafidi, M., El Fels, L. (2024). Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts. *Ecotoxicology*

- and *Environmental Safety*, 288, 117332. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117332>
- Erdem, H., Gence, C. Ç., Öztürk, M., Buhan, E., Kholikulov, S. T., Kaya, Y. (2025). Microplastics in soil increase cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(9), 575. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08222-5>
- Fausak, L. K., Bridson, N., Diaz-Osorio, F., Jassal, R. S., Lavkulich, L. M. (2024). Soil health – a perspective [Review]. *Frontiers in Soil Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>
- Feng, X., Wang, Q., Sun, Y., Zhang, S., Wang, F. (2022). Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127364. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127364>
- Guliyev, V., Tanunchai, B., Udovenko, M., Menyailo, O., Glaser, B., Purahong, W., Buscot, F., Blagodatskaya, E. (2023). Degradation of bio-based and biodegradable plastic and its contribution to soil organic carbon stock. *Polymers*, 15(3).
- Hernández-Arenas, R., Beltrán-Sanahuja, A., Navarro-Quirant, P., Sanz-Lazaro, C. (2021). The effect of sewage sludge containing microplastics on growth and fruit development of tomato plants. *Environmental Pollution*, 268, 115779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115779>
- Kang, Q., Zhang, K., Dekker, S. C., Mao, J. (2025). Microplastics in soils: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 960, 178298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178298>
- Koriyev, M., Mirzahmedov, I., Boymirzaev, K., Juraev, Z. (2025). Effects of mulching, terracing, and efficient irrigation on soil salinity reduction in Uzbekistan's Fergana Valley. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1), 2449201. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2449201>
- Lamarca-Irisarri, D., Van Driessche, A. E. S., Jordan, G., Cappelli, C., Huertas, F. J. (2019). The role of pH, temperature, and NH_4^+ during mica weathering. *ACS Earth and Space Chemistry*, 3(11), 2613–2622. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00219>
- Lammel, D. R., Kim, S. W., Rong, L., Chen, H., Ingraffia, R., Rillig, M. C. (2025). Effects of microplastic types and shapes on the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in different soil types.

- Environmental Science and Pollution Research*, 32(20), 12504–12512. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36408-1>
- Lehmann, A., Leifheit, E. F., Gerdawischke, M., Rillig, M. C. (2021). Microplastics have shape- and polymer-dependent effects on soil aggregation and organic matter loss – an experimental and meta-analytical approach. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00007-x>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Li, H.-Z., Zhu, D., Lindhardt, J. H., Lin, S.-M., Ke, X., Cui, L. (2021). Long-term fertilization history alters effects of microplastics on soil properties, microbial communities, and functions in diverse farmland ecosystem. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4658–4668. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04849>
- Li, H., Wang, F., Li, J., Deng, S., Zhang, S. (2021). Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: Kinetics, isotherms, thermodynamics, and molecular dynamics simulation. *Chemosphere*, 264, 128556. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128556>
- Li, Y., Hou, Y., Hou, Q., Long, M., Wang, Z., Rillig, M. C., Liao, Y., Yong, T. (2023). Soil microbial community parameters affected by microplastics and other plastic residues [Original Research]. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258606>
- Liang, Y., Lehmann, A., Yang, G., Leifheit, E. F., Rillig, M. C. (2021). Effects of microplastic fibers on soil aggregation and enzyme activities are organic matter dependent [Original Research]. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.650155>
- Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., Ritsema, C. J., Geissen, V. (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185, 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.064>
- Liu, Y., Chen, S., Liang, X., Hou, Z., Lin, X., Chao, L. (2025). The effect of different aging methods on the heavy metal adsorption capacity of

- microplastics. *Land Degradation & Development*, 36(3), 778–789. <https://doi.org/10.1002/ldr.5392>
- Liu, Y., Huang, Q., Hu, W., Qin, J., Zheng, Y., Wang, J., Wang, Q., Xu, Y., Guo, G., Hu, S., Xu, L. (2021). Effects of plastic mulch film residues on soil-microbe-plant systems under different soil pH conditions. *Chemosphere*, 267, 128901. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128901>
- Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Onandia, G., Maaß, S., Zhao, T., Rillig, M. C. (2021). Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology*, 58(5), 988–996. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13839>
- Mansoor, Z., Tchuente-Magaia, F., Kowalczyk, M., Adamus, G., Manning, G., Parati, M., Radecka, I., Khan, H. (2022). Polymers Use as Mulch Films in Agriculture—A Review of History, Problems and Current Trends. *Polymers*, 14(23).
- Mao, R., Lang, M., Yu, X., Wu, R., Yang, X., Guo, X. (2020). Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122515. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122515>
- Meersmans, J., Colinet, G., Negassa, W. (2024). Editorial: Soil health, functions, and ecosystem services: insights into soil parameters and methods of integration [Editorial]. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1358548>
- Mohasin, M., Habib, K., Rao, P. S., Ahmad, M., Siddiqui, S. (2025). Microplastics in agricultural soils: sources, impacts, and mitigation strategies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(6), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14114-2>
- Muthuraja, R., Ou, B., Thangavelu, M., Narayanan, T. N., Chittamart, N., Janjaroen, D. (2024). Effects of particle size and aging on heavy metal adsorption by polypropylene and polystyrene microplastics under varying environmental conditions. *Chemosphere*, 369, 143843. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143843>
- Omar, M. d. M., Shitindi, M. J., Massawe, B. H. J., Pedersen, O., Meliyo, J. L., Fue, K. G. (2024). Modeling the electrical conductivity relationship between saturated paste extract and 1:2.5 dilution in different soil

- textural classes [Original Research]. *Frontiers in Soil Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1421661>
- Qi, Y., Ossowicki, A., Yang, X., Huerta Lwanga, E., Dini-Andreote, F., Geissen, V., Garbeva, P. (2020). Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121711. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A., Kim, K.-H. (2022). Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127903. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rezaei Kakhkha, M. R., Piri, J., Faghihi-Zarandi, A., Kaykhahi, M. (2025). Investigation of heavy metals adsorbed on microplastics in drinking water and water resources of Zabol. *Scientific Reports*, 15(1), 14378. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99403-z>
- Rong, L., Zhao, L., Zhao, L., Cheng, Z., Yao, Y., Yuan, C., Wang, L., Sun, H. (2021). LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling. *Science of The Total Environment*, 773, 145640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145640>
- Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M. A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N. P., Nadagouda, M. N., Aminabhavi, T. M. (2021). Microplastics in the environment: Occurrence, perils, and eradication. *Chemical Engineering Journal*, 408, 127317. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127317>
- Strawn, D. G. (2021). Sorption mechanisms of chemicals in soils. *Soil Systems*, 5(1).
- Tumwesigye, E., Felicitas Nnadozie, C., C Akamagwuna, F., Siwe Noundou, X., William Nyakairu, G., Odume, O. N. (2023). Microplastics as vectors of chemical contaminants and biological agents in freshwater ecosystems: Current knowledge status and future perspectives. *Environmental Pollution*, 330, 121829. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121829>

- Wang, F., Zhang, M., Sha, W., Wang, Y., Hao, H., Dou, Y., Li, Y. (2020). Sorption behavior and mechanisms of organic contaminants to nano and microplastics. *Molecules*, 25(8).
- Wang, W., Bi, S., Li, F., Degen, A. A., Li, S., Huang, M., Luo, B., Zhang, T., Qi, S., Qi, T., Bai, Y., Liu, P., Shang, Z. (2025). Soil organic matter composition affects ecosystem multifunctionality by mediating the composition of microbial communities in long-term restored meadows. *Environmental Microbiome*, 20(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00678-6>
- Wen, X., Yin, L., Zhou, Z., Kang, Z., Sun, Q., Zhang, Y., Long, Y., Nie, X., Wu, Z., Jiang, C. (2022). Microplastics can affect soil properties and chemical speciation of metals in yellow-brown soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113958. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113958>
- Wu, H., Peng, T., Li, X., Zhao, Y., Huang, F., Guo, P., Lyu, M., Yin, J., Liu, Q., Gouda, S., Mohamed, I., Huang, Q., Wang, X. (2025). Effects of aging biodegradable agricultural films on soil physicochemical properties and heavy metal speciation. *Toxics*, 13(4).
- Xu, B., Huang, D., Liu, F., Alfaro, D., Lu, Z., Tang, C., Gan, J., Xu, J. (2021). Contrasting effects of microplastics on sorption of diazepam and phenanthrene in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124312. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124312>
- Yan, Y., Chen, Z., Zhu, F., Zhu, C., Wang, C., Gu, C. (2021). Effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(4), 602–609. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02900-2>
- Yang, H., Chen, G., Wang, J. (2021). Microplastics in the marine environment: Sources, fates, impacts and microbial degradation. *Toxics*, 9(2).
- Yang, W., Cheng, P., Adams, C. A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., Wang, F. (2021). Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology and Biochemistry*, 155, 108179. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179>

- Yang, X., Bento, C. P. M., Chen, H., Zhang, H., Xue, S., Lwanga, E. H., Zomer, P., Ritsema, C. J., Geissen, V. (2018). Influence of microplastic addition on glyphosate decay and soil microbial activities in Chinese loess soil. *Environmental Pollution*, 242, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.006>
- Yu, H., Fan, P., Hou, J., Dang, Q., Cui, D., Xi, B., Tan, W. (2020a). Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: An investigation at the aggregate-fraction level. *Environmental Pollution*, 267, 115544. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115544>
- Yu, H., Hou, J., Dang, Q., Cui, D., Xi, B., Tan, W. (2020b). Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. *Journal of Hazardous Materials*, 395, 122690. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122690>
- Yu, H., Qi, W., Cao, X., Hu, J., Li, Y., Peng, J., Hu, C., Qu, J. (2021). Microplastic residues in wetland ecosystems: Do they truly threaten the plant-microbe-soil system? *Environment International*, 156, 106708. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106708>
- Zhang, P., Huang, P., Sun, H., Ma, J., Li, B. (2020). The structure of agricultural microplastics (PT, PU and UF) and their sorption capacities for PAHs and PHE derivatives under various salinity and oxidation treatments. *Environmental Pollution*, 257, 113525. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113525>
- Zhang, S., Han, B., Sun, Y., Wang, F. (2020). Microplastics influence the adsorption and desorption characteristics of Cd in an agricultural soil. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121775. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121775>
- Zhu, F., Yan, Y., Doyle, E., Zhu, C., Jin, X., Chen, Z., Wang, C., He, H., Zhou, D., Gu, C. (2022). Microplastics altered soil microbiome and nitrogen cycling: The role of phthalate plasticizer. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127944. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127944>
- Zou, J., Liu, X., Zhang, D., Yuan, X. (2020). Adsorption of three bivalent metals by four chemical distinct microplastics. *Chemosphere*, 248, 126064. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126064>

BÖLÜM 6

GÜNÜMÜZ VE GELECEKTE TOPRAKLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE MİKROPLASTİKLERİN ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048451>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Tokat, Türkiye. saniye.140100@gmail.com, Orcid ID:0000-0003-3908-7070

GİRİŞ

Plastikler; düşük maliyet, yüksek dayanıklılık, hafiflik/taşınabilirlik ve benzeri üstünlükleri nedeniyle günlük yaşamda ve endüstriyel faaliyetlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Andrady ve Neal, 2009). 2015'e kadar küresel ölçekte $\approx 6,3$ milyar ton plastik atık üretilmiş, bunun $\approx 79\%$ 'u düzenli depolama sahalarında ya da doğal çevrede birikmiştir (Geyer ve ark., 2017). Güncel değerlendirmeler, üretim ve atık miktarlarının artmaya devam ettiğini göstermektedir. Plastik atıkların en önemli sorun alanlarından biri, boyutu 5 mm'den küçük parçacıklar/fragmanlar olarak tanımlanan mikroplastiklerdir (Thomikroplastikson ve ark., 2004). Kökenlerine göre mikroplastikler; çevreye girmeden önce ≤ 5 mm boyutta üretilen birincil mikroplastikler ve daha büyük plastiklerin (ya da birincil mikroplastiklerin) parçalanmasından türeyen ikincil mikroplastikler olarak sınıflandırılır (Akdogan ve Guven, 2019).

Mikroplastikler arasında boyutu 100 nm'den küçük olan parçacıklar ya da fragmanlar nanoplastikler olarak tanımlanır. Son yıllarda mikroplastik kirliliğine yönelik ilgi, denizel ortamdan kademeli biçimde karasal ortama kaymıştır (de Souza Machado ve ark., 2018a; Rillig ve Lehmann, 2020). Denizel ortamdaki plastik atıkların yaklaşık %80'i karasal kaynaklıdır (Andrady, 2011; Jambeck ve ark., 2015). Bu nedenle toprak; atık su ile sulama, biyokatı kullanımı, atmosferik çökelim, kanalizasyon çamurunun araziye uygulanması ve plastik malç kullanımı gibi çeşitli girdiler yoluyla mikroplastikleri alan önemli bir yutak konumundadır (Wang ve ark., 2021c) (Şekil 1). Nitekim, Şili'de bir atık su arıtma tesisinden elde edilen çamurdaki mikroplastik içeriğinin 18–41 parçacık g^{-1} düzeyine ulaştığı tahmin edilmiştir. Ayrıca tarla toprağındaki mikroplastik içeriğiyle kanalizasyon çamuru uygulaması arasında pozitif ilişki saptanmıştır (Corradini ve ark., 2019). Atmosferik yağışlara ilişkin bir araştırmada, Hamburg metropol bölgesinde atmosferdeki mikroplastiklerin ortalama bolluğunun 275 parçacık/ $m^2/gün$ olduğu gösterilmiştir (Klein ve Fischer, 2019). Bu bulgular birlikte ele alındığında toprak, mikroplastiklerin deniz ortamına taşınmasını geciktiren ya da engelleyen geçici veya kalıcı bir yutak işlevi görebilir.

Mineral ve organik bileşenler içeren toprak parçacıklarından farklı olarak mikroplastikler, bileşim ve yüzey özellikleri bakımından özgün davranır. Toprakta mikroplastik birikimi kaçınılmaz olarak toprak

özelliklerini hem doğrudan hem de dolaylı biçimde etkiler. Mikroplastiklerin çoğu hidrofobik bir yüzeye sahiptir; bu durum toprağın su tutma kapasitesini, suyun taşınımını ve toprakta suyun kullanılabilirliğini değiştirebilir (de Souza Machado ve ark., 2018b, 2019). Yüksek adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle mikroplastikler, özellikle organik formlardaki besin maddeleri ya da kirleticilerin adsorpsiyon–desorpsiyon davranışlarını ve elverişliliğini değiştirebilir; böylece toprak verimliliği ve kirletici toksisitesi üzerinde etkiler oluşturabilir (Wang ve ark., 2021a; Yan ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2020a). Toprağın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri toprak sağlığının üç temel göstergesini temsil eder (Kibblewhite ve ark., 2008) ve artan sayıda çalışma, mikroplastiklerin bu özellikleri önemli ölçüde etkilediğini doğrulamaktadır (Zhou ve ark., 2021b).

Birkaç nitelikli derleme bu konuyu ele almış olsa da (Wang ve ark., 2019c, 2020i; Li ve ark., 2020a; Xu ve ark., 2020; Ya ve ark., 2021), çalışmalar çoğunlukla mikroplastiklerin topraklardaki yöntemler, görülme sıklığı, çevresel kaderi, riskleri ve ekolojik etkilerine odaklanmaktadır. Bugüne kadar, mikroplastiklerin toprakların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak özetleyen kapsamlı derlemeler sınırlıdır. Bu çalışma, karasal topraklarda mikroplastiklerin yayılımını ve temel özelliklerini özetlemekte; günümüzde bildirilen etkileri ile gelecekte beklenen eğilimleri birlikte ele alarak toprak özellikleri üzerindeki etkileri bütüncül biçimde tartışmaktadır. Ayrıca, mevcut bulgular temelinde bilgi boşluklarını ve öncelikli araştırma başlıklarını belirleyerek izleme–modelleme–yönetim açısından gelecek yol haritasını ortaya koymayı amaçlamaktadır.

doğrudan kıyaslanamaz ve düşük ölçülen sonuçlar, gerçek kirlilik düzeyini olduğundan daha düşük gösterebilir.

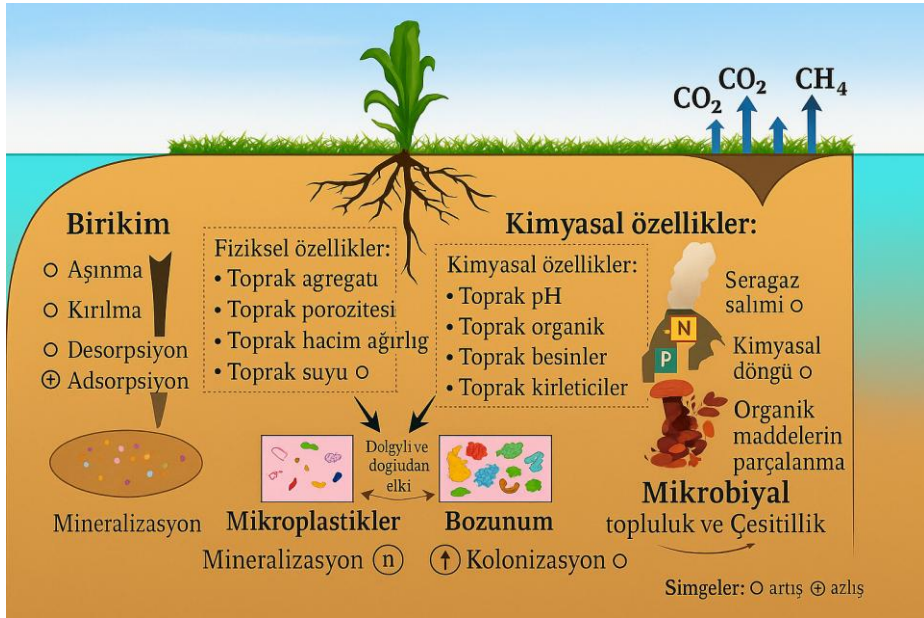
Mikroplastik şekli, toprak fiziksel özelliklerini etkileyen temel bir özelliktir (Lozano ve ark., 2021b; Lehmann ve ark., 2021; Zhao ve ark., 2021). Mikroplastik'ler, örnekleme alanlarına ve kaynaklarına bağlı olarak toprakta lif, fragman, membran/film, küre, köpük ve sütun (silindirik parçacık) dâhil olmak üzere çok çeşitli şekillerde bulunur (Tablo S1). İlk olarak, şekil tiplerinin plastiklerin kökenine ve kaynağına göre değiştiği gösterilmiştir (Kim ve ark., 2021a, 2021b; Wang ve ark., 2021c). Toprak uzun süre malç filmiyle örtüldüğünde, mikroplastik'lerin başlıca şekli fragmanlar (Ramos ve ark., 2015; Huang ve ark., 2021a) veya levhalar/şeritlerdir (Kim ve ark., 2021b). Buna karşılık, kanalizasyon çamuru ile iyileştirilen topraklarda mikroplastik'lerin şekli çoğunlukla liflerdir (Corradini ve ark., 2019). İkinci olarak, farklı ayrışma/meteorolojik koşulları gibi çevresel koşullar mikroplastik şeklini etkiler (Kim ve ark., 2021b). Daha güçlü bir ayrışma/yaşlanma şiddetine maruz kalan mikroplastik'ler daha kolay parçalanıp yaşlanabilir ve bu da belirli bir şeklin oluşumuna katkıda bulunur. Dikkat çekici olarak, mikroplastik şekli toprak özelliklerini ve süreçlerini etkiler (Lehmann ve ark., 2021; Lozano ve ark., 2021b; Zhao ve ark., 2021). Rillig ve ark. (2019), "şekil farklılığı hipotezi"ni ortaya koymuş ve toprak parçacıklarının şekline daha çok benzemeyen kirleticilerin daha güçlü etkilere sahip olabileceğini ileri sürmüştür. Varsayımsal olarak, lif ve film hâlindeki mikroplastik'ler, şekilleri toprak parçacıklarına daha çok benzeyen mikroplastik boncukları ve kürelerine kıyasla toprak üzerinde daha derin etkiler oluşturabilir. Lehmann ve ark. (2021), deneysel ve meta-analitik bir yaklaşımla, mikroplastik'lerin toprak agregatlaşması ve organik madde kaybı üzerinde şekle ve polimere bağlı etkileri olduğunu doğrulamıştır. Lozano ve ark. (2021b), farklı şekillerdeki mikroplastik'lerin toprak özelliklerine etkilerini karşılaştırmış ve liflerin su tutma kapasitesini artırdığını, filmlerin toprak hacim ağırlığını azalttığını, köpük ve fragmanların ise toprak havalanması ile makroporoziteyi artırdığını bulmuştur. Bununla birlikte, mikroplastik şekilleri zamanla da değişir. Toprak ortamında mikrofiberlerin mekanik parçalanması ve biyolojik ayrışması, liflerin boyut ve uzunluğunu kısaltacak, uzun bir sürenin ardından nanoskalada mikroplastik'lerin oluşumuna dahi yol açabilecektir. Buna bağlı olarak, toprakta

mikroplastik'lerin etkilerinin de şekille birlikte değişmesi beklenir. Bu nedenle, mikroplastik şekillerindeki dinamik değişimleri anlamak için karşılaştırmalı çalışmalara ihtiyaç vardır.

Mikroplastiklerin kimyasal bileşimi, bozunabilirlikleri, yoğunlukları ve olası toksisiteleri büyük ölçüde belirleyici özelliklerdir. Mikroplastikler genellikle yüksek molekül ağırlıklı bir polimerin yanı sıra plastikleştirici, stabilizatör ve renklendirici gibi katkı maddeleri içerir. Toprakta saptanan polimerler arasında polietilen, polipropilen, poliamid, polivinil klorür, polistiren, polietilen tereftalat, stiren-bütadien kauçuğu, poliüretan ve genleştirilmiş polistiren gibi yaygın malzemeler yer alır. Bu farklı bileşimler, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini çeşitli biçimlerde etkileyebilir. Etkide rol oynayan etmenlerden biri de yoğunluktur. Çoğu mikroplastik, mineral toprak taneciklerinden daha düşük yoğunluktadır. Bu nedenle toprağa karışıtlarında toprak hacim ağırlığını düşürebilirler (de Souza Machado ve ark., 2018b, 2019). Öte yandan mikroplastikler, bozunma sırasında bünyelerindeki toksik katkıları ya da yüzeylerine tutunmuş kirleticileri serbest bırakabilir. Bu durum toprağın kimyasal ve biyolojik özelliklerini doğrudan etkiler ve özellikle toprak canlılarını tehdit edebilir (Meng ve ark., 2021). Ayrıca farklı mikroplastik türleri toprakta farklı hız ve sürelerde bozunur (Zhang ve ark., 2020b; Qin ve ark., 2021). Bu nedenle mikroplastiklerin topraktaki seyrini ve etkilerini izlemek için dinamik ve uzun dönemli çalışmalara gereksinim vardır.

2. MİKROPLASTİKLERİN TOPRAK FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Toprak yapısı, gözeneklilik (porozite), toprak nemi, toprak havası ve havalanma gibi fiziksel özellikler yalnızca topraktaki mikroorganizmaları, karasal bitkileri ve toprakta yaşayan hayvanları etkilemekle kalmaz; aynı zamanda toprağın kimyasal özellikleriyle de yakından bağlantılıdır. Önceki çalışmalar, mikroplastiklerin bu fiziksel özellikleri birden çok yolla etkileyebildiğini göstermektedir (Şekil 2). Ancak etkinin yönü ve şiddeti bağlama bağlıdır; olumsuz, etkisiz ya da olumlu sonuçlar görülebilir.



Şekil 2. Mikroplastiklerin toprakların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerindeki etkileri.

3. TOPRAK YAPISI

Toprak yapısı; hidrolik özellikler, kimyasal özellikler (toprak verimliliği, iyon taşınımı ve değişimi), ısı davranış, havalanma ve mekanik dayanımla yakından ilişkilidir (Horn ve ark., 1994). Öncelikle, yapının tipi ve sağlamlığı gözenekliliği belirler. Söz konusu bu durum, toprağın suyu iletme ve depolama kapasitesini, havalanmasını ve bitkiler için suyun kullanılabilirliğini etkiler. İkinci olarak, yapı toprağın sıklık derecesini belirler. Bu durum köklerin büyüme ve gelişmesini doğrudan etkiler. Son olarak, toprak yapısı; organik maddenin ayrışması ile besin maddeleri, tuzlar ve kirleticilerin hareketi gibi, toprakta madde ve enerji dönüşümünü ve taşınımını yöneten temel bir etkidir.

Toprak agregatları, yapıyı ve gözeneklerin boyutu ile dayanıklılığını belirleyen temel unsurdur; bu yüzden toprak havası, suyun akışı, erozyon ve mikrobiyal etkinlik üzerinde güçlü etkiler yaratır. Agregatların içindeki ve arasındaki gözenek boşlukları hem hava hem de suyun değişimini ve tutulmasını sağlar; dolayısıyla havalanmayı, suyun tutulmasını ve bitkiler için suyun kullanılabilirliğini doğrudan etkiler. Nitekim, toprak agregat

bileşenlerindeki plastik parçacıkların bolluğu ve dağılımını inceleyen bir çalışma, parçacıkların %72'sinin agregatlarla ilişkili, %28'inin ise dağınık durumda bulunduğunu göstermiştir (Zhang ve Liu, 2018). Bu bulgu, toprağa karışan mikroplastiklerin agregat oluşumuna katılabildiğine işaret eder.

Birçok çalışma, mikroplastiklerin toprak agregasyonunu olumsuz etkilediğini göstermektedir (Rillig ve Lehmann, 2020; Lehmann ve ark., 2021). Polyester mikroliflerle işlem gören topraklarda suya dayanıklı agregaların oranı, lif derişimi arttıkça azalmış; bu durum polyester mikroliflerin agrega oluşumunu olumsuz etkilediğini göstermiştir (de Souza Machado ve ark., 2018b). Dört Mikroplastik biçiminin lif, film, köpük ve parça karşılaştırıldığı bir çalışmada Lozano ve ark. (2021b), tüm biçimlerin agregasyonu azalttığını (muhtemelen agregalar içinde kırılma düzlemleri oluşturması ve toprak canlılarını olumsuz etkilemesi nedeniyle) ve özellikle filmlerde derişim arttıkça azalmanın daha belirgin olduğunu bildirmiştir. Benzer biçimde, polistiren parçalar, poliamid boncuklar ve polyester mikrolifler agregasyonu anlamlı düzeyde azaltmıştır (de Souza Machado ve ark., 2019). Plastik türleri arasında en güçlü etkinin liflerde görülmesi, lifsi mikroplastiklerin yapı, boyut ve esneklik açısından mineral toprak taneciklerinden en fazla farklılığı göstermesine bağlanabilir.

Bununla birlikte, bazı çalışmalar mikroplastiklerin toprak agregaları üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmayan ya da olumlu etkiler de gösterebildiğini bildirmektedir. Mikrolifler tek başına agregaların oluşumu ve dayanıklılığı üzerinde etkili olmamış, ancak organik madde ve mikroorganizmalar bulunduğu agregaların dayanıklılığını azaltmıştır (Lehmann ve ark., 2019; Liang ve ark., 2019, 2021). Organik madde ve mikrobiyal etkinlik agregasyon sürecini hızlandırdığından, yeni oluşan agregalara daha fazla mikrolif dâhil olabilir. Ayrıca polyester mikroliflerin, muhtemelen toprak hacim ağırlığı, havalanma ve su tutma üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle, bitki topluluğu düzeyinde agregasyonu iyileştirdiği gösterilmiştir; bu durum liflerin kök biçimine benzemesi ve toprak parçacıklarını birbirine dolayarak agregasyonu teşvik etmesiyle açıklanabilir (Lozano ve ark., 2021a). Öte yandan, saksı ve tarla denemeleri farklı sonuçlar verebilir: %0,3 ve %0,1 oranlarında polyester mikrolif uygulaması saksı denemelerinde >2 mm suya dayanıklı iri agregaların içeriğini anlamlı biçimde artırmış, ancak tarla koşullarında aynı artış gözlenmemiştir (Zhang ve ark.,

2019a). Bu fark, saksı çalışmasında daha ince bünyeli toprak, tarla çalışmasında ise kesekli bir toprak kullanılmış olmasına bağlanabilir. Sonuç olarak mikroplastiklerin toprak yapısı üzerindeki etkisi; plastik türüne, agregaların parçacık boyutuna ve bitki varlığının olup olmamasına bağlıdır (de Souza Machado ve ark., 2019).

1. Özetle, mikroplastiklerin toprak agregatlarının oluşumu ve stabilitesi üzerindeki etkileri ile altta yatan mekanizmalar henüz bütünüyle aydınlatılmış olmamakla birlikte; agregaların oluşumu ve stabilitesini doğrudan fiziksel süreçler üzerinden etkileyebilir çıkarımları yapılabilir.
2. Mikroplastiklerin morfolojisi, toprak agregasyonu üzerindeki etkilerin yönünü ve büyüklüğünü belirleyen ana etmendir.
3. Mikroplastiklerin toprak fiziksel yapısına etkileri, kısmen topraktaki canlı topluluklarının ve organik maddenin etkinlikleri ve etkileşimleri ile şekillenmektedir.

4. TOPRAK GÖZENKLİLİĞİ

Toprak gözenekleri, belirli toprak faunası ile bitki kök bölgesi mikroorganizmaları için yaşam alanı sağlar. Örneğin mikroartropod topluluklarının yapısı, gözenek boyutu dağılımıyla yakından ilişkilidir (Vreeken-Buijs ve ark., 1998); ayrıca toprak agregatları içindeki gözenek boşlukları, bakterileri protozoaların avcı baskısından koruyabilir (Lynch ve de Leij, 2002). Önceki çalışmalar, gözeneklerdeki Brown hareketine dayalı difüzyonun hidrofobiklik ve yüzey yüküne bağlı etkileşimlerle ilişkili olduğunu göstermiştir (Wang ve ark., 2010; Petersen ve ark., 2011); bu da mikroplastiklerin gözeneklere kolayca girebilmesini açıklar. Bir yıllık tarla denemesinde, kil bünyeli bir toprakta polyester mikroliflerinin (%0,1 ve %0,3, ağırlık/ağırlık; çap $<5 \mu\text{m}$, ortalama uzunluk 2,65 mm) $>30 \mu\text{m}$ gözeneklerin hacmini artırdığı, $<30 \mu\text{m}$ gözeneklerin hacmini ise azalttığı gösterilmiştir (Zhang ve ark., 2019a).

Bu farklı etkiler üç nedenle açıklanabilir: (1) Polyester mikroliflerin çapı $5 \mu\text{m}$ 'den küçüktür; bu nedenle $30 \mu\text{m}$ 'den küçük toprak mikrogözeneklerini kolayca tıkayabilir. (2) Liflerin hidrofobik yapısı, toprakta güçlü su iticiliği oluşturarak küçük gözeneklerde depolanan suyu azaltabilir; bunun sonucunda toprak büzülmesi görülebilir. (3) Polyester liflerin doğrusal

yapısı, toprak taneciklerini birbirine bağlayıp iri agregaların oluşumunu teşvik eder; bu da 30 μm 'den büyük gözeneklerin artmasına yol açar. Toprak gözeneklerinin plastik parçacıklarla dolması, bazı toprak canlılarının dağılımını ve hareketini kaçınılmaz olarak etkiler. Nitekim polistiren mikroplastikler, düşük derişimlerde (8 mg/kg) bile saniyeler içinde biyogözeneklere girebilmekte ve springtail (*Lobelia sokamensis*) bireylerinin hareketini baskılayabilmektedir (Kim ve An, 2019).

Daha da önemlisi, toprak gözenekliliği havalanma ve su akışını büyük ölçüde belirler; bu da anaerob ve aerob mikroorganizmaların görelî bolluğunu, ayrıca köklerin su ve besin alımını dolaylı olarak değiştirir. Polyester mikrolifleri, gözenekliliği, havalanmayı ve köklerin toprağa ilerleyişini iyileştirerek bitki büyümesini teşvik edebilir (Lozano ve Rillig, 2020). Özellikle köpük ve parça biçimindeki Mikroplastikler, toprak havalanmasını ve mikrogözenekliliği artırabilir (Lozano ve ark., 2021b). Mikroliflerin tetiklediği gözeneklilik değişimleri, toprak solunumu, mikrobiyal etkinlik ve ölü örtü (litter) ayrışması gibi ekosistem işlevlerini de etkileyebilir (Lozano ve ark., 2021a). Ayrıca poliamid mikroplastikler, kumlu toprakta gözenek hacmini ve oksitetrasiklinin yayılma katsayısını artırarak kirleticilerin hareketliliğini kolaylaştırabilir. Bu olay, kirletici göçü üzerindeki Mikroplastik etkileri için bir mekanizma önerir (Li ve ark., 2021d). Öte yandan pelet, boncuk, küre ve parçacık gibi diğer şekiller, gözenek boşluklarını doldurarak toplam gözenek hacmini azaltabilir. Bunun yanında, kum, silt ve kil fraksiyonlarının oranı da gözenekliliği belirleyen temel bir unsurdur. Bu nedenle, farklı Mikroplastik türleri ve toprak tekstürlerini birlikte ele alan karşılaştırmalı çalışmalara ivedilikle ihtiyaç vardır.

5. TOPRAK HACİM AĞIRLIĞI

Toprak hacim ağırlığı genellikle toprak kalitesi, gözeneklilik ve bitki köklenmesiyle ilişkilidir ve önemli bir verimlilik göstergesidir (Dexter, 2004). Mikroplastik'lerin bileşimi dikkate alındığında, mikroplastik'lerin yoğunluğu genellikle toprak parçacıklarının yoğunluğundan (yaygın bileşen alüminosilikat minerallerdir) daha düşüktür (Mbachu ve ark., 2021). Sonuç olarak, toprakta mikroplastik birikimi, kaçınılmaz olarak toprak hacim ağırlığını azaltacaktır (Çizelge 1). Önceki çalışmalar, mikroplastiklerin toprak hacim ağırlığı üzerindeki etkilerinin mikroplastik türüne, şekline ve

derişimine bağı olabileceğini göstermiştir (de Souza Machado ve ark., 2018b, 2019; Zhang ve ark., 2019a). de Souza Machado ve ark. (2018b), polyester mikroliflerinin, poliakrilik liflerin, Polietilen parçacıklarının ve PA boncuklarının ilavesinin hepsinin toprak hacim ağırlığını azalttığını; en belirgin ve doza bağı etkinin ise Poliester mikroliflerinden kaynaklandığını bildirmiştir. Başka bir çalışmada, Polietilen ve Poliester mikrolifleri hacim ağırlığını azaltırken, naylon boncukları herhangi bir değışime yol açmamıştır (de Souza Machado ve ark., 2019). Bu bulgu, küresel mikroplastiklerin şekil bakımından doğal toprak parçacıklarına benzemesine karşın, doğrusal (lifs) mikroplastiklerin toprak fiziksel özelliklerini etkileme olasılığının daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Dikkate değer biçimde, azalan toprak hacim ağırlığı genellikle makrogözeneklilik ve havalanmanın artmasına neden olur; bu da kök penetrasyonunu kolaylaştırabilir, aerob mikroorganizmaların bolluğunu artırabilir ve topraktaki nitrifikasyon ile organik maddenin mineralizasyonu gibi aerobik süreçleri hızlandırabilir. Ancak Zhang ve ark. (2019a) tarafından yürütölen araştırmada, Poliester mikroliflerinin saksı ya da tarla denemelerinde toprak hacim ağırlığı üzerinde bir etkisi gözlenmemiştir. Bu çelişkili sonuçlar, farklı şekillerdeki mikroplastiklerin toprak hacim ağırlığı ve ilişkili özellikleri nasıl etkilediğine dair daha fazla araştırma gereksinimine işaret etmektedir.

6. TOPRAK SUYU

Toprak suyu; besin maddeleri ve kirleticilerin kullanılabilirliğini, ayrıca toprakta yaşayan organizmalar ile bitkilerin yaşamını ve çoğalmasını belirler. Kuramsal olarak mikroplastikler, hidrofobik yüzeyleri aracılığıyla su tutma kapasitesini ve suyun kullanılabilirliğini doğrudan; toprak fiziksel yapısı, agregasyon ve gözeneklilik üzerindeki etkileri yoluyla ise dolaylı olarak değıştirebilir (bkz. 3.1 ve 3.2). Dört yaygın mikroplastik türüne (Poliakrilik amid lifleri, naylon boncukları, Poliester mikrolifleri ve Polietilen parçacıkları) maruz bırakılan toprağın kullanıldığı 5 haftalık bir bahçe denemesinde, polyester mikrolifleri su tutma kapasitesini artırmış; Poliakrilik amid lifleri, naylon boncukları ve Polietilen parçacıkları ise belirgin bir etki göstermemiştir (de Souza Machado ve ark., 2018b). İki ayrı çalışma da Poliester mikroliflerinin su tutmayı ve köklerin su alımını iyileştirerek bitki büyümesini ve kuraklığa toleransı artırdığını bildirmiştir (de Souza Machado

ve ark., 2019; Lozano ve Rillig, 2020). Bu etkilerin, en yüksek dozda uygulanan Poliester mikroliflerinde en belirgin olduğu; liflerin doğrusal geometri ve esnekliğinin, düzensiz şekilli toprak taneciklerinden farklı davranarak topaklaşmayı ve parçacıkların birbirine dolanmasını kolaylaştırdığı değerlendirilmiştir. Poliester mikroliflerinin Poliakrilik amid liflerine göre daha esnek olması da bu etkiye katkı verir.

Su tutma kapasitesindeki değişim, toprak nemini ve evapotranspirasyonu doğrudan etkiler. Nitekim, mikroplastiklerin toprak içinde bir su akış kanalı oluşturarak buharlaşma hızını artırabildiği; etkinin daha küçük parçacık boyutlarında ve daha yüksek plastik içeriğinde güçlendiği gösterilmiştir (Wan ve ark., 2019). Benzer bir çalışmada naylon boncukları ve Poliester mikrolifleri evapotranspirasyonu sırasıyla %35 ve %50 oranında anlamlı biçimde artırırken, Polietilen, Polipropilen ve Polistiren parçacıklarının etkileri sınırlı kalmıştır (de Souza Machado ve ark., 2019). Bununla birlikte, PA ve Poliesterin buharlaşmayı artırıcı etkisi, Poliesterin su tutma kapasitesinde yol açtığı artışın gerisinde kaldığından, Mikroplastikle muamele edilen topraklarda su kullanılabilirliği net olarak yükselmiştir.

Mikroplastikler, suyun toprak içindeki taşınımını da değiştirebilir. Daha büyük plastik filmler (5 mm ve 10 mm) toprakta çatlak oluşumunu hızlandırarak derin katmanlardaki nemin buharlaşmasına ve kuraklığın şiddetlenmesine yol açabilir (Wan ve ark., 2019). Bu tür çatlaklar, mikroplastiklerin yeraltı suyuna doğru göçünü kolaylaştırabilir ve kirleticilerin düşey taşınımını etkileyebilir. Siltli tın ve tınlı kum topraklarda ise polietilen içeriğinin %1'den %7'ye (a/a) artmasıyla su sızması (infiltrasyon) yükselmiştir (Xing ve ark., 2021). Bu durum; zayıflayan agregasyon, artan gözeneklilik ve Polietilenin güçlü hidrofobikliği sonucunda hidrolik iletkenliğin artmasına atfedilmiştir. Doğrudan kanıt bulunmamakla birlikte, büyük film ve parçaların yatay su akışını bloke edebileceği; küçük parçacıkların ise gözenekleri tıkayarak su hareketini değiştirebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak mikroplastikler, toprakta suyun tutulmasını, kullanılabilirliğini ve hareketini anlamlı ölçüde değiştirebilir; ancak etkinin yönü ve büyüklüğü, plastik türüne, şekline, boyutuna ve derişimine bağlı olarak değişir. Poliester mikrolifleri su tutma ve suyun kullanılabilirliğini artırarak bitki büyümesini teşvik edebilir ve kuraklık stresini hafifletebilir (de

Souza Machado ve ark., 2019; Lozano ve ark., 2021a); böylece ürün verimliliğine katkı sağlayabilir. Buna karşılık, evapotranspirasyon ve infiltrasyonun artması, kuraklığı ağırlaştırabilir. Toprak suyu, özellikle tarımsal üretim başta olmak üzere ekosistem hizmetlerinin temel belirleyicisidir; bu nedenle suyun kritik olduğu kurak bölgelerde mikroplastiklerin topraklar üzerindeki etkileri özel önem taşır.

7. TOPRAK KİRLETİCİLERİ

Mikroplastikler, topraktaki organik kirleticilerin dönüşümünü, taşınımını, biyolojik kullanılabilirliğini, biyobirikimini ve toksisitesini doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyebilir. Birincisi, mikroplastikler; plastikleştiriciler, antioksidanlar, alev geciktiriciler, toksik metaller ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar gibi kirleticileri içerebilir ve yaşlanma ile bozunma sırasında bu bileşenleri toprağa salabilir (Massos ve Turner, 2017; Ding ve ark., 2020). İkincisi, küçük boyutları ve yüzey özellikleri nedeniyle mikroplastikler hem organik hem de inorganik maddelere karşı yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahiptir; böylece çevresel kirleticiler için bir taşıyıcı gibi davranırlar (Mammo ve ark., 2020; Wang ve ark., 2020a; Xiang ve ark., 2022). Bu iki etki birlikte, kirleticilerin toprak içinde hareketini ve canlılara ulaşma düzeyini değiştirerek risk profilini yeniden şekillendirebilir.

8. TARTIŞMA ve GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Veriler, incelenen tüm topraklarda mikroplastiklerin yaygın olarak bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu mikroplastikler; miktar, şekil, bileşim, boyut ve kaynak açısından büyük çeşitlilik göstermektedir. Güncel literatürden elde edilen sonuçlar, mikroplastiklerin çoğu durumda toprağın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini değiştirebildiğini göstermektedir. Ancak bu etkiler; kullanılan polimerin türüne, şekline, dozuna ve boyutuna bağlı olarak anlamlı ya da önemsiz düzeyde olabilir.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise mikroplastiklerin toprak verimliliğini azaltabilmesi ve toprakta bulunan kirleticilerin kullanılabilirliğini artırabilmesidir. bu durum, bitki gelişimi ile birlikte tarımsal verimlilik ve gıda güvenliği açısından potansiyel bir tehdit oluşturabilir. özellikle mikroplastikler, sera gazı salınımını etkileyerek küresel iklim değişikliği üzerinde belirsiz sonuçlar doğurabilecek etkiler yaratabilir.

Toprak, karmaşık bir sistem olarak; mineraller, organik madde ve toprak biyotası gibi birçok bileşen içerir. Bu bileşenler, mikroplastiklerle etkileşime girerek belirsiz sonuçlar doğurabilir. Kuraklık, sıcaklık, karbondioksit seviyesi, tarımsal gübreleme, organik artıklar, toprakta yaşayan hayvanlar ve bitkiler gibi çevresel koşullar, Mikroplastiklerin çevresel etkilerini önemli ölçüde değiştirebilir.

Toprak sistemlerinde mikroplastiklerin çevresel akıbeti ve etkileri üzerine elde edilen sonuçlar oldukça tartışmalıdır. Mevcut bilgi eksiklikleri göz önüne alındığında, bu konuda daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Aşağıda önerilen bazı öncelikli araştırma alanları yer almaktadır. Ancak toprak, mineraller, organik madde ve toprak biyotası gibi birçok bileşene sahip karmaşık bir sistemdir ve bu bileşenler mikroplastiklerle etkileşime girerek belirsiz sonuçlar ortaya çıkarabilir. Kuraklık, sıcaklık, karbondioksit seviyesi, tarımsal gübreleme, organik artıklar, toprakta yaşayan hayvanlar ve bitkiler gibi çevresel koşullar, mikroplastiklerin çevresel etkilerini önemli ölçüde etkileyebilir. Mikroplastiklerin toprak sistemlerindeki çevresel kaderi ve etkileri üzerine elde edilen sonuçlar oldukça tartışmalıdır. Mevcut bilgi eksiklikleri göz önüne alındığında, daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır ve aşağıda bazı öncelikli araştırma alanları önerilmektedir:

(1) Mikroplastiklerin toprak özelliklerini nasıl etkilediği ve bu etkilerin altında yatan mekanizmalar hâlâ net değildir. Doğal topraklar, çeşitli özelliklere sahip çok sayıda mikroplastik içermektedir. Ancak farklı topraklar ve mikroplastikler genellikle birbirinden farklı özellikler gösterir. Çevresel mikroplastikler ile toprak bileşenleri arasındaki etkileşimler oldukça karmaşıktır. Mikroplastiklerin toprak bileşenlerine olan bağlanma eğilimi, toprak üzerindeki etkilerini kısmen belirleyebilir. Bu nedenle, farklı mikroplastik ve toprak türleri kullanılarak etkileşimlerin detayları, baskın mekanizmalar ve etkileyen faktörler üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır.

(2) Çok ölçekli deneyler gereklidir. Toprakta gözlemlenen çevresel mikroplastikler genellikle düşük bozunabilirliğe sahiptir, ancak zamanla kırılganlaşır, parçalanır ve yaşlanır. Biyobozunur mikroplastikler ise mikroorganizmalar tarafından hızla parçalanabilir ve bu durum toprak üzerinde daha doğrudan etkiler yaratabilir. Mevcut çalışmalar çoğunlukla düzenli şekilli, yeni mikroplastikler kullanılarak kısa süreli laboratuvar

mikrokozmoslarında yapılmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, yaşlanmış ve farklı şekillerdeki mikroplastiklere ve biyobozunur mikroplastiklerin ara ürünlerine odaklanmalıdır. Gerçek toprak ortamlarında mikroplastiklerin etkilerini tam olarak anlayabilmek için, uzun süreli gözlemlerle yapılan deneyler, doğaya yakın kontrollü sistemler (mesokozmlar) ve açık alanda yapılan saha çalışmaları gereklidir.

(3) Mikroplastiklerin toprak mikrobiyomu ve işlevleri üzerindeki etkilerine daha fazla odaklanılmalıdır. Önceki çalışmalar genellikle bakteriyel topluluklara ve aktivitelere odaklanmıştır; ancak belirli mikrobiyal türler ve işlevleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle bitki beslenmesi ve direnciyle ilgili önemli mikroorganizmalar (örneğin azot bağlayan bakteriler, mantarlar, bitki gelişimini destekleyen rizobakteriler, karbon, azot, fosfor ve kükürt döngüleri (sera gazı salınımı ve bozunma süreçleri) ve toprak sağlığı gibi konulara daha fazla araştırma yapılmalıdır.

(4) Gelecekteki çalışmalar, mikroplastiklerin diğer kirleticilerle birlikte oluşturduğu ortak kirlenme etkilerini dikkate almalıdır. Mikroplastikler kirleticileri doğrudan adsorbe edebilir ve aynı zamanda toprak bileşenleri üzerindeki adsorpsiyonlarını değiştirerek biyoyararlanımlarını etkileyebilir. Mikroplastikler ve toprak kirleticileri birlikte bulunduğunda, Bu etkileşimler birbirini destekleyici ya da birbirini engelleyici ve toprak canlıları üzerinde daha karmaşık etkiler yaratabilir. Bu durum, çevresel risklerin daha ayrıntılı şekilde incelenmesini gerektirir.

(5) Toprak ekosistemlerinin önemli bileşenleri olan bitkiler ve toprak faunası, toprak fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerinde derin etkiler yaratır. Mikroplastikler bitkilerle ve toprak faunasıyla karmaşık etkileşimler kurarak, bitki gelişimi ve hayvan sağlığı yoluyla dolaylı olarak toprak özelliklerini değiştirebilir. Bu durum, özellikle tarımsal ekosistemlerde mikroplastiklerin etkileri incelenirken büyük önem taşır.

KAYNAKÇA

- Aküzüm, T., Çakmak, B., & Gökalp, Z. (2003). Dünyada su ve yaklaşan su krizi. 2. *Ulusal Sulama Kongresi Bildirileri* (ss. 145–154). Kuşadası, Aydın.
- Anonim. (2006). *Sulama, drenaj ve tuzluluk*. Erişim tarihi: 20 Eylül 2006, <http://www.zmo.org.tr/etkinlikler/6tk05/013rizakanber.pdf>
- Anonymous. (2003). *Turkey country report*. Prepared for the 3rd World Water Forum. World Water Council; Ministry of Foreign Affairs, Department of Regional and Transboundary Waters; General Directorate of State Hydraulic Works; Southeastern Anatolia Project Regional Development Administration.
- Anonymous. (2021). *İklim değişikliği ve tarım değerlendirme raporu*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, Tarımsal Çevre ve Doğal Kaynakları Koruma Daire Başkanlığı.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R. P., & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st-century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1), 2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Diyabalanage, S., Samarakoon, K. K., & Adikari, T. (2017). Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka. *Applied Geography*, 79, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.004>
- Dökmen, F. (2023). Tarımsal sulamada tansiyometre kullanımının önemi. *Journal of Kocaeli Health and Technology University*, 1(3), 34–41.
- Koçak, M., & Zayıf, Y. A. (2005). Yüzey ve basınçlı sulama sistemlerinin karşılaştırılması ve işletme hizmetleri yönünden değerlendirilmesi. II. *Ulusal Sulama Sistemleri Sempozyumu Bildirileri* (ss. 193–207). DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Sönmez, B. (2004). Türkiye’de çorak ıslahı araştırmaları ve tuzlu toprakların yönetimi. *Sulanan Alanlarda Tuzluluk Yönetimi Sempozyumu Bildiriler Kitabı* (ss. 157–162). Ankara.
- T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2018). *Toprak nemi izleme projesi*.

- Tepeli, E., Bülbül, R., Karşı, Z., Sarıtaş, H., Gökalp, Y., Çınar, M., Uyan, A., & Çelik, A. (2005). *Sulama* (Ed. E. Tepeli & H. Sarıtaş). T.C. Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Teşkilatlanma ve Destekleme Genel Müdürlüğü Yayınları – YAYÇEP, Yayın No: 42, Ankara.
- Zhang, X., Song, J., Wang, Y., Sun, H., & Li, Q. (2022). Threshold effects of vegetation coverage on runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis. *Geoderma*, 412, 115720.
- van der Molen, W.H., J. Martínez Beltran, W.J. Ochs. Guidelines and coMikroplastikuter programs for the planning and design of land drainage systems. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 62, Rome, Italy, 228 pp. + CD-ROM.
- Zwartendijk, B. W., van Meerveld, H. J., Ghimire, C. P., Bruijnzeel, L. A., Ravelona, M., & Jones, J. P. G. (2017). Rebuilding soil hydrological functioning after swidden agriculture in eastern Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 101–111.

BÖLÜM 7

TOPRAKTA MİKROPLASTİKLERİ TANIMLAMA KRİTERLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048518>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Tokat, Türkiye. saniye.140100@gmail.com, Orcid ID: 0000-0003-3908-7070

GİRİŞ

Plastik üretim ve kullanımındaki küresel artış, mikroplastiklerin (MP'ler; <5 mm) yalnızca denizel ve tatlı su ekosistemlerinde değil, aynı zamanda karasal ekosistemlerin temel bileşeni olan topraklarda da yaygın ve kalıcı kirleticiler olarak ortaya çıkmasına neden olmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar, tarımsal faaliyetler, atıksu arıtma çamurlarının araziye uygulanması, plastik malçlar, sulama suyu ve atmosferik taşınım gibi çoklu girdiler yoluyla toprakların mikroplastik birikimi açısından önemli bir yutak haline geldiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu durum, toprak sağlığı, bitki beslenmesi, besin döngüleri ve nihayetinde gıda güvenliği açısından mikroplastiklerin kritik bir çevresel stres faktörü olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Toprak ortamı, heterojen yapısı, yüksek mineral ve organik madde çeşitliliği ile mikroplastiklerin tanımlanması ve karakterizasyonu açısından sucul ortamlara kıyasla çok daha karmaşık bir matrise sahiptir. Bu nedenle, toprakta mikroplastiklerin doğru biçimde tanımlanması; boyut, şekil, polimer tipi, yüzey özellikleri ve yaşlanma (aging) derecesi gibi çok boyutlu kriterlerin bütüncül bir çerçevede ele alınmasını gerektirir. Güncel literatür, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel parçacıklar olarak değil, aynı zamanda ağır metaller, pestisitler ve diğer organik kirleticiler için potansiyel taşıyıcılar ve reaktif yüzeyler olarak işlev gördüğünü vurgulamaktadır. Bu çoklu etkileşimler, mikroplastiklerin toprak kimyası ve biyolojisi üzerindeki etkilerinin doğru değerlendirilmesini, ancak standartlaştırılmış tanımlama ve sınıflandırma kriterleri ile mümkün kılmaktadır.

Son dönemde yayımlanan çalışmalar, mikroplastik araştırmalarında metodolojik uyumsuzlukların (örneğin farklı boyut eşikleri, şekil sınıfları veya polimer tanımlama yaklaşımları) sonuçların karşılaştırılabilirliğini ciddi biçimde sınırladığını göstermektedir. Özellikle toprak çalışmalarında kullanılan ön arıtma prosedürleri, yoğunluk ayırma çözeltileri ve spektroskopik tanımlama teknikleri arasındaki farklılıklar, mikroplastik bolluğu ve özelliklerine ilişkin raporlanan verilerde yüksek belirsizliklere yol açmaktadır. Bu bağlamda, mikroplastiklerin toprakta tanımlanmasına yönelik açık, tekrarlanabilir ve bilimsel olarak kabul görmüş kriterlerin ortaya konması, alanın olgunlaşması açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Bu kitap bölümünün amacı, toprakta mikroplastiklerin

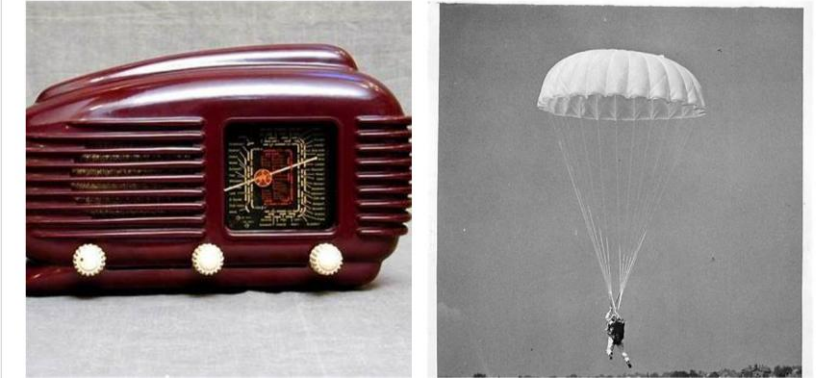
tanımlanmasına yönelik güncel kavramsal ve metodolojik yaklaşımları sistematik bir biçimde ele almak; boyut, morfoloji, polimer kompozisyonu ve yüzey özellikleri temelinde kullanılan tanımlama kriterlerini bütüncül bir çerçevede sunmaktır. Böylece, hem deneysel çalışmalar hem de çevresel risk değerlendirmeleri için karşılaştırılabilir, güvenilir ve standartlara dayalı bir bilimsel altyapının güçlendirilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1. PLASTİKLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE ÇEVRESEL SORUNLARIN ORTAYA ÇIKIŞI

Plastik kirliliği günümüzde farklı ekosistemler için küresel bir tehdit olarak kabul edilmekte olup, buzullardan derin deniz çökeltilerine kadar neredeyse tüm çevresel ortamlarda plastiklere rastlanmaktadır (Barnes ve ark., 2009; Lusher ve ark., 2020). Plastik, aslında oldukça yeni bir malzeme grubunu temsil etmektedir. Yaklaşık bir asır önce geliştirilen sentetik polimerler, endüstriyel ve toplumsal yaşamda hızla yaygınlaşmıştır (Lusher ve ark., 2017b).

İlk tam sentetik plastik olan bakalit, 1900'lü yılların başında Leo Baekeland tarafından geliştirilmiş ve başlangıçta otomotiv ile radyo endüstrilerinde kullanılmıştır (Millet ve ark., 2018). Bunu takiben polivinil klorür (PVC) ve polivinil asetat gibi polimerlerin sentez edilmesi, plastik çeşitliliğinin hızla artmasına yol açmıştır (Chauhan ve ark., 2019). Ancak plastiğin kitlesel üretimi esas olarak II. Dünya Savaşı sırasında gerçekleşmiş; naylon gibi polimerler paraşüt, halat ve askeri teçhizat üretiminde kritik rol üstlenmiştir (Napper ve Thompson, 2020) (Şekil 1). Aynı dönemde polistiren, polyester ve polietilen gibi günümüzde de yaygın kullanılan plastikler keşfedilmiştir (Napper ve Thompson, 2020).

1939 yılında 213 milyon pound olan plastik üretimi, savaşın sonunda 818 milyon pounda ulaşmıştır (Freinkel, 2011). Savaş sonrasında düşük maliyetli yapıları ve geniş kullanım alanları sayesinde plastik ürünler hızla tüketici pazarına girmiş; ev eşyalarından tekstile kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmış ve kısa sürede “plastik çağı” olarak tanımlanan dönemi başlatmıştır (Dijkstra ve ark., 2020). Ancak bu hızlı üretim artışı, plastiklerin doğada uzun süre kalıcılığı nedeniyle ciddi çevresel sorunlara yol açmış ve günümüzde küresel ölçekte tartışılan plastik kirliliği problemini doğurmuştur.



Şekil 1. Bakelit radyo (1930'lar) ve II. Dünya Savaşı'nda naylon paraşüt (Vikipedi, 2025).

1.1. Plastik Polimerlerin Çeşitleri ve Küresel Üretim Trendleri

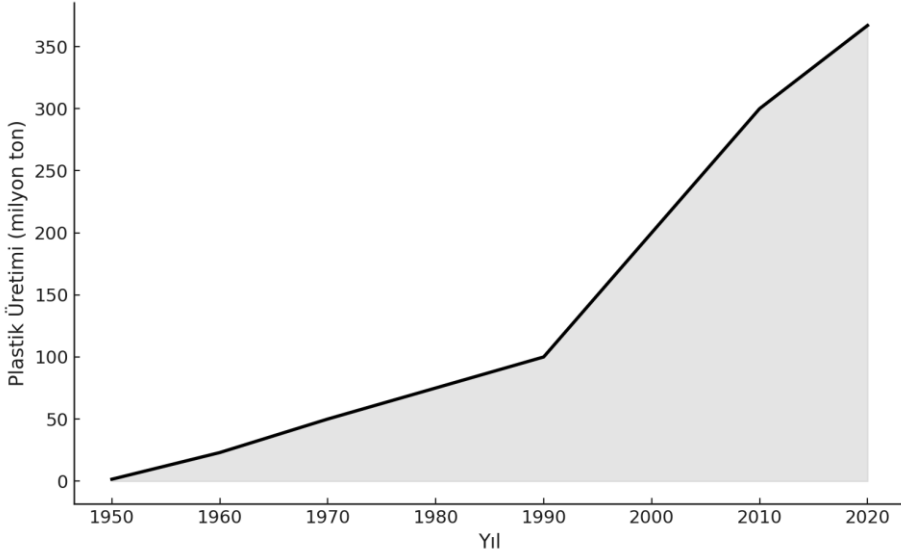
Günümüzde Avrupa Birliği (AB) tarafından kaydedilmiş yaklaşık 30.000 farklı plastik polimer malzemesi bulunmaktadır ve bunlar yedi ana grupta sınıflandırılmaktadır (Horton ve ark., 2017). Polimerler, fosil hidrokarbonlardan türetilmiş, tekrarlayan yapısal birimlerden oluşan uzun zincir yapılı moleküllerdir (Napper ve Thompson, 2020).

Plastik polimerler temelde termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmektedir:

- **Termosetler**, yeniden eritilemeyen ve şekillendirilemeyen yapılarıyla AB'de yetkilendirilmiş polimerlerin yaklaşık %16'sını oluşturmaktadır. Reçineler ve bakalit bu gruba örnek olarak gösterilebilir (Horton ve ark., 2017).
- **Termoplastikler** ise neredeyse sınırsız biçimde yeniden kalıplanabilme özellikleriyle öne çıkmakta ve kayıtlı polimerlerin %84'ünü kapsamaktadır. Bu grup; poliamidler, poliesterler, polipropilen ve polietilen gibi günlük yaşamda yaygın kullanılan polimerleri içermektedir (Nikiema & Asiedu, 2022).

Polimerlerin performansını artırmak amacıyla alev geciktiriciler, antimikrobiyal ajanlar gibi katkı maddeleri de sıklıkla kullanılmaktadır (Sridharan ve ark., 2022). Plastiklerin çok yönlü, dayanıklı ve uzun ömürlü yapıları, üretim miktarına da doğrudan yansımaktadır (Şekil 2). 1950'lerde yalnızca 1.5 milyon metrik ton olan küresel plastik üretimi, 2020 yılında 367

milyon metrik tona ulaşmıştır (Statista, 2021). Bu miktarın 2040 yılına kadar 700 milyon metrik tona çıkacağı öngörülmektedir (Lau ve ark., 2020).



Şekil 2. 1950–2020 yılları arasında dünya plastik üretimi (PlasticsEurope, 2022).

Plastikler günümüz dünyasının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş, ancak üretimdeki hızlı artış plastik atık oluşumunu da beraberinde getirmiştir (Lusher ve ark., 2017b). Dayanıklılık, uzun ömür ve bozunmaya direnç gibi plastiği cazip kılan özellikler, aynı zamanda atık yönetimini güçleştirmektedir (Rigamonti ve ark., 2014). Plastiklerin kimyasal olarak karmaşık yapısı, doğal çevrede bozunmalarını zorlaştırmakta ve bu nedenle 1950’lerden bu yana üretilen plastiklerin büyük bir kısmı hâlâ varlığını sürdürmektedir (Chamas ve ark., 2020). Plastik atık üretimindeki artış, küresel ölçekte bir çevre krizine yol açarak birçok ekosistemi olumsuz etkilemiş ve bu durum günümüzde “plastik kirliliği krizi” olarak tanımlanmıştır (Kumar ve ark., 2021; Horton, 2022).

2. PLASTİK KİRLİLİĞİ

2.1. Plastik Kirliliğinin Boyutu

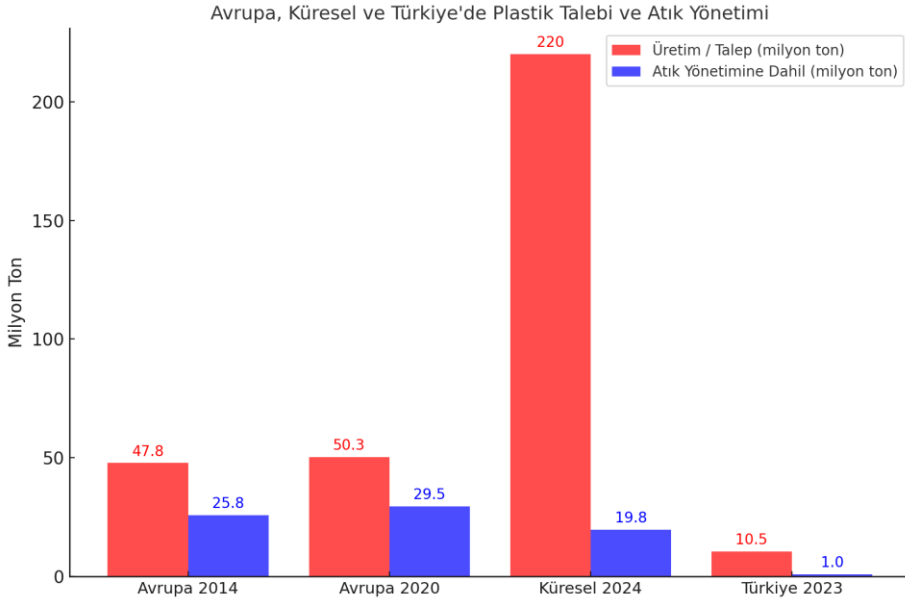
Günümüzde plastik kirliliği küresel ölçekte kritik boyutlara ulaşmıştır. 2024 yılı itibarıyla dünyada yaklaşık 220 milyon ton plastik atık üretilmiş, bunun üçte biri yani yaklaşık 69.5 milyon tonu uygun şekilde yönetilemeyerek doğaya karışmıştır (Safe Food Advocacy Europe, 2024). Bu

miktar, kişi başına yılda ortalama 28 kg plastik atığa karşılık gelmektedir. Bu veriler, plastik atık yönetim sistemlerinin küresel ölçekte yetersiz kaldığını ve plastik kirliliğinin hem karasal hem de sucul ekosistemler için büyüyen bir tehdit olmaya devam ettiğini göstermektedir.

2.2. Plastik Kullanımı ve Atık Yönetimi

2014 yılında Avrupa'daki plastik talebi yaklaşık 47.8 milyon ton iken bunun yalnızca 25.8 milyon tonu atık yönetim sistemine girmiştir (Plastics Europe, 2015). 2020 yılında plastik talebi 50.3 milyon tona yükselmiş, bu miktarın 29.5 milyon tonu atık yönetimine dâhil edilmiştir (Plastics Europe, 2022). Ancak 2024 yılına gelindiğinde plastik üretim ve tüketim miktarı küresel ölçekte 220 milyon tona ulaşmış, bu miktarın yalnızca %9'u geri dönüştürülebilmiş ve yaklaşık %22'si hatalı şekilde bertaraf edilmiştir (Safe Food Advocacy Europe, 2024; Waste Direct, 2024).

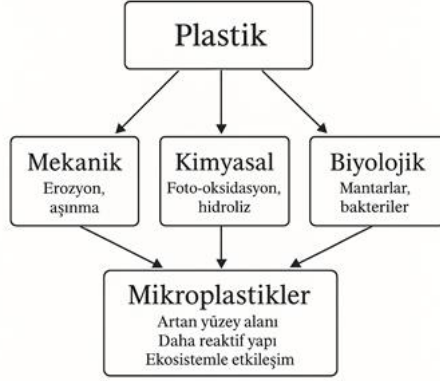
Türkiye ise plastik sektöründe önemli bir üretici konumundadır. PAGEV (2024) raporuna göre Türkiye, 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 10.5 milyon ton plastik ürün üretimiyle Avrupa'nın en büyük ikinci plastik üreticisi olmuştur. Aynı yıl, Türkiye'nin plastik sektör ihracatı 7.4 milyar dolar seviyesine ulaşmış ve sektör ülke Gayri Safi Yurtİçi Hasıla'sinin %2.3'ünü oluşturmuştur (PAGEV, 2024). Ancak, plastik üretimindeki bu yüksek kapasiteye karşın, geri dönüşüm oranı yaklaşık %13–15 seviyesinde kalmakta olup Avrupa ortalamasının altında seyretmektedir. Türkiye'de plastik geri dönüşüm sektörü hızla büyümekle birlikte, toplama ve ayırma altyapısındaki yetersizlikler nedeniyle mevcut kapasite tam anlamıyla kullanılamamaktadır. Ayrıca, geri dönüşümün önemli bir kısmı kayıt dışı yollarla veya enerji geri kazanımı amacıyla değerlendirilmektedir. Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat çerçevesinde getirdiği sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm standartları, Türkiye'nin ihracatına doğrudan etki edeceğinden, önümüzdeki yıllarda plastik geri dönüşüm kapasitesinin artırılması stratejik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Avrupa, Küresel ve Türkiye'de Plastik Talebi ve Atık Yönetimi

2.3. Plastiklerin Çevresel Bozunma Süreçleri

Plastiklerin çevresel bozunması; mekanik, kimyasal ve biyolojik süreçlerin bir arada ve uzun zaman ölçeklerinde gerçekleştiği karmaşık bir olgudur. Mekanik aşınma ve erozyon, plastiğin fiziksel bütünlüğünü bozarak parçacıkların küçülmesine yol açarken; oksidasyon ve hidroliz gibi kimyasal süreçler, polimer zincirlerinin kırılmasına ve yapısal değişimlere neden olmaktadır (Chamas ve ark., 2020). Biyolojik bozunma ise genellikle en yavaş süreç olup, mantar ve bakteriler tarafından gerçekleştirilen enzimatik parçalanmaya dayanmaktadır (Julienne ve ark., 2019). Ancak, bu süreçlerin etkinliği çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Örneğin, UV radyasyonu ve yüksek sıcaklıklar fotooksidatif bozunmayı hızlandırabilirken; düşük sıcaklık, oksijen eksikliği veya toprakta sınırlı mikrobiyal aktivite bozunmayı belirgin şekilde yavaşlatmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Plastiklerin çevresel bozunma yolları ve mikroplastiklere dönüşümü.

Plastiklerin çevresel kalıcılığının en kritik yönlerinden biri de bu süreçlerin zaman ölçeğidir. Laboratuvar koşullarında hızlandırılmış bozunma deneyleri kısa sürede parçalanma gösterebilirken, doğal ekosistemlerde aynı süreçler onlarca hatta yüzlerce yıl sürebilmektedir. Bu nedenle, plastiklerin çevrede birikmesi ve mikroplastiklere dönüşmesi kaçınılmazdır. Mikroplastik parçacıklar yalnızca fiziksel olarak daha küçük boyutlara indirgenmiş polimerler değildir. Aynı zamanda yüzey alanlarının artması ve kimyasal olarak daha reaktif hale gelmeleri nedeniyle, biyolojik ve kimyasal etkileşimlere daha açık hale gelirler (Botterell ve ark., 2019).

Literatürde genel olarak kabul gören görüş, plastiklerin tamamen mineralize olarak ekosistemlerden kaybolmasının çok uzun zaman aldığı, çoğunlukla ise bozunmanın yalnızca parçacık boyutunun küçülmesiyle sınırlı kaldığıdır. Dolayısıyla, plastiklerin bozunma süreçlerini yalnızca ‘mikroplastiklere dönüşüm’ olarak anlatmak fazla basitleştirici ve eksik bir yaklaşımdır. Bu durum, özellikle kara ekosistemlerinde, bozunma çoğunlukla sınırlı mekanik etkiler ve güneş ışığına bağlı oksitlenme ile ilerlediği için plastiklerin toprakta çok daha uzun süre kalıcı olmasına yol açar.

2.4. Toprakta Mikroplastik

Topraklar; karbon depolama, biyoçeşitliliğin desteklenmesi ve bitki besin elementlerinin döngüsü gibi kritik ekosistem hizmetlerini sağlayan temel bileşenlerdir (Guo ve ark., 2020). Bununla birlikte, madencilik, yetersiz atık yönetimi ve tarımsal faaliyetler gibi insan kaynaklı baskılar nedeniyle topraklar giderek artan kirliliğe maruz kalmaktadır (Jie ve ark., 2002). Bu

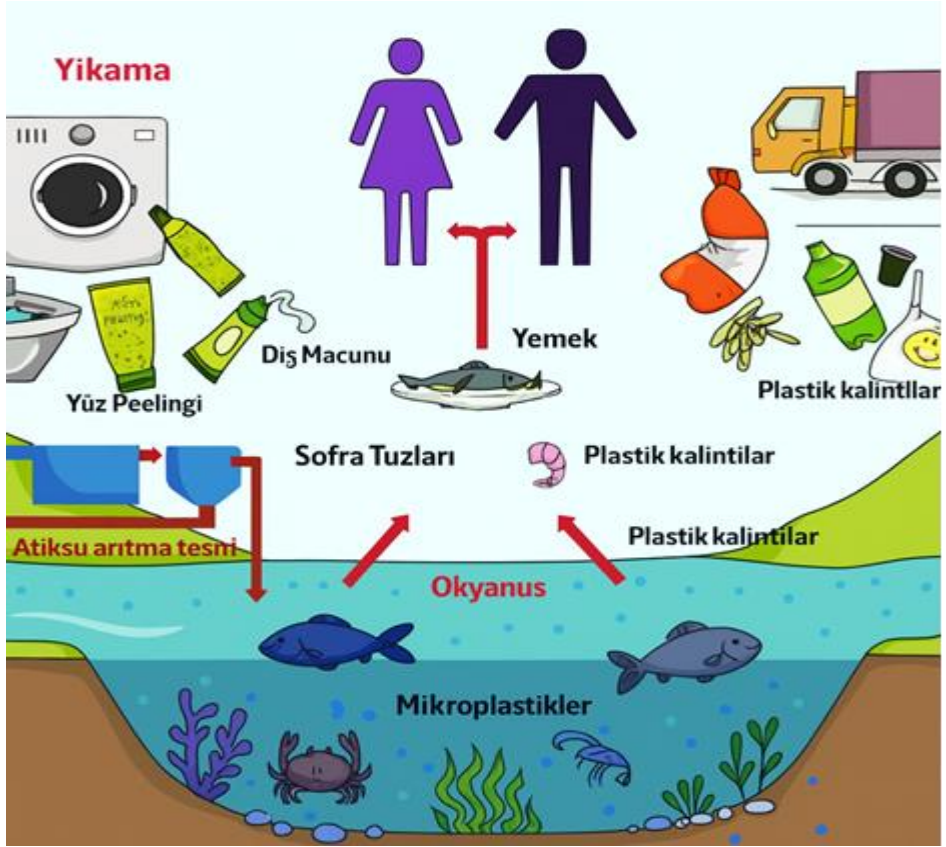
durum, ürün verimliliğini düşürerek gıda güvenliğini ve insan sağlığını tehdit etmektedir (De-la-Torre, 2020). Mikroplastikler (≤ 5 mm), kalıcılıkları ve yaygın dağılımları nedeniyle toprak sistemlerinde yükselen bir kirletici sınıfı olarak değerlendirilmektedir (Kumar ve ark., 2020b; UNEP, 2022).

Mikroplastikler sucul ortamlarda yoğun biçimde çalışılmış olsa da karasal sistemlere ilişkin bilgi görece sınırlıdır. Bu çelişkili durum, plastiklerin büyük ölçüde karada kullanılıp bertaraf edilmesine karşın, toprak matriksinden mikroplastik ekstraksiyonunun suya kıyasla daha güç olmasıyla ilişkilendirilmektedir (Rillig, 2012; Campanale ve ark., 2022). 2004–2018 arasında çalışmaların yalnızca %3.86’sı toprak kirliliğine odaklanmıştır. 2021’de bu oran %7.01’e yükselse de, sucul sistemlerin (%47.02) oldukça gerisindedir (He ve ark., 2018; Yang ve ark., 2021).

Karasal ekosistemlere mikroplastikler çoklu yollarla taşınır. Kentsel ve tarımsal alanlar, yoğun insani faaliyetler başlıca faktörlerdir (Kallenbach ve ark., 2022). Başlıca kaynaklar; arıtma çamurları, kompost uygulamaları, yüzey akışıyla taşınan atıklar, doğrudan çevreye bırakılan plastikler, atmosferik birikim, düzenli depolama sahaları ve endüstriyel atıklardır (Zhang ve ark., 2020a) (Şekil 5).

Atık su arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamuru, başka bir deyişle “biyokatı”, bazı ülkelerde ilgili mevzuat ve izin süreçleri çerçevesinde tarım arazilerinde toprak düzenleyici olarak kullanılmakta ve kimi uygulamalarda gübre amaçlı değerlendirilmektedir (Milojevic ve Cydzik-Kwiatkowska, 2021). Bununla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar biyokatı uygulamalarının topraklara mikroplastik taşınımında önemli bir yol olabileceğine işaret etmektedir; Söz konusu bu durum ile mikroplastikler, film malç, sulama suları, rüzgârla taşınım, yüzey akışı ve yakın çevrede yanlış atık yönetimi gibi diğer kaynaklarla birlikte nicel olarak değerlendirilmesi gereken bir bağlamı ifade eder (van den Berg ve ark., 2020). Atık su arıtma tesisleri, endüstriyel deşarjlar, evsel atık sular ve yağmur suyu akışlarıyla gelen farklı boyut ve polimer türlerindeki mikroplastiklerin tutulabildiği sistemlerdir. Izgara, kum tutucu, birincil/ikincil çökelti, kimyasal arıtım tesisleri, membran süreçleri ve parçacık boyut aralığının etkisine bağlı olarak mikroplastikler yüksek oranda su fazından uzaklaştırılabilir. Bu uzaklaştırma, kütle dengesi gereği, çamur fazında yoğunlaşma eğilimi doğurur. Sun ve arkadaşları (2019), çalışmalarında ele aldıkları arıtma hattı düzenleri ve tanımladıkları parçacık

boyu/ölçüm aralıkları için, atık sudaki mikroplastik parçacıkların %99.9'a kadar giderilebildiğini bildirmiştir. Ancak bu üst sınır, tesis tasarımına, işletme koşullarına ve esas alınan parçacık boyut aralıklarına son derece duyarlıdır. Bu nedenle, biyokatıların tarımsal kullanımı söz konusu olduğunda tarlaya taşınabilecek mikroplastik yükünün büyüklüğü; uygulama oranı (t/ha), tekrar sıklığı, çamurun işleme/kurutma/kompostlanma durumu, mikroplastiklerin şekil-boyut dağılımı, polimer türü ve sahadaki diğer mikroplastik kaynaklarıyla birlikte değerlendirilmelidir.



Şekil 5. Mikroplastik Kaynakları (<https://www.bilgiustam.com/sudaki-mikroplastik-mpp-sorunu/>)

İrlanda'da yapılan bir çalışmada, kullanılan yöntem ve alt boyut eşiği dikkate alınarak biyokatılarda $4.196\text{--}15.385$ parça kg^{-1} mikroplastik saptanmıştır. Araştırmacılar, ekstraksiyon/filtreleme verimi, geri kazanım yüzdesi ve spektral tanımlama sınırları nedeniyle eksik sayım olabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle yaklaşık %20 düzeltme uygulandığında, gerçek

aralığın 5.033–18.462 parça kg^{-1} olabileceği değerlendirilmiştir (Mahon ve ark., 2017). Sonuç olarak, biyokatı uygulamalarının topraklara mikroplastik taşınımına katkısı gerçektir. Ancak katkının nicel düzeyi, sahaya özgü uygulama parametreleri ve alternatif mikroplastik kaynaklarıyla karşılaştırmalı olarak ve yöntemsel sınırlılıkları şeffaf biçimde raporlanarak ortaya konmalıdır (Milojevic ve Cydzik-Kwiatkowska, 2021; van den Berg ve ark., 2020; Sun ve ark., 2019; Mahon ve ark., 2017).

Kompost, tarımsal ortamlara mikroplastiklerin girişinde potansiyel bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, kompostun kaynak materyali olan evsel/yeşil atık, arıtma çamuru karışımı gibi ön ayrıştırma ve eleme süreçleri, kompostlama yöntemi (yığın/reaktör), elek boyutu ve olgunlaşma koşulları gibi değişkenlere bağlıdır (Vithanage ve ark., 2021; Scopetani ve ark., 2022). Gui ve ark. (2021) tarafından yürütülen çalışmada, kırsal evsel atıkların kompostlanmasının topraklara mikroplastik taşınımında önemli bir yol olabileceği gösterilmiştir. Kuru ağırlık esaslı ortalama mikroplastik bolluğu 2400 ± 358 adet/kg olarak rapor edilmiştir. Bu değer, çalışmada kullanılan ekstraksiyon ve tanımlama protokollerinin (yoğunluk ayırma, kimyasal sindirim, optik/FTIR doğrulama gibi) ve özellikle alt boyut eşiğinin belirlenmesine duyarlıdır. Braun ve ark. (2021) ise kompost tesislerinden ve yapı marketlerinden temin edilen sekiz farklı kompostta plastik yaygınlığını kütle temelli olarak nicel değerlendirmiş ve 0.05 ± 0.08 ile 1.36 ± 0.59 g/kg aralığında değerler bulmuştur. Bu aralık, çalışmada esas alınan kuru/yaş madde tanımına ve geri kazanım verimlerine bağlı olarak yorumlanmalıdır. Söz konusu yazarlar, bu içeriklerin belirli uygulama senaryolarında tarım arazilerine yılda hektar başına yaklaşık 84.000 ile 1.610.000 plastik parçacığının taşınmasına yol açabileceğini belirtmiştir. Ancak bu tür parça- $\text{ha}^{-1} \cdot \text{yıl}^{-1}$ dönüşümleri, gerçek saha koşullarındaki uygulama oranı (t/ha), tekrar sıklığı, parçacıkların boyut-şekil dağılımı ve yoğunluk varsayımları ile ülke/mevzuat farklılıklarına son derece duyarlıdır.

Lastik ve yol aşınma parçacıkları; lastiklerdeki plastik polimerler, karbon siyahı ve silika gibi dolgular ile kükürtlenme sırasında eklenen katkıların, yoldan kopan mineral taneciklerle birbirine yapışıp bir araya gelen bileşenlerden oluşan bir karışımdır. Karasal ortamlarda başlıca birikim yerleri yol kenarı topraklarının A horizonu ile hendek/menfes sedimanlarıdır. Birikim miktarı genellikle yoldan uzaklıkla azalır, yüzeyde (0–2/0–5 cm) yoğunlaşır

ve yağış rejimi ile yüzey akışına duyarlıdır. Lastik ve yol aşınma parçacıkları bu konumsal birikim desenleri nedeniyle mikroplastik yüküne doğrudan katkıda bulunur. Toprak koşulları bu riskin kaderini belirler. pH ve redoks koşulları çinkonun hareketliliğini, çözünmüş organik karbon ve organik madde içeriği hidrofobik katkıların taşınabilirliğini, kil–organik madde kompleksi ve katyon değişim kapasitesi ise adsorpsiyon ile birlikte taşınmayı kontrol eder. Makropor akımı ve çatlak ağları, özellikle fırtına olaylarında, ince lastik ve yol aşınma fraksiyonlarının ve çözünmüş/kolloidal katkıların kısa devre yaparak alt katmanlara veya drenaj sistemlerine taşınmasına yol açabilir.

Fiziksel toprak özellikleri açısından lastik ve yol aşınma parçacıkları, düşük yoğunlukları ve esnek morfolojileri nedeniyle bölgesel toprak yoğunluğu, porozite ve hidrolik iletkenlik üzerinde farklı etkiler yaratabilir. İri fraksiyonlar gözenek tıkanmasına, ince fraksiyonlar ise su tutma eğrisi ve infiltrasyon dinamiklerinde küçük fakat ölçülebilir değişimlere neden olabilirler. Biyolojik açıdan, solucanlar ve toprakta yaşayan küçük canlılar bu parçacıkları yutabilir; bunun sonucunda büyüme ve üreme üzerinde etkiler görülebilir. Ancak lastik ve yol aşınma parçacıklarına verilen yanıt, uygulanan doza olduğu kadar toprak türüne ve organik madde miktarına da son derece duyarlıdır.

Düzenli depolama sahaları ve endüstriyel atık işleme merkezleri, saha operasyonları ve çevresel süreçlerin etkileşimi sonucunda mikroplastiklerin karasal ortama, özellikle de yol kenarı ve tesis sınırındaki yüzey topraklarına girişinde potansiyel kaynaklar arasında yer almaktadır (Nizzetto ve ark., 2016a). Bu katkı; yetersiz atık yönetimi, yükleme/boşaltma ve ön işlem sırasında parçacıkların kazara dökülmesi, günlük ya da ara örtü toprağındaki plastik kırıntıların rüzgârla taşınması, hafif toz ve havada asılı parçacıklarının havadan yere çökmesi ve sızıntı suyu sistemindeki arızalara bağlı kaçaklar yoluyla ortaya çıkabilir (De Souza Machado ve ark., 2018). Saha ölçeğinde birikim genellikle tesis sınırından uzaklaştıkça azalır. Mikroplastikler üst toprakta (A horizonu, 0–5/0–10 cm) yoğunlaşır ve yağış–yüzey akışı ile menfez/hendek sedimanlarında tutulabilir. Tutunma ve taşınımın derecesi; tekstür, organik madde, katyon değişim kapasitesi, pH, agregat stabilitesi ve makropor sürekliliği gibi toprak özelliklerince belirlenir. Kil-organik madde kompleksleri ve yüksek katyon değişim kapasitesi genellikle hidrofobik

fraksiyonları daha güçlü bağlarken, çatlak/solucan galerisi gibi makropor ağları özellikle şiddetli yağışlarda ince fraksiyonların aşağı katmanlara kısa devre taşınımını hızlandırabilir.

Düzenli depolama sahaları günümüzde en yaygın bertaraf stratejilerinden biridir ve küresel plastik atıkların önemli bir bölümünü (yaklaşık %21–42) depoladığı tahmin edilmektedir (Nizzetto ve ark., 2016a). Bu alanlarda gözlenen yüksek tuzluluk, değişken sıcaklıklar, UV ve mekanik gerilmeler, gaz oluşumu ve mikrobiyal oksidasyon/indirgeme süreçleri, polimerlerin kırılgenliğini artırarak makro-mikro ölçekli parçalanmayı hızlandırabilir (Chamas ve ark., 2020). Toprak açısından bunun anlamı şudur: kaynakta, aktif şevler, geçici stoklar, kırma/ayırma üniteleri üretilen daha küçük fraksiyonlar rüzgârla taşınmaya ve yüzey akışına daha duyarlı hale gelir. Örtü topraklarının hidrolik iletkenliği ve su tutma özellikleri, bu fraksiyonların tutulması veya taşınmasında belirleyici olur. Yönetim açısından uygulanabilecek önlemler şunlardır: etkin günlük örtü, rüzgâr perdeleri, yağmur suyu drenajının ayrıştırılması ve sediman kapanları; sızıntı suyu toplama–sızdırmazlık sistemlerinin düzenli bakımı; tesis çevresinde vejetatif tampon şeritlerin güçlendirilmesi ile kapak topraklarında agregat stabilitesini artıran organik madde yönetimi gibi uygulamalar sayılabilir. Bu adımlar, mikroplastiklerin toprağa girişini ve alan dışına taşınmasını azaltır.

Tablo 1. Tarım Arazilerinde Mikroplastik Kaynaklarının Avantaj/Dezavantajları

Kaynak / Yolak	Avantaj(lar) (amaçlanan)	Dezavantaj(lar) / Risk	Toprak Süreçleri Üzerindeki Etki	Azaltım / İyi Uygulamalar
Malç filmleri (LDPE vb.)	Toprak neminin korunması; sıcaklık yönetimi; yabancı ot baskısı; verim artışı	Arazide film kalıntısı; fragmantasyon → mikroplastik; katkı kimyasallarının leşatı; kaldırma/bertaraf zorluğu	Yüzeyde gözenek tıkanması, kabuklanma; su tutma/infiltrasyon dengesinde değişim; parçacıkların 0–10 cm’de birikimi	Kalınlık/reng standardı; sezon sonu etkin toplama; yerinde ayıklama/eleme; biyobozunur alternatiflerin saha-doğrulaması; yüzey akışını kıran şeritler
Arıtma çamuru / biyokatı	Organik madde ve besin elementi (N, P) girdisi, toprak yapısının iyileşmesi	MP yükü (parça/kg; alt boyut eşiğine duyarlı), ağır metal ve organik kalıntı riski, tekrarlı uygulamada birikim	Kil–OM kompleksi ve KDK ile tutulma, lif/fragmanların üst toprakta “depo” etkisi, makropor akımı ile olay bazlı taşınım	Uygulama oranı & sıklığını sınırlama; ön arıtım/kompostlama, temiz kaynak seçimi, sınır şeritlerinde ve drenaj hatlarında sediman kapanları
Kompost	Agregat stabilitesinde artış, su tutma ve biyolojiye katkı, artıkların geri kazanımı	Kaynak kalitesine bağlı MP ve makroplastik girdisi; heterojen yük	Agregat boşluklarında mekanik yakalama; OM kaplamasıyla parçacıkların mobilitesi değişebilir	Giriş materyali ön ayırıştırma (eleme, manyetik/optik ayıklama), kalite standardı; uygulama öncesi elek/float testi
Atık su sulaması	Kurak dönemlerde su ve besin sağlama, maliyet avantajı	Askıda MP ve çözünebilir katkıların toprağa girişi, patojen/kimyasal eşlikçiler	Islak koşullarda mezo gözenek üzerinden derine geçiş, doyma–drenaj döngülerinde yeniden dağılım	Ön filtrasyon, yağış öncesi sulamadan kaçınma, izleme (parça/kg; iletkenlik, DOC)

Tablo 1. Tarım Arazilerinde Mikroplastik Kaynaklarının Avantaj/Dezavantajları

Kaynak / Yolak	Avantaj(lar) (amaçlanan)	Dezavantaj(lar) / Risk	Toprak Süreçleri Üzerindeki Etki	Azaltım / İyi Uygulamalar
Atmosferik birikim	—	Kentsel yakınlıkta çökelleşen MP, rüzgârla lif/film taşınımı	Yüzey toprağında ince fraksiyon birikimi, yüzey akışı ile kenar sedimanlarına sürüklenme	Rüzgâr perdeleri/vejetatif tampon, sınır şeritlerinin düzenli bakımı, ekipmanla toz toplama
Tohum kaplamaları (PVA vb.)	Tohum koruma/performans, hedefli besin/aktif madde taşıma	Polimerik kalıntıların mikro ölçeğe dönüşümü, tohum–toprak temasında mikro ölçekte değişim	Mikro-bölgesel pH–hava dengesi ve mikrobiyal etkileşimlerde değişim	Biyo bozunur kaplamalar, saha koşullarında gerçek bozunma testleri
Tarımsal faaliyetlerden fragmentasyon (sürüm, hasat)	Kalıntıların toplanmasına yardımcı olabilir (kısmen)	Mevcut plastiklerin küçük parçalara bölünmesi, yayılımın artması	İşleme ile parçacıkların yatay/dikey yeniden dağılımı, çatlak ağlarıyla taşınım	Asgari toprak işleme; yüzey toplama/ayırıştırma, biçerdöver/ekipman sonrası temizlik protokolleri
Atık yönetimi yakın alan etkisi (tesise komşu tarlalar)	—	Rüzgârla taşınan hafif fraksiyon, kazara dökülme	Üst toprakta sıra dışı birikim, mesafe ile azalma	Çit/örtü perdeleri, lojistik planlama,sınır örnekleme ve erken müdahale

Mikroplastikler toprağa girdikten sonra deniz ortamlarına kıyasla genellikle daha yavaş mineralize olur. Ancak bu durum, parçacık sayısının artabileceği mekanik parçalanma süreçlerinin (ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngüleri, kök büyümesi, toprak işleme ve kuvars taneleriyle aşınma) toprakta etkin olmadığı anlamına gelmez. Toprak matrisinin gölgelemesi, agregasyon ve organik madde kaplanması ultraviyole ışımasını ve oksijen difüzyonunu sınırlandırarak güneş ışığına bağlı oksitlenme ve oksijenli bozunmayı yavaşlatır. Deniz ortamlarında dalga-akıntı kaynaklı sürekli mekanik enerji, yüzeyde yüzen plastiklerin yüksek ultraviyole dozuna maruziyeti ve su kolonunda oksijen sürekliliği bozunmayı hızlandırabilirken, toprakta bu sürükleyiciler sınırlıdır (Chamas ve ark., 2020).

Toprak; mineral parçacıklar, organik madde, hava ve sudan oluşan gözenekli bir yapıya sahiptir (Wild, 1993). Bu yapı, çözünmüş kimyasallar ile küçük parçacıkların taşınmasına imkân veren makro ve mezogözenek ağlarını içerir (Guo ve ark., 2020). Grayling ve ark. (2018), 1–6 µm mikroplastiklerin suyla birlikte tercihi akım yollarını kullanarak toprak gözeneklerinden geçip dikey yönde hareket edebildiğini göstermiştir. Buna karşılık daha büyük mikroplastikler toprak matrisinde filtrasyon/elek etkisi ile daha kolay tutulur. Bu nedenle toprak, mikroplastikler için uzun süreli bir “depo” işlevi görebilir. Nitekim Zubris ve Richards (2005), kanalizasyon çamuru uygulamasından 15 yıl sonra dahi tarla topraklarında mikroplastik liflerini tespit etmiştir. Bununla birlikte biyoturbasyon (solucan galerileri, kök büyümesi), tarımsal toprak işleme ve erozyon gibi dışsal etkiler, daha büyük parçacıkların da hem yatay hem dikey taşınımına katkıda bulunabilir (Wild, 1993; Guo ve ark., 2020; Grayling ve ark., 2018; Zubris ve Richards, 2005).

Topraklardaki plastik kirliliğinin boyutunu güvenilir biçimde ortaya koymak, plastiklerin toprak ortamında yaratabileceği etkileri toksikolojik ve pedofonksiyonel açıdan doğru değerlendirmek için kritiktir. Toprak sağlığı; gözenek yapısı, hacim ağırlığı, agregat stabilitesi, su tutma eğrisi, hidrolik iletkenlik, pH, elektriksel iletkenlik ve besin döngüsü gibi göstergelerle yakından ilişkilidir. Mikroplastiklerin eklenmesi bu göstergelerin bir bölümünü değiştirerek hava ile su dengesini, kök ortamının mekanik direncini ve mikrobiyal süreçleri etkileyebilir. Son aşamada bu değişimler, bitki gelişimini ve verimi belirleyici hâle gelir (Tang, 2020).

De Souza Machado ve arkadaşları (2019), mikroplastik eklenmesinin toprak yapısını değiştirdiğini ve bunun kök gelişimi üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir. Çalışmada görülen kök biyokütlesindeki artış; toprağın nüfuz etme direncinin (penetrometre ile ölçülen) ve hacim ağırlığının azalmasına, dolayısıyla köklerin gözenek ağı boyunca daha kolay ilerlemesine bağlanmıştır. Ayrıca, değerlendirilen polimerler içinde polyester parçacıklarının toprak yapısı üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Bununla birlikte, mikroplastiklerin toprakların biyofiziksel ve kimyasal özelliklerini ve dolayısıyla bitki sağlığını nasıl etkilediğine ilişkin mekanizmalar tam olarak aydınlatılmış değildir. Özellikle çimlenme üzerindeki etkilerde, gözlenen değişimlerin fiziksel süreçlerle mi (tohum ile toprağın temasının bozulması, kapiler su sürekliliğinin değişmesi, yüzey kabuğu ile gözeneklerin tıkanması) yoksa kimyasal süreçlerle mi (katkı maddeleri ve çözünebilen fraksiyonların yol açtığı ozmotik değişimler, pH ve elektriksel iletkenlikte oynamalar, çözünmüş organik karbon ve metal sızıntısı) ortaya çıktığı henüz net değildir.

Bu nedenle gelecek çalışmalar, alt boyut eşliğini açıkça belirtmeli, şekil ile polimer türünü ayırt etmeli, dozu hem parça kilogram başına hem de miligram kilogram başına olacak şekilde, tercihen kuru bazda raporlamalıdır. İzlenecek toprak sağlığı göstergeleri en azından şunları içermelidir: hacim ağırlığı, porozite ve por boyutu dağılımı, su tutma eğrisi (pF), hidrolik iletkenlik, agregat stabilitesi, enzim etkinlikleri ve mikrobiyal biyokütle (Tang, 2020; De Souza Machado ve ark., 2019).

2.5. Topraktan Mikroplastiklerin Tanımlanma Yöntemleri

Vurgulandığı üzere, tarım topraklarındaki mikroplastik kirliliğinin boyutunu ele alan çalışma sayısı oldukça azdır. Bunun nedenlerinden biri, toprakta mikroplastikleri yerinde tespit edecek analitik araçların yetersizliği ve toprak matrisinin karmaşıklığı nedeniyle mikroplastiklerin topraktan ekstraksiyonunun güç olmasıdır (Möller ve ark., 2020). Mikroplastik parçacıklarının tanımlanabilmesi için çevresel matristen ayrıştırılması ve izole edilmesi gerekmektedir (Şekil 6). Bu durum, özellikle bitki artıkları ve uzaklaştırılması zor olan humus bakımından zengin topraklarda önemli bir zorluk oluşturmaktadır (Guo ve ark., 2020). Mikroplastiklerin ayrıştırılması

için en basit yöntem, toprak numunesinin elenmesi ve stereo mikroskop altında sınıflandırılmasıdır (Möller ve ark., 2020). Ancak bu yöntem zaman alıcıdır ve yanlış tanımlama önyargısına açıktır. Dolayısıyla mikroplastiklerin olduğundan az tahmin edilmesine yol açabilmektedir (Möller ve ark., 2020).



Şekil 6. Stereo mikroskop ve paslanmaz çelik elek

Eleme, granülometrik fraksiyonlara dayalı olarak mikroplastikleri toprak, kum ve tortulardan ayırır ve tipik olarak 5 mm'den büyük parçacıkları ortadan kaldırmak için kullanılan bir ön işlem prosedürüdür. Birkaç çalışmada, belirli bir boyuttaki mikroplastikler sahada incelemenden sonra geri kazanılmıştır (Kumar ve ark., 2020) ve bu teknik, plastik parçacıklar insan gözüyle görülebildiğinde ve 5 mm'den büyük olduğunda önerilir. Toprakların çeşitli koşullar nedeniyle nemli olması muhtemeldir ve numuneler analizden önce kurutulmalıdır. Böylece organik madde tarafından bağlandıklarında mikroplastiklerin geri kazanımını sağlanabilmektedir. Netlik ve tutarlılığı sağlamak için, sonuçları doğru bir şekilde raporlamanın ve çalışmanın ıslak veya kuru numunelerle yapıp yapılmadığını belirtmenin önemini vurgulamak çok önemlidir. Mikroplastik miktarlarının raporlanması, yalnızca bir numune ağırlığına göre mikroplastik sayısını raporlamak yerine, her

zaman kuru veya ıslak numunenin kütlesi/hacmi olmalıdır. (Möller ve ark., 2020).

Yoğunluk ayırma, özellikle büyük (kg) kum veya tortu örnekleri için etkilidir (Hanvey ve ark., 2017). Deniz tortularındaki mikroplastiklerin belirlenmesi için ilk adım, örnek matrisinin ayrılmasıdır. Bu, örnek türüne ve mevcut kaynaklara önemli ölçüde bağlıdır. İlk aşama, mikroplastiklerin, ekstraksiyon çözeltisi ve mikroplastiklerin polimerleri arasındaki yoğunluk farklılıklarından yararlanılarak matrislerinden izole edildiği yoğunluk ayırmadır. İkinci aşama, ayrılmış mikroplastiklerle birlikte yüzeye çıkan mevcut organik maddenin oksidasyonunu içerir ve bu da sıklıkla mikroplastiklerin çıkarımını ve tespitini zorlaştırır. Polimerin ve flotasyon çözeltisinin yoğunluklarındaki farklılıklara dayalı mikroplastikleri çıkarma yöntemi, son yirmi yılda yürütülen araştırmaların çoğu için birincil yöntem olarak kabul edilebilir. Bu yöntem, daha az yoğun malzemenin yüzdüğü ve daha yoğun malzemeden ayrıldığı orta yoğunluklu bir sıvıya farklı yoğunluklarda malzemeler yerleştirmeyi içerir. Tortunun ve toprağın ortalama yoğunluğu 1.70 g/cm^3 ile 2.65 g/cm^3 arasında değişmektedir (Wang ve ark., 2021). Daha hafif mikroplastikler ile daha ağır kum veya tortular arasındaki yoğunluk farkı bunları ayırmak için kullanılabilir. Maliyet açısından etkili ve çevre dostu olan NaCl en yaygın kullanılan yöntemdir. NaCl, yalnızca 1.2 g/cm^3 yoğunluğa sahip bir çözelti üreterek daha yoğun polimerlerin ayrılmasını önler. Ancak, toprak parçacıkları mikroplastikleri büyük ölçüde adsorbe edebileceği veya gömebileceği için, böyle bir sistem hassas ayarlamalar gerektirebilir. Topraklar söz konusu olduğunda, mikroplastiklerin izolasyonu için yoğunluk ayırımı da ilk adımdır ve organik maddenin sindirimi de ikinci adımdır. Mikroplastiklerin yoğunluğu belirsiz olduğunda, mikroplastiklerin ekstraksiyonu ve flotasyonu için daha yüksek yoğunluklu tuz çözeltileri gereklidir ve araştırmacılar farklı tuzlarla deneyler yapmışlardır (Tablo 1).

Elütriyasyon, parçacıkları boyut, şekil ve yoğunluklarına göre ayırmak için çökeltmenin tersi yönde, yani yukarı doğru bir su ya da gaz akımı kullanan bir yöntemdir. Yöntemin kökeni, biyolojide tortulardan canlıları ayırmaya dayanır. Mikroplastikleri ayırmak, canlı organizmalara göre daha zordur. Çünkü akış hızının hem parçacıkların hem de akışkanın özelliklerine göre hesaplanıp ayarlanması gerekir. Akış çok düşük olursa hedef parçacıklar

yerinden oynamaz; çok yüksek olursa istenmeyen ağır taneler de birlikte taşınır. Ayrıca numune hazırlığı zaman alabilir ve genellikle istenen boy aralığına ön eleme yapılması gerekir (69).

Mikroplastiklerin tespitindeki en büyük zorluklardan biri, plastik ile doğal olarak oluşan parçacıklar arasında ayırım yapmaktır. Heterojen topraklardan organik maddelerin uzaklaştırılması zorunludur. Bu adım, hedef mikroplastiklerin çıkarılmasını ve izole edilmesini kolaylaştırır. Organik madde uzaklaştırılmadan, kabuk, plankton, bitki örtüsü veya diğer kalıntıların kalıntıları kalır, bu da optik ve spektral analiz süresini artırır. Mikroplastiklerin boyut aralığı 1 mm ile 1 μ m arasında değiştiğinden, daha küçük boyutlu parçacıklar daha belirgindir. Daha büyük yüzey-hacim oranları nedeniyle daha büyük etkilere sahiptir ve küçük çaplı mikroplastikler daha büyük olanlara göre sindirim yöntemlerine daha duyarlıdır. Kaba kumlu plaj birikintileri gibi mineral ağırlıklı tortular için organik madde giderimi genellikle gerekli değildir. Buna karşılık, göl tortuları ve açık deniz tortuları ile toprak, çamur ve kompost örneklerinde organik madde giderimi çoğu zaman zorunludur. Organik maddelerin giderilmesinde kullanılan yöntemler Tablo 2’de verilmiştir (Huang ve ark., 2023).

Tablo 2. Organik maddelerin giderilmesinde kullanılan yöntemler

Çözelti	Yoğunluk (g/cm ³)	Uygulama Alanı	Avantajları	Dezavantajları
NaCl	~1.2	Deniz tortuları, hafif polimerler (PE, PP)	Ucuz, çevre dostu, kolay hazırlanır	PVC, PET gibi yoğun polimerleri ayıramaz
ZnCl₂	1.6–1.7	Toprak, sediment, ağır polimerler	Daha yüksek yoğunluk → daha geniş polimer spektrumu ayrılabilir	Toksik, maliyetli
NaI	1.8	Hassas ayırma, laboratuvar çalışmaları	Çok yüksek geri kazanım, PET ve PVC dahil	Çok pahalı, tekrar kullanımı sınırlı
CaCl₂	1.4	Saha koşullarında pratik uygulama	Ucuz, bulunabilirliği kolay	Yüksek yoğunluklu polimerlerde sınırlı etki
Lityum Tungstat (Li₂WO₄)	>1.8	Özel laboratuvar testleri	Çok yüksek yoğunluk → tüm polimer tipleri için etkili	Çok pahalı, erişimi sınırlı

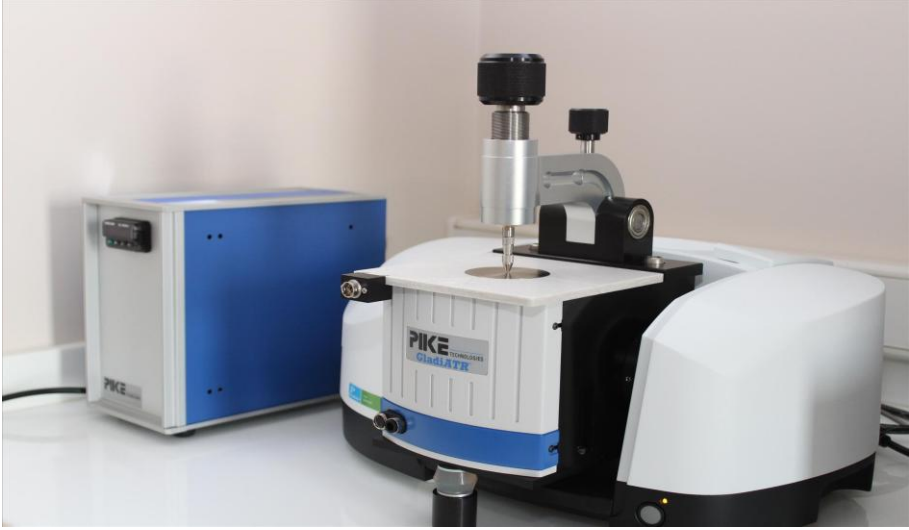
Elektrostatik ayırma; parçacıkların elektriksel iletkenlik özelliklerindeki farkları kullanarak mineral taneleri ile polimerleri birbirinden ayırmayı hedefler. Toprak numunesi yüksek gerilimli bir elektrik alanına maruz bırakılır. Mineral parçacıklar yüklerini hızla boşaltıp tamburdan ayrılırken, polimer parçacıklar daha yavaş boşalır ve kısa süre tambura tutunup farklı bir hazneye toplanır. Yöntem kimyasal kullanmadan mikropplastik fraksiyonunu zenginleştirebildiği için, yoğun organik madde içeren topraklarda yoğunluk ayırma öncesi veya sonrası tamamlayıcı bir basamak olarak değerlidir.

Toprak matriksinin yüksek organik madde içeriği, kil–organik madde kompleksleri ve agregasyon yapısı, mikropplastiklerin güvenilir biçimde ayrıştırılmasını güçleştirir. Bu nedenle literatürde, toprak örneklerinde mikropplastiklerin izolasyonu çoğunlukla iki basamaklı bir iş akışıyla ele alınır. İlk olarak mineral fraksiyonun uzaklaştırılmasına yönelik yoğunluk ayırma, ardından organik maddenin giderimi (Möller ve ark., 2020).

Yoğunluk ayırma, denizel tortularda öncül uygulamaları bulunan ve toprak çalışmalarına da uyarlanan yerleşik bir yaklaşımdır. Temel ilke, polimerlerin mineral tanelerine kıyasla daha düşük yoğunluklarından yararlanılarak mikropplastiklerin süspansiyonda yüzdürülmesidir (Thompson ve ark., 2004).

Organik maddenin uzaklaştırılması, optik ve spektral tanımlamanın doğruluğu için ikinci temel adımdır. Literatürde asit bazlı, baz bazlı, oksitleyici ve enzim temelli yöntemler kullanılmaktadır.

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FTIR) ile yapılan analizlerde, uygulama sonrası spektral değişimlerin meydana gelmediğini ortaya koymuştur. Hurley ve ark. (2018), Fenton reaktifi kullanımının organik maddeyi azaltabildiğini ve maliyet ile zaman açısından verimli bir metodoloji sunduğunu göstermiştir. Sonrasında yapılan pek çok çalışma da bu bulgularla uyumlu sonuçlar elde etmiş ve bu yöntemin karasal örneklerin analizinde yüksek potansiyele sahip olduğunu ileri sürmüştür (Şekil 7).



Şekil 7. ATR-FTIR sistemi

3. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMALAR

Bu bölümde özetlenen bulgular, mikroplastiklerin toprak sistemlerinde kalıcılık, taşınım ve tutulumunun toprak dokusu ve organik maddeyle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalar; kuru bazda parça/kg veya mg/kg, açık boy sınıfları, net alt boyut eşiği gibi uyumlu parametreler, matrise uygun yoğunluk ayırma + organik madde giderimi, kör ve depo geri kazanım testleri, belirsizlik raporu gibi şeffaf yöntemler ve sahaya dönük yönetim önerileri ile yürütülmelidir. Saha tasarımında, 0–10, 10–30 ve 30–60 cm derinlik katmanlarından örnekleme yapılmalı; ayrıca kirlilik kaynağından dışarı doğru sabit aralıklarla oluşturulan hatlar boyunca örnek alınarak bulgular arazi eğimi ve su akış yönleri ile ilişkilendirilmelidir. Kalibrasyon ve açık veri paylaşımı sağlanmalıdır. Böylece bulgular risk-temelli eşiklere, izleme protokollerine ve yerel eylem planlarına dönüşebilir. Sonuçta, araştırma ile uygulama arasındaki boşluk kapanacak, çiftçi ve politikacılar için karar verilebilir, izlenebilir ve tekrarlanabilir bir çerçeve oluşabilecektir.

4. SONUÇLAR

Bu derlemede, farklı ortamlardaki mikroplastiklerin ekstraksiyonuna yönelik yöntemler kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bulgular, tekniklerin aynı temel ilkelere dayansa da uygulamadaki küçük farkların dahi sonuçları

belirgin biçimde değiştirebildiğini göstermektedir. Yeni nesil, yüksek duyarlıklılı cihazların yaygınlaşması analitik kapasiteyi artırmış; ancak toprak, tortu ve atık su gibi karmaşık matrislerde mikropplastik analizi hâlâ zahmetli ve emek yoğun bir süreçtir.

Mikropplastiklerin kökeni, taşınımı, çevresel kaderi ve sağlık etkileri için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bazı teknolojiler erken aşamadadır; yine de otomasyonun laboratuvara girmesi ve yapay zekâ destekli yaklaşımların yaygınlaşması, hem akademik hem de endüstriyel uygulama alanlarını genişletmektedir.

Son yıllarda öne çıkan ortak sonuç, numune işleme basamağının yüksek kaliteli analitik çıktılar için kritik olduğudur. Önceden göz ardı edilebilen bu adım, bugün analitik kimyanın ayrılmaz bir bileşeni olarak kabul edilmekte; bu farkındalık hem yatırım kararlarını hem de güvenilir sonuç üretme süreçlerini yönlendirmektedir. İlerlemenin sürmesi için öncelikler:

- Matris işleme adımlarının standardlaştırılması ve yöntem uyumunun sağlanması,
- Yeni teknolojilerin saha koşullarına uyarlanması,
- Otomasyon ve yapay zekâ destekli analizlerin yaygınlaştırılması,
- Disiplinler arası iş birliklerinin güçlendirilmesidir.

KAYNAKÇA

- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985–1998.
- Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2019). Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review. *Environmental Pollution*, 245, 98–110.
- Braun, M., Mai, L. M., Heyse, R., & Amelung, W. (2021). Plastic in compost: Prevalence and potential input into agricultural and horticultural soils. *Science of the Total Environment*, 760, 143335.
- Campanale, C., Galafassi, S., Savino, I., Massarelli, C., Ancona, V., Volta, P., & Uricchio, V. F. (2022). Microplastics pollution in terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants. *Science of the Total Environment*, 805, 150431.
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511.
- Chauhan, V., Kärki, T., & Varis, J. (2019). Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites and their applications in the transportation sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- De-la-Torre, G. E. (2020). Microplastics: An emerging threat to food security and human health. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1601–1610.
- De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*.
- De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044–6052.

- Dijkstra, H., van Beukering, P., & Brouwer, R. (2020). Business models and sustainable plastic management: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120967.
- Ding, L., Zhang, S., Wang, X., Yang, X., Zhang, C., Qi, Y., & Guo, X. (2020). Occurrence and distribution of microplastics in agricultural soils of Shaanxi Province, NW China. *Science of the Total Environment*, 720, 137525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137525>
- Freinkel, S. (2011). *Plastic: A toxic love story*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- Grayling, K. M., Young, S. D., Roberts, C. J., de Heer, M. I., Shirley, I. M., Sturrock, C. J., & Mooney, S. J. (2018). Use of X-ray micro-CT to trace particle movement in soil. *Geoderma*, 321, 8–14.
- Guo, J. J., Huang, X. P., Xiang, L., Wang, Y. Z., Li, Y. W., Li, H., Cai, Q. Y., Mo, C. H., & Wong, M. H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263.
- Gui, J., Sun, Y., Wang, J., Chen, X., Zhang, S., & Wu, D. (2021). Microplastics during rural composting processes. *Environmental Pollution*, 274, 116553.
- Hanvey, J. S., Lewis, P. J., Lavers, J. L., Crosbie, N. D., Pozo, K., & Clarke, B. O. (2017). Analytical techniques for quantifying microplastics in sediments. *Analytical Methods*, 9(9), 1369–1383.
- He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., & Lei, L. (2018). Microplastics in soils: Methods, characteristics, and risks. *Trends in Analytical Chemistry*, 109, 163–172.
- Horton, A. A. (2022). Plastic pollution: When do we know enough? *Journal of Hazardous Materials*, 422, 126885.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments. *Science of the Total Environment*, 586, 127–141.
- Huang, Z., Hu, B., & Wang, H. (2023). Analytical methods for microplastics. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 383–401.
- Hurley, R. R., Lusher, A. L., Olsen, M., & Nizzetto, L. (2018). Validation of extraction methods for complex matrices. *Environmental Science & Technology*.

- Jie, C., Jing-Zhang, C., Man-Zhi, T., & Zi-Tong, G. (2002). Soil degradation: A global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12(2), 243–252.
- Julienne, F., Delorme, N., & Lagarde, F. (2019). From macroplastics to microplastics: Role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere*, 236, 124409.
- Kallenbach, E. M. F., Rødland, E. S., Buenaventura, N. T., & Hurley, R. (2022). Microplastics in terrestrial and freshwater environments. In *Microplastics in the ecosphere* (pp. 87–130). Springer.
- Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C. W., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y. S., & Bolan, N. S. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, 265, 114980.
- Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P. K., Kumar, R., Kumar, P., Shubham, S. D., Sharma, P., & Prasad, P. V. V. (2021). Impacts of plastic pollution on ecosystem services, Sustainable Development Goals, and the need to focus on circular economy and policy interventions. *Sustainability*, 13(17), 9963.
- Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., & Thompson, R. C. et al. (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369, 1455–1461.
- Lusher, A. L., Bråte, I. L. N., Munno, K., Hurley, R. R., & Welden, N. A. (2020). Is it or isn't it: The importance of visual classification in microplastic characterization. *Applied Spectroscopy*, 74(9), 1139–1153.
- Mahon, A. M., O'Connell, B., Healy, M. G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., & Morrison, L. (2017). Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment. *Environmental Science & Technology*, 51(2), 810–818.
- Millet, H., Vangheluwe, P., Block, C., Sevenster, A., Garcia, L., & Antonopoulos, R. (2018). The nature of plastics and their societal usage. In *Issues in Environmental Science and Technology* (Vol. 47, pp. 1–20). Royal Society of Chemistry.
- Milojevic, N., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2021). Agricultural use of sewage sludge as a threat of microplastic spread in the environment and the role of governance. *Energies*, 14(19), 6293.

- Möller, J. N., Löder, M. G. J., & Laforsch, C. (2020). Finding microplastics in soils: A review of analytical methods. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2078–2090.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic debris in the marine environment: History and future challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081.
- Nikiema, J., & Asiedu, Z. (2022). A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 24547–24573.
- Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M. N., Butterfield, D., & Whitehead, P. G. (2016). A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and sediments. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(8), 1050–1059.
- PAGEV. (2024). *Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı sektör raporu*.
- PlasticsEurope. (2015). *Plastics – The facts 2015*. PlasticsEurope.
- PlasticsEurope. (2022). *Plastics – The facts 2022*. PlasticsEurope.
- Rigamonti, L., Grosso, M., Möller, J., Martinez-Sanchez, V., Magnani, S., & Christensen, T. H. (2014). Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 42–53.
- Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6453–6454.
- SAFE – Safe Food Advocacy Europe. (2025). *SAFE raporu*.
- Sarkar, A., Deb, S., Ghosh, S., Mandal, S., Quazi, S. A., Kushwaha, A., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Impact of anthropogenic pollution on soil properties in eastern India. *Geoderma Regional*, 28, e00462. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00462>
- Scopetani, C., Chelazzi, D., Cincinelli, A., Martellini, T., Leiniö, V., & Pellinen, J. (2022). Hazardous contaminants in plastics contained in compost and agricultural soil. *Chemosphere*, 293, 133645.
- Statista. (2021). *Global plastic production 1950–2020*.
- Sridharan, S., Kumar, M., Saha, M., Kirkham, M. B., Singh, L., & Bolan, N. S. (2022). Polymers and additives in particulate plastics. *Science of the Total Environment*, 824, 153828.

- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence, and removal. *Water Research*, 152, 21–37.
- Tang, K. H. D. (2020). Effects of microplastics on agriculture: A mini-review. *Asian Journal of Environment & Ecology*.
- Thompson, R. C., Olson, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838.
- Tian, L., Cheng, J., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: Sources, effects, and fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100311>
- Van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., & Geissen, V. (2020). Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261, 114198.
- Vithanage, M., Ramanayaka, S., Hasinthara, S., & Navaratne, A. (2021). Compost as a carrier for microplastics and plastic-bound toxic metals. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 24, 100297.
- Waste Direct. (n.d.). *Agriculture sector*.
- Wang, J., Li, J., Liu, S., Li, H., Chen, X., Peng, C., Zhang, P., & Liu, X. (2021). Distinct microplastic distributions in soils under different land-use types. *Environmental Pollution*, 269, 116199. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116199>
- Wild, A. (1993). *Soils and the environment: An introduction*. Cambridge University Press.
- Yang, J., Li, R., Zhou, Q., Li, L., Li, Y., Tu, C., Zhao, X., Xiong, K., Christie, P., & Luo, Y. (2021). Abundance and morphology of microplastics in agricultural soil after long-term manure application. *Environmental Pollution*.
- Yang, L., Kang, S., Wang, Z., Luo, X., Guo, J., Gao, T., Chen, P., Yang, C., & Zhang, Y. (2022). Microplastic characteristics in soils across the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 828, 154518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154518>
- Zhang, B., Yang, X., Chen, L., Chao, J., Teng, J., & Wang, Q. (2020). Microplastics in soils: Possible sources, analytical methods, and

ecological impacts. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(8), 2052–2068.

Zubris, K. A. V., & Richards, B. K. (2005). Synthetic fibers as indicators of sludge application. *Environmental Pollution*, 138(2), 201–211.

BÖLÜM 8

MİKROPLASTİKLERİN AĞIR METALLERLE ETKİLEŞİMİ: TOPRAK, BİTKİ VE İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ÇEVRESEL BİR TEHDİT

Doç. Dr. Halil ERDEM¹
Dr. Cabir Çağrı GENCE²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048686>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Tokat, Türkiye. erdemh@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-3296-1549

² Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Aksaray, Türkiye. c.cagrignc@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0001-9748-1303

GİRİŞ

Son yıllarda, çevre üzerindeki artan baskılarla birlikte, mikroplastik (MP) kirliliği ve ağır metal kontaminasyonu ciddi ekolojik ve çevresel endişeler yaratmaktadır. Polimerlerin düşük maliyeti, dayanıklılığı ve çok yönlülüğü nedeniyle plastiklerin yaygın üretimi ve kullanımı, insanlık tarihinde 100 yılı aşkın bir süredir önemli bir yer tutmaktadır. Ancak, verimsiz geri dönüşüm ve bertaraf süreçleri, dünya çapında doğal ekosistemlere büyük miktarda mikroplastik deşarjına yol açmıştır. Mikroplastikler, ışık, yüksek sıcaklık oksidasyonu, fiziksel ayrışma ve biyolojik bozunma gibi süreçlerle parçalanan, 5 mm'den küçük boyutlu plastik parçaları olarak tanımlanmaktadır (Chang ve ark., 2023). Tarım ekosistemleri, organik gübrelerin, dokuma torbaların ve plastik malç filmlerinin uzun süreli kullanımı nedeniyle önemli mikroplastik rezervuarları haline gelmiştir⁴. Yakın zamanda yapılan bir araştırma, tarım topraklarında ortalama 18.760 adet/kg MP bulunduğunu belirtmiştir (Hu ve ark., 2023).

Aynı zamanda, ağır metaller gibi metalloidlerin ve diğer kirleticilerin toprakta yaygın varlığı, yerel ve bölgesel düzeyde zararlı ekolojik sonuçlara yol açmaktadır. Sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte insan faaliyetlerinden kaynaklanan toprakta ağır metal kirliliği, dünya çapında belgelenmiş önemli bir çevresel endişe kaynağıdır. Arsenik, krom, bakır, kadmiyum ve kurşun gibi ağır metallerin bitkiler üzerindeki toksik etkileri, metalin türüne, toprak mikroorganizma topluluğuna, toprağın fizikokimyasal özelliklerine ve diğer toprak faktörlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Ağır metallerin yüksek konsantrasyonlarda toprakta bulunması, bitki büyümesi üzerinde ciddi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu tür metallerin varlığı, özellikle yapraklarda nekroz (doku ölümü) ve kloroz (sararma) gibi fizyolojik bozukluklara yol açarak fotosentetik kapasitenin düşmesine neden olur. Bitkilerde ilk temas noktası genellikle kök sistemidir ve bu nedenle kök uzaması, lateral kök gelişimi ve kök hücre bölünmesi ağır metal toksisitesinden doğrudan etkilenmektedir. Özellikle arsenik gibi inorganik metallerin iki yaygın formu olan arsenat (As^{5+}) ve arsenit (As^{3+}), bitki kök hücreleri tarafından etkin bir şekilde alınabilir; bu süreçte arsenat, hücre içerisinde daha toksik olan arsenite dönüşerek hücresel hasarı artırılabilir. Ağır metallerin yüksek düzeyleri, bitki metabolizmasını sekteye uğratarak enzimatik aktivitelerde bozulmalara, fotosentez ve solunum gibi temel fizyolojik

süreçlerde aksamalara neden olur. Bunun sonucunda, besin elementlerinin bitki tarafından alımı yavaşlamakta ve bu durum bitki gelişiminde gerileme ile birlikte düşük verimlilikle sonuçlanmaktadır. Bu olumsuz etkiler, yalnızca bitkisel üretimi tehdit etmekle kalmayıp aynı zamanda ekosistem sağlığını ve tarımsal sürdürülebilirliği de ciddi şekilde riske atmaktadır.

Ağır metallerin bitki gelişimi üzerindeki bu olumsuz etkilerine ek olarak, son yıllarda mikroplastiklerin toprak ekosistemlerinde artan varlığı, bu kirlilik sorununun daha da karmaşık bir hale gelmesine neden olmuştur. Mikroplastikler ve ağır metallerin aynı anda toprakta bulunması, toprak yapısında fiziksel bozulmalara, kimyasal dengesizliklere ve mikrobiyal aktivitelerde baskılanmaya yol açmakta; bu durum yalnızca bitki sağlığını değil, nihayetinde insan sağlığını da tehdit eden çok yönlü etkiler doğurmaktadır. Literatürdeki mevcut veriler, bu iki kirleticinin etkileşimli varlığının bitkilerde klorofil içeriğini azalttığını, fotosentetik aktiviteyi sekteye uğrattığını ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) birikimini tetiklediğini ortaya koymaktadır. Bu tür fizyolojik bozulmalar, bitki büyümesini baskılayarak verim kayıplarına ve tarımsal üretkenliğin düşmesine neden olmaktadır.

Bu bölümde, mikroplastiklerin toprak ortamında ağır metallerle olan etkileşimleri, bu etkileşimlerin bitkiler üzerindeki birleşik toksik etkileri, bitkiler tarafından alım ve biyobirikim mekanizmaları ile çevresel sağlık açısından oluşturduğu potansiyel riskler bütüncül bir bakış açısıyla ele alınacaktır.

1. MİKROPLASTİK VE AĞIR METAL KİRLİLİĞİNİN KAYNAKLARI VE MEVCUT DURUMU

Mikroplastikler, doğal ekosistemlerde ya büyük plastiklerin zamanla parçalanmasıyla ya da doğrudan çevreye bırakılmasıyla oluşmaktadır (Huang ve ark., 2021). Toprakta mikroplastik kirliliğinin temel kaynakları arasında kanalizasyon sistemleri, kompostlanmış gübreler, plastik malç kullanımı, atık sular ve atmosferik birikim yer almaktadır (L. Li ve ark., 2020). Özellikle tarım arazileri, yoğun tarımsal üretim uygulamaları ve yetersiz atık yönetimi nedeniyle mikroplastik kirliliğinin en büyük odak noktalarından biri haline gelmiştir. Nitekim yapılan bazı çalışmalarda, İspanya ve Pakistan'daki tarım topraklarında kilogram başına sırasıyla 5190 ve 6875 parçacık gibi oldukça yüksek seviyelerde mikroplastik tespit edilmiştir (van den Berg ve ark., 2020).

Benzer şekilde, Çin'deki tarım alanlarının da büyük oranda mikroplastiklerle kirlenmiş olduğu bildirilmiştir (Li ve ark., 2018). Toprakta en yaygın görülen mikroplastik türleri arasında ise polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) bulunmaktadır (Lu ve ark., 2023).

Ağır metallerin toprağa karışmasının başlıca nedenleri arasında büyük ölçekli madencilik faaliyetleri, endüstriyel emisyonlar, yanlış ya da yetersiz atık bertaraf uygulamaları ve ağır metal içeren gübre ile pestisitlerin kullanımı gibi insan kaynaklı faaliyetler yer almaktadır. Bu kirleticiler yalnızca doğrudan değil, aynı zamanda atmosfer yoluyla taşınarak toprak yüzeyinde birikebilir. Öte yandan, büyük plastik materyaller zamanla mikroplastiklere ayrışırken, bu parçacıkların yüzeylerinde taşınan veya içerdikleri ağır metallerin toprağa sızması, kontaminasyonun düzeyini daha da artırmaktadır.

Mikroplastikler, sahip oldukları yüksek hidrofobik özellikler, geniş yüzey alanları ve düzensiz aktif yüzey yapıları sayesinde çevresel kirleticiler için etkili bir taşıyıcı görevi üstlenebilirler (Wang ve ark., 2023). Bu taşınım kapasitesinin en önemli örneklerinden biri ise ağır metallerdir; çünkü bu elementler mikroplastiklerle birlikte çevrede en sık rastlanan inorganik kirleticiler arasında yer almaktadır (Kinigopoulou ve ark., 2022). Günümüzde, mikroplastiklerin ve ağır metallerin toprak ortamında birlikte bulunması yaygın bir durum haline gelmiş ve bu birleşik kirlilik türü, toprak kalitesini, mikrobiyal dengeyi ve bitki çeşitliliğini olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir (Cao ve ark., 2021).

2. TOPRAKTA MİKROPLASTİKLER VE AĞIR METALLER ARASINDAKİ ETKİLEŞİM

Toprak ortamları, mikroplastiklerin çevreye girdikten sonra ulaştığı ilk ve en yoğun birikim alanları olarak dikkat çekmektedir. Özellikle tarım arazilerinde, mikroplastikler genellikle tek başına değil; başta ağır metaller olmak üzere diğer kirleticilerle birlikte bulunmakta ve bu durum, toprakta çok bileşenli bir kirlilik formunun oluşmasına yol açmaktadır. Bu birleşik kirlilik yapısı, sadece kirleticilerin bireysel etkilerini değil, aynı zamanda etkileşimli ve potansiyel olarak sinerjik etkilerini de gündeme getirmekte; dolayısıyla toprak sağlığı, bitki gelişimi ve nihayetinde çevresel sürdürülebilirlik açısından yeni araştırma alanları ortaya koymaktadır.

2.1. Mikroplastiklerin Ağır Metallerin Adsorpsiyonu ve Desorpsiyonu Üzerindeki Etkileri

Mikroplastikler, toprakta bulunan ağır metallerin biyoyararlanımını ve hareketliliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Geniş yüzey alanları sayesinde, MP'ler bu metaller için etkili bir taşıyıcı gibi davranarak çevredeki dağılımlarını değiştirebilir. Yapılan çeşitli çalışmalar, mikroplastiklerin arsenik (As), kadmiyum (Cd), krom (Cr), bakır (Cu), nikel (Ni), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) gibi yedi farklı ağır metali adsorbe edebildiğini ortaya koymuştur (Bhattacharya ve ark., 2007). Örneğin, polistiren (PS), kadmiyumu fonksiyonel gruplar aracılığıyla kompleks oluşturarak bağlarken; bakır, hem elektrostatik etkileşimle hem de yine fonksiyonel grup kompleksasyonu ile adsorbe edilebilmektedir (Liu ve ark., 2019).

Her ne kadar mikroplastiklerin ağır metallerle etkileşim mekanizmaları tam olarak anlaşılmış olmasa da, literatürde bu etkileşimlerin temel olarak elektrostatik çekim, kompleks oluşumu ve ortak çökeltme gibi süreçlerle gerçekleştiği kabul edilmektedir (Lang ve ark., 2020). MP'lerin yüzeyinde yer alan hidroksil, karboksil ve hidröz oksit gibi çeşitli fonksiyonel gruplar, ağır metallerin topraktaki taşınımı ve çevresel kaderi üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, arsenik elementinin, polistiren yüzeyine karboksil gruplarıyla kurduğu hidrojen bağları aracılığıyla adsorbe olabildiği, bunun da çevredeki toksite potansiyelini artırdığı bildirilmektedir (Dong ve ark., 2021).

Bu adsorpsiyon süreçleri, mikroplastik türü, partikül boyutu, çevresel yaşlanma derecesi ve toprak pH'ı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Cao ve ark., 2021; Dong ve ark., 2021; Wang ve ark., 2022). Bu faktörlerin her biri, MP'lerin kirleticilerle olan etkileşim gücünü ve çevresel davranışını belirleyici niteliktedir.

Mikroplastiklerin toprakta ağır metallerle etkileşimi, yalnızca varlıklarıyla değil, aynı zamanda sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özelliklerle de şekillenmektedir. Mikroplastiklerin adsorpsiyon kapasitesi, yani topraktaki ağır metalleri tutma yetenekleri; türlerine, boyutlarına, çevresel koşullara ve yaşlanma düzeylerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Aşağıda, mikroplastiklerin ağır metal adsorpsiyonunu etkileyen başlıca faktörler bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır.

Mikroplastik türü, adsorpsiyon kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Farklı MP türleri; polimer yapısı, gözeneklilik derecesi,

yüzeydeki fonksiyonel gruplar ve elektriksel yük gibi yapısal özellikleri nedeniyle ağır metallere karşı farklı etkileşim gösterir (Huang ve ark., 2023). Örneğin, PVC, PS, PP ve PE gibi yaygın mikroplastikler arasında, daha geniş özgül yüzey alanına sahip olanların kadmiyum (Cd) adsorpsiyon kapasitesinin daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Guo ve ark., 2020). Hidrofobik özellik gösteren PE'nin krom (Cr) adsorpsiyonu sınırlı kalırken, hidrofilik yapıya sahip PA ve PMMA gibi polimerler, yüzeylerindeki amid grupları sayesinde Cr ve Cu^{2+} gibi metallerin adsorpsiyonunu daha etkin biçimde gerçekleştirebilmektedir (Fang ve ark., 2024; Han ve ark., 2021).

Partikül boyutu da bu süreçte önemli bir faktördür. Mikroplastiklerin boyutu küçüldükçe, birim hacme düşen yüzey alanı artar ve bu da adsorpsiyon kapasitesini doğrudan etkiler (Zhang ve ark., 2023). Özellikle küçük boyutlu mikroplastikler, ağır metallerle temas yüzeyini artırarak daha fazla metal iyonunun bağlanmasına imkân tanır.

Çevresel yaşlanma da mikroplastiklerin kimyasal özelliklerini değiştirerek metal tutma kapasitelerini etkiler. Toprakta bulunan MP'ler, UV radyasyonu, kimyasal oksidasyon, biyolojik aktivite ve fiziksel ayrışma gibi süreçlere maruz kaldıkça yüzey morfolojilerinde ve fonksiyonel gruplarında değişiklik meydana gelir (Andrady, 2017). Bu değişiklikler, özellikle yüzeyde pürüzlülük ve gözenekliliği artırarak metallerle olan etkileşimleri güçlendirebilir. Örneğin, yaşlanmış PS ve PTFE mikroplastiklerinin yüzeylerinde oluşan gözenekli yapı, arsenik (As) gibi elementlerin hidrojen bağları aracılığıyla daha güçlü şekilde adsorbe edilmesine neden olmaktadır (Johansen ve ark., 2018).

Toprak pH'sı da adsorpsiyon süreçleri üzerinde belirleyici bir etkidir. MP'lerin yüzeyindeki fonksiyonel grupların iyonizasyon durumu ve ağır metallerin çözünürlük özellikleri, pH'ya bağlı olarak değişiklik gösterir (Zhang ve ark., 2020). Düşük pH koşullarında, H^+ iyonları ile metal iyonları arasında rekabet artarken, yüksek pH değerlerinde metal iyonları kompleksleşmeye ya da çökmeye eğilim gösterebilir (Raji ve ark., 2023). Bu durum, ağır metallerin mikroplastiklerle olan bağlanma etkinliğini doğrudan etkiler.

Ayrıca, topraktaki humik ve fulvik asit gibi doğal organik maddeler de adsorpsiyon süreçlerinde etkilidir. Bu bileşikler, mikroplastiklerin arsenik gibi metalleri bağlama kapasitesini artırabilir; özellikle π - π etkileşimleri yoluyla arsenik taşınımı ve tutunması teşvik edilebilir (Dong ve ark., 2020a).

Desorpsiyon süreçleri açısından değerlendirildiğinde, mikroplastiklerin çevresel yaşlanma derecesi ve partikül boyutu yine önemli faktörlerdir. Yaşlanmış MP'lerde Cd adsorpsiyon kapasitesi azalırken, daha küçük boyutlu mikroplastiklerin desorpsiyon oranları genellikle daha düşüktür (Zhang ve ark., 2020). Ayrıca, pH düştükçe yani asidik koşullar arttıkça, gümüş (Ag) gibi bazı metallerin MP yüzeylerinden desorbe olma eğilimi artış göstermektedir (Kalčíková ve ark., 2020). Bu tür faktörler, ağır metallerin topraktaki hareketliliği ve biyoyararlanımı açısından kritik öneme sahiptir.

2.2. Toprak Fizikokimyasal Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Mikroplastiklerin ve ağır metallerin birlikte bulunduğu kirlenmiş tarım topraklarında, toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri önemli ölçüde değişikliğe uğrayabilir. Bu değişiklikler yalnızca toprağın yapısal bütünlüğünü değil, aynı zamanda mikrobiyal toplulukların dengesi ile toprak enzimlerinin aktivitesini de etkileyerek dolaylı olarak bitki gelişimini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Kajal ve Thakur, 2024).

Fiziksel özellikler açısından bakıldığında, mikroplastikler toprak parçacıkları arasında düzensiz dolgu oluşturarak toprak yapısını bozabilir (Pang ve ark., 2023). Örneğin, polyester mikrofiberler (PMF) bazı durumlarda toprak agrega stabilitesini azaltırken, bazı çalışmalar PMF'nin ince toprak partikülleriyle etkileşime girerek ve ıslak-kuru döngülerle birlikte büyük agregaların oluşumunu ve stabilitesini artırabileceğini göstermektedir (de Souza Machado ve ark., 2019). Mikroplastiklerin lifli yapıları, toprakta küçük gözenekler oluşturarak su tutma kapasitesini artırabilir; bu da toprak geçirgenliği, havalanma ve redoks durumları gibi fizikokimyasal parametrelerde değişimlere yol açar (Z. Zhou ve ark., 2023). Bu tür değişimler, ağır metallerin biyoyararlanımını ve dolayısıyla bitki köklerinin gelişimini doğrudan etkileyebilir.

Kimyasal özellikler açısından ise, toprak pH'ı mikroplastik ve ağır metal kirliliğinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Zhao ve ark., 2021). Geniş partikül boyutuna sahip mikroplastiklerin pH'ı artırabildiği, buna karşılık daha küçük partikül boyutlarının pH'ı düşürebildiği gösterilmiştir (Wang ve ark., 2020a). Örneğin, polietilen (PE) ve kadmiyumun (Cd) birlikte bulunduğu toprak koşullarında, pH seviyesinin arttığı gözlemlenmiştir ve bu durum, mikroplastiklerin toprak üzerindeki etkisinin Cd'nin etkisinden daha baskın

olabileceğini düşündürmektedir (Wang ve ark., 2020b). Ayrıca mikroplastikler, topraktaki elektriksel iletkenlik, katyon değişim kapasitesi (KDK), çözünmüş organik karbon (ÇOK) ve organik madde içeriği gibi diğer önemli kimyasal özelliklerde de değişimlere neden olabilmektedir (Meng ve ark., 2023).

Toprak enzim aktiviteleri de mikroplastik varlığından etkilenmektedir ve bu etki kullanılan plastik türüne göre değişkenlik göstermektedir (Shah ve ark., 2023). Örneğin, polipropilen (PP) lifleri ve polietilen (PE) filmler başlangıçta toprakta üreaz aktivitesini artırabilse de, bu artış zamanla düşüşe geçebilmektedir (Yu ve ark., 2021). Mikroplastikler, enzimlerin aktif bölgelerini bloke ederek hem yapılarını hem de işlevlerini bozabilir; ayrıca, MP yüzeyine bağlanan zararlı maddeler de enzim aktivitelerinde azalmaya yol açabilir (Liu ve ark., 2023). Bunun yanında, mikroplastikler toprak mikroorganizmalarının büyüme ve metabolizmasını olumsuz etkileyerek özellikle Acidobacteria ve Bacteroidetes gibi bazı bakteri gruplarının kirliliğe karşı direncini zayıflatabilir ve bu durum toprakta enzim aktivitelerinin genel olarak baskılanmasına neden olur (Rong ve ark., 2021).

2.3. Toprak Organizması Üzerindeki Toksik Etkileri

Toprakta bulunan mikroplastikler, toprak faunasını çeşitli şekillerde etkileyebilir; bu etkiler genellikle toprağın organizmalar tarafından yutulması, cilt emilimi ve solunum yoluyla maruz kalma ile ortaya çıkar. Bu maruziyet, toprak canlılarının hayatta kalması, büyümesi ve üremesi üzerinde doğrudan zararlı sonuçlar doğurabildiği gibi, toprak mikrobiyal ortamında meydana gelen değişiklikler yoluyla dolaylı etkiler de yaratabilir. Özellikle solucanlar üzerinde yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin yüzey adsorpsiyonu ve iyon değişimi gibi mekanizmalar aracılığıyla bu organizmalarda ağır metal birikimini artırabildiğini göstermektedir (Li ve ark., 2023). Bu birikim, solucanların büyüme oranlarını azaltmakta, bağışıklık sistemini zayıflatmakta ve üreme kapasitesini düşürmektedir. Ağır metallerle kontamine olmuş topraklarda mikroplastik varlığı, oksidatif stresi artırarak süperoksit dismutaz (SOD) ve peroksidaz (POD) gibi antioksidan enzimlerin aktivitesini yükseltmekte; buna karşılık, asetilkolinesteraz (AChE) aktivitesini baskılayarak lipid peroksidasyonunu (LPO) tetiklemektedir (Zhang ve ark., 2022). Mikroplastiklere ($>3000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ya da mikroplastik ve kadmiyum gibi ağır metallere birlikte maruz kalmak, solucanların büyüme oranlarını belirgin

şekilde azaltmakta ve MP'lerin Cd'nin toksik etkilerini daha da şiddetlendirdiği görülmektedir (Zhou ve ark., 2020). Bunun yanı sıra, mikroplastiklerin yutulması solucanların bağırsak mikrobiyotasında yapısal ve fonksiyonel değişikliklere neden olarak organik asit üretimini ve bağırsak florasının metabolik süreçlerini etkileyebilmektedir (Y. Zhou ve ark., 2023). Bu durum, toprak pH'ında değişimlere yol açarak ağır metallerin biyoyararlanımını artırabilir ve böylece bitki kökleri tarafından metal alımını kolaylaştırabilir.

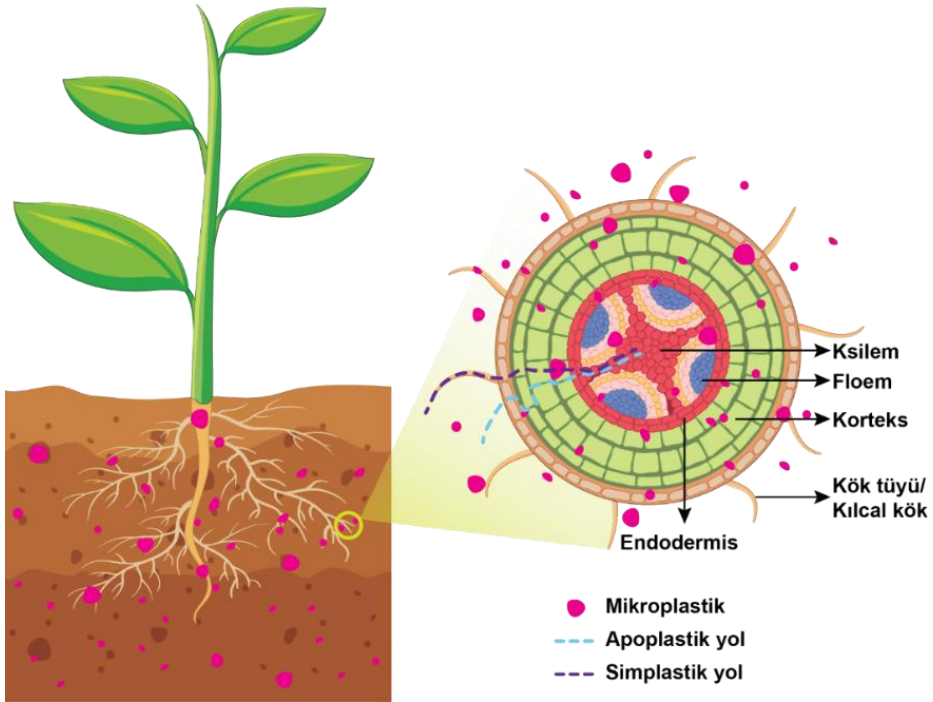
Mikroplastikler ve ağır metaller aynı zamanda toprak mikrobiyal aktivitesi üzerinde doğrudan toksik etkiler göstermektedir (Chang ve ark., 2022). MP'ler, ağır metallerin toprak mikroorganizmalarıyla temasını artırmak için bir taşıyıcı ortam gibi davranarak bu metallerin hareketliliğini ve biyoyararlanımını artırabilir. Yapılan araştırmalar, mikroplastik varlığının toprak özelliklerini ve özellikle kurşun (Pb) ve çinko (Zn) gibi metallerin biyoyararlanımını değiştirdiğini, aynı zamanda toprak bakteri topluluklarının zenginliğini ve çeşitliliğini azalttığını ortaya koymuştur (Feng ve ark., 2022). Bazı mikroplastikler, belirli bakteri taksonlarını seçici biçimde artırarak mikrobiyal dengenin bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, mikroplastikler mikropların hücre zarlarıyla doğrudan etkileşime girerek hücre yapısına ve işlevine zarar verebilir; bu durum mikrobiyal ölümle sonuçlanabilir. Bununla birlikte, mikroplastiklerin varlığı toprak enzim aktivitesini de olumsuz etkileyebilir ve mikrobiyal metabolizmayı baskılayarak topraktaki mikrobiyal bolluk ve çeşitliliğin azalmasına neden olabilir (Li ve ark., 2006).

3. MİKROPLASTİK-AĞIR METAL ETKİLEŞİMLERİNİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

3.1. Bitkiler Tarafından Alım ve Bitki Büyümesi Üzerindeki Etkileri

Mikroplastikler farklı yollarla toprak ortamına girebilir ve bu durum karasal organizmalar, özellikle de bitkiler için potansiyel bir tehdit oluşturabilir. Bitkiler mikroplastikleri genellikle kök tüyleri aracılığıyla alır ve bu süreçte sadece plastik parçacıkları değil, plastik dışı bileşikler de emilebilir (L. Li ve ark., 2020). Özellikle polistiren (PS) ve polimetil metakrilat (PMMA) gibi nano ve mikrometre boyutundaki plastik partiküller, kök yüzeylerinde oluşan çatlaklar veya hücresel boşluklar üzerinden buğday ve marul gibi bitkilerin merkezi vasküler sistemine (stele) kadar ulaşabilir. Bu durum, "kırık-

giriş” rotası olarak adlandırılmakta ve mikroplastiklerin bitkiler tarafından etkili şekilde alınmasına olanak sağlamaktadır. Kök sistemi tarafından emilen bu partiküller, apoplastik ve simplastik yollarla bitki içinde taşınarak yapraklar gibi hava organlarına da ulaşabilmektedir (L. Li ve ark., 2020). Örneğin, bitki fidelerinde, köklerde biriken mikroplastiklerin daha sonra yukarı kısımlara taşındığı gösterilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Bitki köklerinde mikroplastığın taşınımı

Mikroplastiklerin bitki gelişimi üzerindeki olumsuz etkileri, genellikle bitki biyokütlesi ve doku bileşimi üzerinde belirgin hale gelir. Araştırmalar, PS ve politetrafloroetilen (PTFE) gibi plastiklerin pirinç bitkilerinde gövde biyokütlesini azalttığını göstermektedir (Dong ve ark., 2020b). Ayrıca, polikarbonata kısa süreli maruz kalmanın bile domates bitkilerinde çimlenmeyi engellediği ve kök ile fide uzunluğunu ciddi biçimde azalttığı tespit edilmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen mikroplastiklerin ise kadmiyumla etkileşime girerek mısır bitkilerinde önemli fitotoksik etkilere yol açtığı rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2020a).

Mikroplastik ve ağır metallerin birlikte var olduğu koşullarda, bu iki kirleticinin bitki büyümesi üzerindeki etkileri genellikle toprağın

fizikokimyasal özelliklerinin bozulması ve bitki yapısındaki hassas dengelerin bozulması yoluyla ortaya çıkar. Her iki kirleticisi de tek başına dahi bitki gelişimini baskılayıcı etkiler gösterebilirken, birlikte bulunduklarında bu etkiler çoğu zaman daha da belirgin hale gelir (Ziani ve ark., 2023). Örneğin, kadmiyum (Cd) ve PS'nin birlikte bulunduğu ortamlarda marul bitkisinin biyokütlesinin azaldığı gözlemlenmiştir (Wang ve ark., 2021). Ancak her durumda MP varlığı zarar verici değildir; bazı durumlarda MP'ler metal toksisitesini artırmak yerine azaltabilir. Örneğin, Khan ve ark. (2023) PVC'nin varlığının, tatlı patateslerde krom (Cr) kaynaklı biyokütle kaybını artırdığını rapor etmiştir.

Bitkilerde fotosentez kapasitesi, büyüme ve biyokütle oluşumu açısından kritik bir rol oynar. MP ve kurşun (Pb) gibi metallerin birlikte bulunduğu koşullarda, karahindiba bitkilerinde CO₂ bağlama kapasitesinin azaldığı, klorofil seviyelerinin düştüğü ve fotosentetik sistemin genel verimliliğinin zayıfladığı gösterilmiştir (Song ve ark., 2023). Ancak bazı çalışmalar, MP'lerin ortamdaki ağır metalleri adsorbe etmesi sayesinde, bitkilerdeki fotosentetik sistem üzerindeki zararlı etkileri azaltabildiğini de belirtmektedir (Zong ve ark., 2021).

Bitki kök aktivitesi, köklerin büyüme hızı ve besin elementlerini emme kapasitesi açısından önemli bir göstergedir. PS ve arsenik (As) içeren koşullarda yapılan çalışmalar, bu birleşik kirliliğin pirinç kök aktivitesini tek başına maruziyete göre daha fazla baskıladığını ortaya koymuştur (Mamathaxim ve ark., 2023). Bu tür stres koşullarının ortak sonucu ise oksidatif stres olup, hem MP'ler hem de ağır metaller bitkilerde serbest radikal üretimini artırarak hücrel hasara ve gelişim geriliğine yol açmaktadır (Z. Li ve ark., 2020).

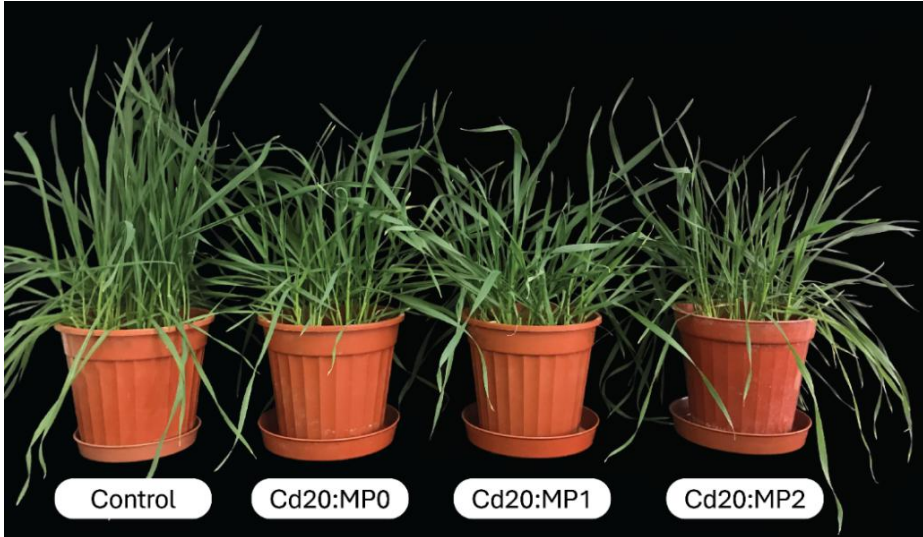
3.2. Ağır Metallerin Bitkiler Tarafından Birikimi Üzerindeki Etkileri

Bitkiler doğal olarak ağır metalleri absorbe edebilme kapasitesine sahiptir; ancak son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin bu süreçte önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle mikroplastiklerin, bitkiler tarafından emilen ağır metal miktarını etkileyebileceği ve bu metallerin ekosistem içerisindeki taşınma dinamiklerini değiştirebileceği belirtilmektedir (Bethanis ve Golia, 2023). Literatürde yer alan bulgular, ağır metal alımının

esas olarak bitkinin yetiştiği toprak koşullarına, bitkinin fizyolojik özelliklerine ve genel metabolik durumuna bağlı olduğunu göstermektedir (Ziani ve ark., 2023).

Mikroplastikler, toprak ortamında pH, mikrobiyal denge ve ağır metallerin biyoyararlanabilirliği gibi temel özellikleri değiştirme potansiyeline sahiptir. Bu değişimler, bitkiler tarafından emilen metal miktarını dolaylı olarak etkileyebilir. Mikroplastiklerin ve ağır metallerin birlikte bulunması genellikle bitki biyokütlesini azaltmakta ve bu da bitkilerin ağır metalleri emme kapasitesini sınırlayabilmektedir (Z. Li ve ark., 2020). Ancak bazı çalışmalar, mikroplastiklerin bitkilerin metal alımına belirgin bir etkisi olmadığını da bildirmiştir (Lian ve ark., 2020).

Yine de mevcut çalışmaların çoğu, mikroplastiklerin varlığında bitkilerde ağır metal birikiminin arttığını ortaya koymaktadır (Wang ve ark., 2021). Örneğin, buğday bitkileri üzerinde yapılan bir çalışmada, polietilen (PE) mikroplastiklerin bitkide kadmiyum (Cd) toksisitesini artırdığı, bu durumun bitki büyümesini gerilettiği ve kuru madde verimini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, PE mikroplastiklerin Cd emilimini ve köklerden sürgünlere taşınmasını anlamlı düzeyde artırdığı da rapor edilmiştir (Erdem ve ark., 2025) (Şekil 2).



Şekil 2. Mikroplastik ve Cd'un buğday bitkisi üzerindeki etkisi (Erdem ve ark., 2025)

Marul bitkisinde (*Lactuca sativa* L.), polietilen (PE) konsantrasyonu arttıkça hem kök hem de sürgünlerde Cd birikiminde %60'lara varan artışlar rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2021). Benzer şekilde, 100 nm boyutundaki PS partikülleri marul tarafından Cu, Zn, Pb ve Cd emilimini teşvik etmiş (G. Xu ve ark., 2023); 139 nm boyutundaki PS partikülleri ise pirinç (*Oryza sativa* cv. Zhonghua 11) köklerinde arsenik içeriğini %16 oranında artırmıştır (C. Xu ve ark., 2023).

Buna karşın bazı bulgular, mikroplastiklerin bitkilerde metal birikimi üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığını ortaya koymuştur. Örneğin, PE ve PLA partikülleri (100 – 154 nm), mısır bitkilerinde (*Zea mays* L. var. Wannuoyihao) Cd birikimini değiştirmemiştir (Wang ve ark., 2020b). Aynı şekilde, PMF (10.5 µm) ve PS (1 – 1000 nm) partiküllerinin varlığı da marul ve buğday (*Triticum aestivum* L.) yapraklarındaki Cd düzeylerinde anlamlı bir değişikliğe yol açmamıştır (Lian ve ark., 2020; Zeb ve ark., 2022).

Genel eğilim olarak, küçük partikül boyutuna, düşük konsantrasyona, hidrofilik yüzey özelliklerine ve pozitif yüke sahip mikroplastiklerin, bitkilerde ağır metal birikimini artırma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu etkileşimde rol oynayan başlıca mekanizmalar arasında mikroplastiklerin yüzey yükleri, partikül boyutları ve doz-yanıt ilişkileri yer almaktadır. Örneğin, negatif yüklü mikroplastikler bitki hücrelerinin de negatif yüklü olan hücre duvarlarıyla itişme eğilimindeyken, pozitif yüklü MP'ler elektrostatik çekim sayesinde hücre yüzeyine tutunarak ağır metal alımını artırabilmektedir (Xu ve ark., 2022). Daha küçük partiküller, kök sistemine daha kolay nüfuz ettiklerinden, metal adsorpsiyonunu ve dolayısıyla birikimini güçlendirebilir. Düşük dozlu mikroplastik maruziyeti, bitkilerde oksidatif stres tepkilerini tetikleyerek metal alımını artırabilirken, yüksek dozlar büyümeyi baskılayarak bu etkiyi azaltabilir (Shi ve ark., 2024).

Ayrıca, mikroplastiklerin bitki hücrelerindeki taşıyıcı proteinleri etkileyerek metal alım yollarını moleküler düzeyde de değiştirdiği gösterilmiştir. Örneğin, kök hücre zarlarında yer alan Cd taşıyıcı proteinlerin gen ekspresyonu MP varlığında artabilir. Benzer şekilde, marul köklerindeki ATP bağlayıcı kaset (ABC) taşıyıcıları ve fitohormon sinyal yolları da mikroplastik ve nanoplastiklerin etkisiyle değişime uğrayabilir (G. Xu ve ark., 2023). Bu durum, ağır metallerin bitkideki alımını ve dağılımını daha da karmaşık hale getirmektedir.

4. ÇEVRESEL SAĞLIK PERSPEKTİFLERİ: MİKROPLASTİK VE AĞIR METAL BİRLEŞİK TOKSİSİTESİNİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Ağır metallerin insan sağlığı üzerindeki toksik etkileri uzun süredir bilimsel olarak belgelenmiş olsa da mikroplastiklerin sağlık üzerindeki potansiyel etkileri hâlâ sınırlı düzeyde anlaşılabilmiştir. Bu sınırlılık, özellikle diyet yoluyla maruz kalma düzeyleri, partikül toksisitesi ve insan vücudunda biyoyararlanım mekanizmalarına dair yeterli verinin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte hem mikroplastiklerin hem de ağır metallerin birlikte alımının insan sağlığına zarar verebileceği çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. Mikroplastik maruziyeti, organizmalarda iltihabi lezyonların oluşmasına, oksidatif stresin artmasına ve biyolojik sistemler genelinde toksik etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Vücutta bu sentetik partiküllerin temizlenmesindeki yetersizlik, uzun süreli kronik iltihaplanmalara ve hatta kanser riskinin artmasına yol açabilir (Zhao ve ark., 2022). Özellikle arsenik gibi toksik elementlerin mikroplastikler tarafından taşınması, bu metallerin biyoyararlanım düzeylerini değiştirebilir ve vücutta daha toksik etkilere neden olabilir (Prata ve ark., 2020). Arsenik ve mikroplastiklerin birlikte vücuda girmesi durumunda bu iki kirleticisi arasında sinerjistik, antagonistik veya pekiştirici etkiler gözlemlenebilmektedir (Bhagat ve ark., 2021).

Ağır metalleri adsorbe eden mikroplastikler insan vücuduna girdiklerinde yağ dokusunda birikebilir ve bu birikim kansere, üreme sorunlarına ve gelişimsel bozukluklara zemin hazırlayabilir. İnsan gastrik adenokarsinom (AGS) hücreleri üzerinde yapılan deneylerde, polistiren nanoplastiklerin arsenikle birlikte hücrelerde reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırdığı, DNA hasarına yol açtığı ve hücre ölümünü başlatan apoptotik yolları aktive ettiği gösterilmiştir (Lin ve ark., 2021). Ayrıca, bu nanoplastikler hücre zarının akışkanlığını bozarak sitoskeleton yapısını tahrip etmiş ve ATP bağlayıcı kaset (ABC) taşıyıcılarının aktivitesini inhibe ederek arsenik birikimini daha da artırmıştır (Lin ve ark., 2021).

İnsanlar bu kirleticilere yalnızca doğrudan çevresel maruziyetle değil, aynı zamanda tarımsal gıda zinciri yoluyla da maruz kalabilir. Bitkiler, topraktan mikroplastik ve ağır metallerle kirlenmiş tahılları, sebzeleri ve meyveleri bünyelerine alabilir ve bu kirleticiler daha sonra gıda yoluyla insan

vücuduna geçebilir (Jin ve ark., 2021). Özellikle arsenik gibi toksik elementlerin mikroplastikler tarafından adsorbe edilerek taşınması, bu elementlerin yağ dokusunda birikmesine ve kansere ya da üreme sistemi hastalıklarına neden olabilmektedir. Ayrıca, küçük boyutlu polistiren partiküllerinin, daha büyük boyutlu olanlara kıyasla ağır metal toksisitesini daha da artırdığı ve bu yolla arsenik toksisitesinin moleküler düzeyde ağırlaştığı gösterilmiştir(Wu ve ark., 2019).

Mevcut çalışmalar, yalnızca insan sağlığını değil, toprak ekosistemlerinin sağlığını da tehdit eden bu birleşik toksisiteyi vurgulamaktadır. Örneğin, polietilenin solucanlarda bakır (Cu) ve nikel (Ni) birikimini artırdığı ve bununla birlikte toprak enzim aktiviteleri ile gen ekspresyonunu olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Li ve ark., 2021). Tüm bu bulgular, mikroplastik ve ağır metallerin birlikte maruziyetinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin henüz tam anlamıyla anlaşılmadığını ve bu alanda daha derinlemesine araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Özellikle, mikroplastiklerin insan vücudunda ağır metallerin biyoyararlanımını ve toksik etkilerini artırıp artırmadığı sorusu, gelecekte ele alınması gereken öncelikli araştırma konuları arasında yer almaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikroplastik kirliliği, günümüzde küresel ölçekte giderek artan ve ciddi çevresel sonuçlara yol açan önemli bir tehdit olarak değerlendirilmektedir. Toprakta biriken mikroplastikler ile birlikte ağır metallerin varlığı, yalnızca tohum çimlenmesini ve fotosentetik aktiviteleri olumsuz yönde etkilemekle kalmayıp, aynı zamanda bitki büyümesini baskılamakta ve hücresel düzeyde oksidatif stresin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, bu kirleticiler toprak kalitesini bozmakta ve mikrobiyal toplulukların çeşitliliğini azaltarak toprak ekosistemlerinin genel dengesini tehdit etmektedir.

Bu kitap bölümünde, mikroplastiklerin ve ağır metallerin bitkiler üzerindeki etkileşimlerini ve bu etkileşimlerin çevresel sağlık açısından doğurabileceği olası sonuçları ortaya koyarak, literatüre yeni bir bakış açısı sunulmaktadır. Özellikle ağır metallerin mikroplastik yüzeylerine bağlanma mekanizmalarının ve adsorpsiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kapsamlı ve çok yönlü araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Her ne kadar mevcut veriler, bu etkileşimlerin rizosfer bölgesinde bitki gelişimini olumsuz

etkileyebileceğini göstermekteyse de bu etkilerin bitki metabolizması üzerindeki kesin sonuçlarını ortaya koymak adına daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Gelecekte yapılması gereken araştırmalar için bazı kritik odak alanları öne çıkmaktadır:

- Uzun vadeli alan çalışmaları oldukça önemlidir; çünkü günümüzdeki araştırmaların çoğu kontrollü laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Mikroplastiklerin doğal koşullardaki davranışını ve ağır metallerle olan etkileşimini değerlendirmek adına saha temelli, uzun dönemli çalışmalar gereklidir.
- Mikroplastikler ile ağır metaller arasında gerçekleşen bağlanma mekanizmalarının ve bu süreçleri yöneten adsorpsiyon dinamiklerinin netleştirilmesi, çevresel risklerin öngörülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.
- Bitkilere giriş yolları konusunda da bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Mikroplastiklerin ve ağır metallerin bitkilere yalnızca kök tüyleriyle mi alındığı yoksa farklı giriş yolları olup olmadığı henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Özellikle nanoplastiklerin ağır metalleri taşıma kapasitesi ve bunun bitki dokularında yaratabileceği biyolojik etkiler detaylı şekilde araştırılmalıdır.
- Yeni üretilen ve doğada giderek yaygınlaşan farklı mikroplastik türlerinin, bitkilerin ağır metal alımını nasıl etkilediği de hâlâ açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu nedenle, farklı MP tiplerinin toksisite ve taşıyıcılık özelliklerini ortaya koyan deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır.
- Fitoremediasyon stratejileri çerçevesinde, ağır metal kirliliğine karşı hiperakümülatör bitkilerin kullanımı önemli bir çözüm yolu sunabilir. Bu bitkilerin mikroplastiklerin varlığında da etkinliğini koruyup korumadığına dair çalışmalar artırılmalıdır.
- Bireysel ve toplumsal maruziyeti sınırlamak adına, mikroplastikler ve toksik metallerle ilgili etkili politikaların ve uluslararası standartların geliştirilmesi elzemdir. Mevcut düzenlemeler, bu karmaşık kirlilik türlerinin bütüncül bir şekilde yönetimi açısından yetersiz kalmaktadır.

Son olarak, bitkilerdeki desorpsiyon süreci, yani MP'lere adsorbe olmuş ağır metallerin bitki içinde tekrar serbest kalıp kalmadığı konusu yeterince araştırılmamıştır. Bu sürecin hem metal iyonlarının hem de mikroplastiklerin

bitki hücrelerinde geçirdiği morfolojik ve kimyasal dönüşümleri kapsayacak şekilde incelenmesi gerekmektedir. Belirtilen bu araştırma başlıkları, mikroplastiklerin ve ağır metallerin doğrudan ve dolaylı etkilerini daha kapsamlı biçimde anlamamıza olanak sağlayacak; aynı zamanda ekosistem sağlığını ve insan refahını korumaya yönelik çevresel risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Bethanis, J., Golia, E. E. (2023). Revealing the combined effects of microplastics, Zn, and Cd on soil properties and metal accumulation by leafy vegetables: a preliminary investigation by a laboratory experiment. *Soil Systems*, 7(3).
- Bhagat, J., Nishimura, N., Shimada, Y. (2021). Toxicological interactions of microplastics/nanoplastics and environmental contaminants: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 123913. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123913>
- Bhattacharya, P., Mukherjee, A. B. B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., Loeppert, R. H. (2007). *Arsenic in soil and groundwater environment: biogeochemical interactions, health effects and remediation* (Vol. 9). Elsevier.
- Cao, Y., Zhao, M., Ma, X., Song, Y., Zuo, S., Li, H., Deng, W. (2021). A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans. *Science of the Total Environment*, 788, 147620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147620>
- Chang, J., Liang, J., Fang, W., Zhang, H., Zhang, Y., Zhao, H., Zhang, R., Zhang, P., Zhang, G. (2023). Adsorption behaviors and bioavailability of tetrabromobisphenol A in the presence of polystyrene microplastic in soil: Effect of microplastics aging. *Environmental Pollution*, 334, 122156. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122156>
- Chang, X., Fang, Y., Wang, Y., Wang, F., Shang, L., Zhong, R. (2022). Microplastic pollution in soils, plants, and animals: A review of distributions, effects and potential mechanisms. *Science of the Total Environment*, 850, 157857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157857>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., Rillig, M. C. (2019). Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance.

- Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., Song, Z. (2020a). Adsorption of arsenite to polystyrene microplastics in the presence of humus [10.1039/D0EM00324G]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(12), 2388–2397. <https://doi.org/10.1039/D0EM00324G>
- Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., Song, Z. (2021). Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111899. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111899>
- Dong, Y., Gao, M., Song, Z., Qiu, W. (2020b). Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings. *Environmental Pollution*, 259, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113892>
- Erdem, H., Gence, C. Ç., Öztürk, M., Buhan, E., Kholikulov, S. T., Kaya, Y. (2025). Microplastics in soil increase cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(9), 575. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08222-5>
- Fang, Z., Wang, Z., Tang, H., Hursthouse, A. (2024). Comparison of hexavalent chromium adsorption behavior on conventional and biodegradable microplastics. *Water*, 16(14).
- Feng, X., Wang, Q., Sun, Y., Zhang, S., Wang, F. (2022). Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127364. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127364>
- Guo, X., Hu, G., Fan, X., Jia, H. (2020). Sorption properties of cadmium on microplastics: The common practice experiment and A two-dimensional correlation spectroscopic study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110118. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110118>
- Han, X., Wang, S., Yu, X., Vogt, R. D., Feng, J., Zhai, L., Ma, W., Zhu, L., Lu, X. (2021). Kinetics and size effects on adsorption of Cu(II), Cr(III), and Pb(II) onto polyethylene, polypropylene, and polyethylene terephthalate microplastic particles [Brief Research Report]. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.785146>
- Hu, M., Huang, L., Wang, Y., Tan, H., Yu, X. (2023). Insight into the effect of microplastics on the adsorption and degradation behavior of

- thiamethoxam in agricultural soils. *Chemosphere*, 337, 139262. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139262>
- Huang, W., Deng, J., Liang, J., Xia, X. (2023). Comparison of lead adsorption on the aged conventional microplastics, biodegradable microplastics and environmentally-relevant tire wear particles. *Chemical Engineering Journal*, 460, 141838. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141838>
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., Zhang, Y. (2021). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124187>
- Jin, M., Wang, X., Ren, T., Wang, J., Shan, J. (2021). Microplastics contamination in food and beverages: Direct exposure to humans. *Journal of Food Science*, 86(7), 2816–2837. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15802>
- Johansen, M. P., Prentice, E., Cresswell, T., Howell, N. (2018). Initial data on adsorption of Cs and Sr to the surfaces of microplastics with biofilm. *Journal of Environmental Radioactivity*, 190-191, 130–133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.001>
- Kajal, S., Thakur, S. (2024). Coexistence of microplastics and heavy metals in soil: Occurrence, transport, key interactions and effect on plants. *Environmental Research*, 262, 119960. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119960>
- Kalčíková, G., Skalar, T., Marolt, G., Jemec Kokalj, A. (2020). An environmental concentration of aged microplastics with adsorbed silver significantly affects aquatic organisms. *Water Research*, 175, 115644. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115644>
- Khan, M. A., Kumar, S., Wang, Q., Wang, M., Fahad, S., Nizamani, M. M., Chang, K., Khan, S., Huang, Q., Zhu, G. (2023). Influence of polyvinyl chloride microplastic on chromium uptake and toxicity in sweet potato. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 251, 114526. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114526>
- Kinigopoulou, V., Pashalidis, I., Kalderis, D., Anastopoulos, I. (2022). Microplastics as carriers of inorganic and organic contaminants in the

- environment: A review of recent progress. *Journal of Molecular Liquids*, 350, 118580. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118580>
- Lang, M., Yu, X., Liu, J., Xia, T., Wang, T., Jia, H., Guo, X. (2020). Fenton aging significantly affects the heavy metal adsorption capacity of polystyrene microplastics. *Science of the Total Environment*, 722, 137762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137762>
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J. G. M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., Zhang, Y. (2020). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 3(11), 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>
- Li, M., Jia, H., Gao, Q., Han, S., Yu, Y., Sun, L. (2023). Influence of aged and pristine polyethylene microplastics on bioavailability of three heavy metals in soil: Toxic effects to earthworms (*Eisenia fetida*). *Chemosphere*, 311, 136833. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136833>
- Li, M., Liu, Y., Xu, G., Wang, Y., Yu, Y. (2021). Impacts of polyethylene microplastics on bioavailability and toxicity of metals in soil. *Science of the Total Environment*, 760, 144037. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144037>
- Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., Zeng, E. Y. (2018). Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research*, 142, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>
- Li, Z., Li, R., Li, Q., Zhou, J., Wang, G. (2020). Physiological response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) leaves to polystyrene nanoplastics pollution. *Chemosphere*, 255, 127041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127041>
- Li, Z., Xu, J., Tang, C., Wu, J., Muhammad, A., Wang, H. (2006). Application of 16S rDNA-PCR amplification and DGGE fingerprinting for detection of shift in microbial community diversity in Cu-, Zn-, and Cd-contaminated paddy soils. *Chemosphere*, 62(8), 1374–1380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.07.050>
- Lian, J., Wu, J., Zeb, A., Zheng, S., Ma, T., Peng, F., Tang, J., Liu, W. (2020). Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat

- (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution*, 263, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lin, P., Guo, Y., He, L., Liao, X., Chen, X., He, L., Lu, Z., Qian, Z.-J., Zhou, C., Hong, P. (2021). Nanoplastics aggravate the toxicity of arsenic to AGS cells by disrupting ABC transporter and cytoskeleton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 227, 112885. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112885>
- Liu, S., Huang, J., He, W., Zhang, W., Yi, K., Zhang, C., Pang, H., Huang, D., Zha, J., Ye, C. (2023). Impact of microplastics on lead-contaminated riverine sediments: Based on the enzyme activities, DOM fractions, and bacterial community structure. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130763. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130763>
- Liu, Y., Wang, R., Bai, J., Jiao, T., Bai, Z., Zhang, L., Zhang, Q., Zhou, J., Peng, Q. (2019). Non-covalent self-assembly of multi-target polystyrene composite adsorbent with highly efficient Cu(II) ion removal capability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577, 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.06.036>
- Lu, Q., Zhou, Y., Sui, Q., Zhou, Y. (2023). Mechanism and characterization of microplastic aging process: A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 17(8), 100. <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1700-6>
- Mamathaxim, N., Song, W., Wang, Y., Habibul, N. (2023). Effects of microplastics on arsenic uptake and distribution in rice seedlings. *Science of the Total Environment*, 862, 160837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160837>
- Meng, Q., Diao, T., Yan, L., Sun, Y. (2023). Effects of single and combined contamination of microplastics and cadmium on soil organic carbon and microbial community structural: A comparison with different types of soil. *Applied Soil Ecology*, 183, 104763. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104763>
- Pang, X., Chen, C., Sun, J., Zhan, H., Xiao, Y., Cai, J., Yu, X., Liu, Y., Long, L., Yang, G. (2023). Effects of complex pollution by microplastics and heavy metals on soil physicochemical properties and microbial communities under alternate wetting and drying conditions. *Journal of*

- Hazardous Materials*, 458, 131989.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131989>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., Khalloufi, S. (2023). Adsorption of heavy metals: Mechanisms, kinetics, and applications of various adsorbents in wastewater remediation—A review. *Waste*, 1(3), 775–805.
- Rong, L., Zhao, L., Zhao, L., Cheng, Z., Yao, Y., Yuan, C., Wang, L., Sun, H. (2021). LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling. *Science of the Total Environment*, 773, 145640.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145640>
- Shah, T., Ali, A., Haider, G., Asad, M., Munsif, F. (2023). Microplastics alter soil enzyme activities and microbial community structure without negatively affecting plant growth in an agroecosystem. *Chemosphere*, 322, 138188. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138188>
- Shi, R., Liu, W., Lian, Y., Wang, X., Men, S., Zeb, A., Wang, Q., Wang, J., Li, J., Zheng, Z., Zhou, Q., Tang, J., Sun, Y., Wang, F., Xing, B. (2024). Toxicity mechanisms of nanoplastics on crop growth, interference of phyllosphere microbes, and evidence for foliar penetration and translocation. *Environmental Science & Technology*, 58(2), 1010–1021.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03649>
- Song, Z., Zhao, X., Dong, Y., Bai, L., Wang, S., Gao, M. (2023). Effects of polystyrene nanoplastics with different functional groups on the accumulation and toxicity of Pb on dandelion. *Chemosphere*, 310, 136874. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136874>
- van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., Geissen, V. (2020). Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261, 114198.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114198>
- Wang, F., Wang, Q., Adams, C. A., Sun, Y., Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127531.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>

- Wang, F., Wang, X., Song, N. (2021). Polyethylene microplastics increase cadmium uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by altering the soil microenvironment. *Science of the Total Environment*, 784, 147133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147133>
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., Adams, C. A., Sun, Y. (2020a). Effects of co-contamination of microplastics and Cd on plant growth and Cd accumulation. *Toxics*, 8(2).
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., Sun, Y. (2020b). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 254, 126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
- Wang, Z., Li, W., Li, W., Yang, W., Jing, S. (2023). Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures. *Chemosphere*, 317, 137762. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137762>
- Wu, B., Wu, X., Liu, S., Wang, Z., Chen, L. (2019). Size-dependent effects of polystyrene microplastics on cytotoxicity and efflux pump inhibition in human Caco-2 cells. *Chemosphere*, 221, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.056>
- Xu, C., Wang, H., Zhou, L., Yan, B. (2023). Phenotypic and transcriptomic shifts in roots and leaves of rice under the joint stress from microplastic and arsenic. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130770. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130770>
- Xu, G., Lin, X., Yu, Y. (2023). Different effects and mechanisms of polystyrene micro- and nano-plastics on the uptake of heavy metals (Cu, Zn, Pb and Cd) by lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environmental Pollution*, 316, 120656. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120656>
- Xu, Z., Zhang, Y., Lin, L., Wang, L., Sun, W., Liu, C., Yu, G., Yu, J., Lv, Y., Chen, J., Chen, X., Fu, L., Wang, Y. (2022). Toxic effects of microplastics in plants depend more by their surface functional groups than just accumulation contents. *Science of the Total Environment*, 833, 155097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155097>
- Yu, Z.-f., Song, S., Xu, X.-l., Ma, Q., Lu, Y. (2021). Sources, migration, accumulation and influence of microplastics in terrestrial plant

- communities. *Environmental and Experimental Botany*, 192, 104635. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104635>
- Zeb, A., Liu, W., Meng, L., Lian, J., Wang, Q., Lian, Y., Chen, C., Wu, J. (2022). Effects of polyester microfibers (PMFs) and cadmium on lettuce (*Lactuca sativa*) and the rhizospheric microbial communities: A study involving physio-biochemical properties and metabolomic profiles. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127405. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127405>
- Zhang, M., Zhang, Y., Wang, W., Cui, W., Wang, L., Sun, H., Liu, C. (2022). Combined effects of microplastics and other contaminants on earthworms: A critical review. *Applied Soil Ecology*, 180, 104626. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104626>
- Zhang, Q., Guo, W., Wang, B., Feng, Y., Han, L., Zhang, C., Xie, H., Liu, X., Feng, Y. (2023). Influences of microplastics types and size on soil properties and cadmium adsorption in paddy soil after one rice season. *Resources, Environment and Sustainability*, 11, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100102>
- Zhang, S., Han, B., Sun, Y., Wang, F. (2020). Microplastics influence the adsorption and desorption characteristics of Cd in an agricultural soil. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121775. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121775>
- Zhao, S., Zhang, Z., Chen, L., Cui, Q., Cui, Y., Song, D., Fang, L. (2022). Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil. *Applied Soil Ecology*, 176, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104486>
- Zhao, T., Lozano, Y. M., Rillig, M. C. (2021). Microplastics increase soil ph and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time [Original Research]. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.675803>
- Zhou, Y., He, G., Jiang, H., Pan, K., Liu, W. (2023). Nanoplastics induces oxidative stress and triggers lysosome-associated immune-defensive cell death in the earthworm *Eisenia fetida*. *Environment International*, 174, 107899. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107899>

- Zhou, Y., Liu, X., Wang, J. (2020). Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122273. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122273>
- Zhou, Z., Hua, J., Xue, J. (2023). Polyethylene microplastic and soil nitrogen dynamics: Unraveling the links between functional genes, microbial communities, and transformation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131857. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131857>
- Ziani, K., Ioniță-Mîndrican, C.-B., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C., Moroșan, E., Drăgănescu, D., Preda, O.-T. (2023). Microplastics: A real global threat for environment and food safety: A state of the art review. *Nutrients*, 15(3).
- Zong, X., Zhang, J., Zhu, J., Zhang, L., Jiang, L., Yin, Y., Guo, H. (2021). Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112217>

BÖLÜM 9

TARIM VE ÇEVRE ARASINDA GÖRÜNMEZ TEHDİTLER: MİKROPLASTİKLER İLE PESTİSİTLER

Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048754>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Tokat, Türkiye, ayse.yesilayer@gop.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6654-5834

GİRİŞ

Plastiklerin endüstriyel üretimi 20. yüzyılın ortalarında büyük bir ivme kazanmış ve o zamandan bu yana küresel ekonomiyi doğrudan etkileyerek birçok sanayi dalında yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Düşük maliyetleri, yüksek dayanıklılıkları ve çok yönlü kullanım alanları sayesinde plastikler, özellikle ambalaj sektöründe yoğun talep görmektedir. Örneğin, Avrupa'da 2020 yılında plastik talebi yaklaşık 49.1 milyon ton olarak gerçekleşmiş; bu talebin %40'ı ambalaj sektörüne aitken, Almanya (%23.3) ve İtalya (%14.1) başı çekmiştir. Küresel üretim ise 2018'de 359 milyon tondan 2020'de 369 milyon tona yükselmiş; üretimin %49'u Asya'da, %32'si ise Çin'de gerçekleşmiştir (Ritter, 2022; Plastic Europe, 2021).

Ancak plastiklerin yaygın kullanımı, çevresel açıdan ciddi sorunları da beraberinde getirmiştir. 1950'lerde yalnızca 2 milyon ton olan plastik üretimi, 2019 itibarıyla 460 milyon tona ulaşmış ve bu artış, çevre kirliliğini derinleştirmiştir (Law ve Arayan, 2022, Mitrano ve Wohlleben, 2020). Özellikle mikroplastiklerin oluşumu, ekosistemlerde uzun süreli birikimlere yol açarak endişe verici boyutlara ulaşmıştır. Mikroplastikler; kanalizasyonla sulama, plastik örtülerin bozulması, atmosferik taşınım ve doğrudan çöp bırakımı gibi yollarla toprağa karışmaktadır. Çin'deki tarım arazilerinde yapılan araştırmalar, toprakta kilogram başına yaklaşık 4537 mikroplastik parçacığı bulunduğunu ortaya koymuştur (Ret ve ark., 2024)

Topraktaki mikroplastikler, fizikokimyasal özellikleri değiştirerek toprak yapısını ve su tutma kapasitesini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, bazı mikroorganizmaların seçici olarak çoğalmasına neden olarak mikrobiyal çeşitliliği ve topluluk yapısını değiştirebilir. Mikroplastikler yalnızca mikroorganizmaları değil, aynı zamanda toprak faunasını da etkileyerek histopatolojik hasar, oksidatif stres ve DNA bozulmalarına yol açabilir; bu da ekolojik işlevlerin bozulmasına neden olur. Çevre dostu alternatif olarak önerilen biyobozunur plastikler ise, geleneksel plastiklere kıyasla daha hızlı şekilde ikincil mikroplastiklere dönüşebildiğinden, toprak ekosistemlerindeki kirliliği daha da artırma potansiyeline sahiptir (de Souza Machado, 2019; Khalid, 2023; Chen ve ark., 2024).

Bu çalışmada mikroplastik ve pestisit ilişkisi hakkında bilgi verilecektir.

1. MİKROPLASTİK

Mikroplastikler, çapı 5 milimetreden küçük olan, şekilli ya da şekilsiz, bir mercimek tanesinden daha küçük suda çözünmeyen sentetik polimer parçacıklarıdır. Genellikle büyük plastiklerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçlerle parçalanması sonucu oluşurlar; ancak bazıları doğrudan bu boyutta üretilerek temizlik ürünleri, kozmetik ve sanayi uygulamalarında kullanılır. Mikroplastiklerin çevredeki yaygınlığı, özellikle denizler, akarsular, toprak ve atmosferdeki varlıkları, ciddi sağlık ve ekosistem endişelerine yol açmaktadır. Bu parçacıklar, besin zincirinin en altındaki organizmalar tarafından kolaylıkla yutulabilir ve böylece tüm ekosisteme yayılabilir (Tübitak Bilim Genç, 2025). Ayrıca mikroplastikler, ağır metaller ve toksik kimyasallar gibi zararlı maddelerin taşıyıcısı olarak da işlev görebilir.

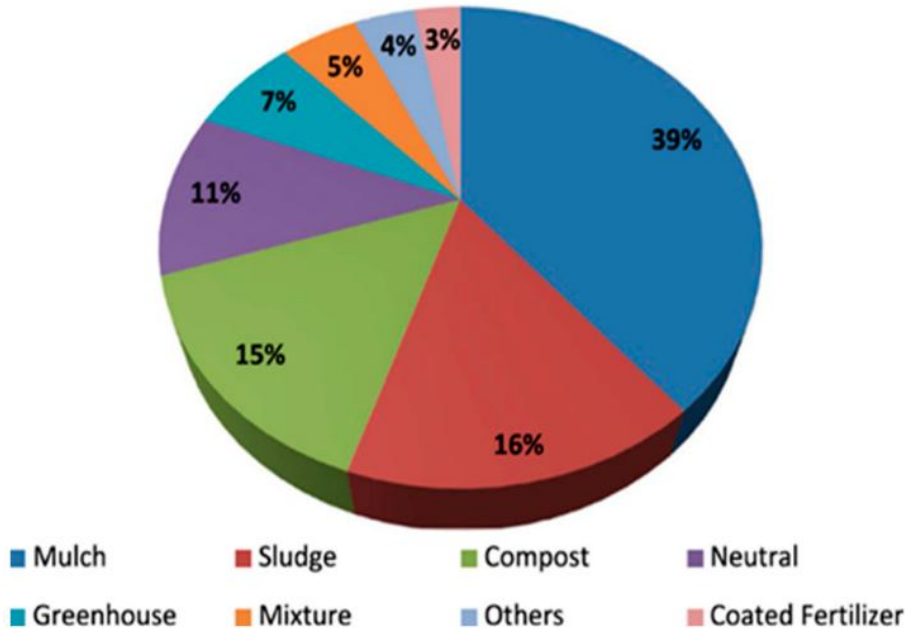
İnsanlar mikroplastiklere;

ağız yoluyla,

solunumla veya

deri temasıyla maruz kalabilir; ancak bu maruziyetin sağlık üzerindeki etkileri hâlâ tam olarak anlaşılmamıştır (Kosior ve Crescenzi, 2020).

2021 yılı itibarıyla, ambalajlama ile yapı ve inşaat sektörleri, küresel plastik tüketiminin en büyük iki alanını oluşturmuştur. Tahmini toplam plastik üretiminin 390,7 milyon ton olduğu bu yılda, ambalaj sektörü %44'lük pay ile en yüksek plastik kullanımına sahip alan olarak öne çıkarken, yapı ve inşaat sektörü %18 ile ikinci sırada yer almıştır. Otomotiv endüstrisi %8, elektrik ve elektronik ürünler (ev, eğlence ve spor gibi kullanım alanları dâhil) %7, tarım, hayvancılık ve bahçecilik uygulamaları ise %4'lük bir paya sahiptir. Geriye kalan %12'lik oran ise diğer kullanım alanlarına dağılmaktadır (Sa'adu ve Farsang, 2023; Masciarelli, 2024), (Şekil 1).



Şekil 1. Tarım topraklarındaki microplastik kaynakları (Masciarelli, 2024).

Mikroplastiklerin çevredeki kalıcılığı ve biyolojik olarak kolayca parçalanmaması, onları uzun vadeli bir kirlilik kaynağı haline getirmektedir. Tarımda zararlı böcekler, hastalıklar ve yabancı otlarla mücadelede pestisitler hayati bir rol oynar. Ancak bu kimyasalların yoğun kullanımı, zamanla toprakta, suda ve canlı organizmalarda yaygın biçimde birikmelerine neden olmaktadır. Çevrede kalan pestisit kalıntıları, hedef dışı canlılar, ekosistem dengesi ve insan sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturur. Pestisitlerin çevrede kalıcılığı; kimyasal yapıları, çevresel koşullar ve diğer maddelerle olan etkileşimlerine bağlı olarak uzun süre devam edebilir.

Son dönem çalışmalar, mikroplastiklerin pestisitlerle etkileşime girerek bu kimyasalların çevresel davranışlarını önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymuştur. Tang (2025) tarafından yürütülen araştırmada, mikroplastiklerin pestisit molekülleriyle adsorpsiyon yoluyla bağlandığı ve bu etkileşimin pestisitlerin çevresel kalıcılığı, biyoyararlanımı ve toksisite düzeyleri üzerinde belirgin etkiler yarattığı gösterilmiştir. Bu bağlanma, pestisitlerin hedef organizmalar üzerindeki biyolojik etkinliğini azaltmakta veya değiştirmekte; aynı zamanda bu bileşiklerin toprakta, yeraltı sularında ve tarımsal ürünlerde daha uzun süre kalmasına neden olmaktadır. Yu ve ark., (2022) gibi çalışmalar,

mikroplastiklerin pestisitlerin bitkiler, mikroorganizmalar ve toprak faunası tarafından alınımı kolaylaştırarak, ekosistem düzeyinde potansiyel riskleri artırdığını vurgulamaktadır. Bu durum, faydalı organizmalar (örneğin *Lumbricus terrestris* gibi toprak solucanları) üzerinde dolaylı toksik etkiler oluşturabileceği gibi, gıda güvenliği açısından da yeni tehditler doğurmaktadır.

2. MİKROPLASTİKLERİN ZİRAİ İLAÇLARIN BİYUYARARLANIMI VE KALICILIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Zirai uygulamalar sonrasında, mikroplastiklerin, pestisitlerin çevresel davranışlarını önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuştur. Özellikle mikroplastiklerin pestisit molekülleriyle adsorpsiyon yoluyla etkileşime girmesi, bu kimyasalların hedef organizmalar tarafından alınabilirliğini, yani biyoyararlanımını azaltmaktadır. Bu durum, pestisitlerin hem zararlı organizmalar hem de bitkiler tarafından daha zor emilmesine neden olmakta; dolayısıyla çiftçilerin aynı etkiyi elde edebilmek için daha fazla kimyasal uygulaması gerekebilmektedir (Tang, 2025).

Bu etkileşim, çevresel ve ekonomik açıdan riskli bir döngü yaratmaktadır: Azalan etkinlik, artan kullanım ihtiyacını doğurmakta; bu da hem üretim maliyetlerini yükseltmekte hem de toprak ve su kaynaklarında kimyasal birikimini artırarak ekosistem sağlığını tehdit etmektedir. Örneğin, mikroplastiklerin varlığı, yaygın bir herbisit olan atrazinin toprakta etkisini göstermeden önce parçalanmasına neden olmuş; yaşlanmış mikroplastiklerin ise yeni mikroplastiklere kıyasla daha fazla pestisit adsorbe ettiği ve bu nedenle pestisit etkinliğini zamanla daha da azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikroplastik ve pestisit kombinasyonunun marul gibi bazı tarım ürünlerinde tohum çimlenmesini olumsuz etkilediği; toprak solucanları gibi faydalı organizmalarda ise stres ve doku hasarı belirtilerine yol açtığı rapor edilmiştir. Mikroplastikler yalnızca pestisitlerin biyoyararlanımını değil, aynı zamanda çevresel kalıcılığını da etkilemektedir. Normal koşullarda pestisitler belirli bir süre içinde parçalanarak etkilerini yitirir; bu süre “yarı ömür” olarak tanımlanır. Ancak mikroplastiklerin varlığı, bu parçalanma sürecini önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Örneğin, bazı herbisitlerin su ortamındaki bozunma süresi 231 günden 800 günün üzerine çıkmıştır. Benzer şekilde, bazı fungusit ve insektisitlerin yarı ömrü %30–50 oranında uzamış; klorpirifos gibi kimyasallar

ise mikroplastiklerle birlikte çok daha yavaş parçalanarak hedef dışı organizmalar için toksik riskleri artırmıştır. Bu kalıcılık, pestisitlerin yeraltı sularına sızma, sucul yaşamı tehdit etme ve ekosistemleri uzun vadede bozma potansiyelini artırmaktadır. Dolayısıyla mikroplastiklerin tarımsal kimyasallarla olan etkileşimi, hem gıda güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkatle ele alınması gereken kritik bir konudur (Qui ve ark., 2024; Tang, 2025).

Bu etkileşimleri incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Li ve arkadaşları, 2021; imidakloprid, buprofezin ve difenokonazol gibi pestisitlerin polietilen (PE) mikroplastikler üzerindeki adsorpsiyonunu, reaksiyon süresi, mikroplastik miktarı, pH ve tuzluluk (NaCl) gibi değişkenler üzerinden değerlendirmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, yüksek pH ve düşük tuzluluk adsorpsiyonu artırmakta; adsorpsiyon kapasitesi açısından sıralama difenokonazol > buprofezin > imidakloprid şeklinde gerçekleşmiştir. Özellikle pH değeri 6–10 arasında olduğunda, buprofezin ve difenokonazol moleküler yapıdan iyonik forma geçerek adsorpsiyona daha yatkın hale gelmektedir.

Wang ve ark., 2020, ise, neonicotinoid grubundan thiacloprid adlı pestisit farklı mikroplastik türleri üzerindeki adsorpsiyonunu karşılaştırmıştır. Çalışmalarında, poliamid 6 (PA6) mikroplastiklerinin maksimum adsorpsiyon kapasitesi 96.49 µg/g olarak ölçülürken, polibütilen adipat tereftalat (PBAT) için bu değer 88.78 µg/g olmuştur. Ayrıca mikroplastiklerin yaşlanması, yüzey alanının artması ve temas açısının azalması nedeniyle thiacloprid adsorpsiyonunu %5.53 ile %15.8 arasında artırmıştır.

Yapılan araştırmalarda gerçekleştirilen mikroplastik izleme çalışmaları, mikroplastiklerin (MP'ler) hem denizel hem de tatlı su kaynaklarında küresel ölçekte yaygın olarak bulunduğunu ortaya koymuştur (Yusuf ve ark., 2022), hatta bu kirlilik ile ilgili çalışmalar dağ göllerine kadar uzanmaktadır (Godoy ve ark., 2022). Her ne kadar plastiklerin karasal ortamlardaki varlığı daha önce sınırlı sayıda çalışmada ele alınmış olsa da, 2018 yılı itibarıyla yayımlanan çeşitli makaleler ve derleme çalışmaları, tarım topraklarında plastik kirliliğine dikkat çekmiş ve bu alandaki bilimsel yayınlar hızla artış göstermiştir (Chae ve An, 2018; Liu ve ark., 2018; Piehl ve ark, 2018). Bununla birlikte, toprakta mikroplastik kirliliğinin gerçek düzeyinin belirlenmesinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, güvenilir ve sağlam ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesidir. Bu

gereksinim, mikroplastiklere yönelik artan bilimsel ilgiyle birleşerek, mevcut zahmetli protokolleri sadeleştirmeyi ve standartlaştırmayı amaçlayan yeni analitik teknolojilerin geliştirilmesini teşvik etmiştir (Li ve ark., 2020; Picó ve Barceló, 2021).

3. MİKROPLASTİK MARUZİYETİNİ AZALTMANIN YOLLARI

Bu kadar zararlı olan mikroplastik (MP)'lerin tamamen ortadan kaldırılmasa bile insan sağlığı ve çevre için;

- Tek kullanımlık plastik ürünlerin yerine kalıcı çözümler tercih edilmelidir. Örneğin, alışverişlerde plastik torba kullanmak yerine bez çantalar veya sırt çantaları tercih edilerek plastik atık üretimi azaltılabilir.
- Plastik pipetlerin yerine tekrar kullanılabilir alternatifler seçilmelidir. Metal, cam veya bambu pipetler hem çevre dostudur hem de uzun vadede daha ekonomiktir.
- Pet şişe kullanımını azaltmak için yeniden doldurulabilir su kapları kullanılabilir. Cam şişeler veya paslanmaz çelik mataralar, hem sağlıklı hem de sürdürülebilir bir seçenektir.
- Evde su arıtma sistemleri kullanılarak şişelenmiş suya olan bağımlılık sona erdirilebilir. Bu sayede hem plastik ambalaj atığı azaltılır hem de içme suyu kalitesi kontrol altına alınır.
- Sentetik içerikli giysiler yerine doğal liflerden üretilmiş tekstil ürünleri tercih edilmelidir. Pamuk, keten veya bambu gibi malzemeler mikroplastik salınımını önler.
- Çamaşır makinelerinde mikrofiber salınımını azaltmak için özel filtreleme ürünleri kullanılabilir. Örneğin, çamaşır topları veya filtre torbaları bu lifleri yakalayarak suya karışmasını engeller.
- Kurutma makineleri yerine doğal kurutma yöntemleri tercih edilmelidir. Çünkü kurutma makineleri, çamaşır makinelerine kıyasla çok daha fazla mikroelyaf salınımına neden olur.
- Bireysel araç kullanımı azaltılarak toplu taşıma ve demiryolu sistemleri desteklenmelidir. Zira araç lastikleri, mikroplastik kirliliğinin en büyük kaynaklarından biridir.
- Deniz ürünleri tüketimi sınırlandırılabilir. Çünkü birçok deniz canlısı mikroplastikleri yutarak bu parçacıkları besin zincirine taşır.

- Kozmetik ürünlerdeki içerik etiketleri dikkatle incelenmeli ve plastik türevleri içeren ürünlerden kaçınılmalıdır. Polietilen (PE), polipropilen (PP), PET, PMMA ve naylon gibi maddeler mikroplastik kaynaklarıdır.
- Plastik kapların mikrodalga fırında kullanımı sınırlandırılmalıdır. “Mikrodalgaya uygun” ibaresi, kimyasal salınımı engellemez; bu nedenle cam veya seramik kaplar tercih edilmelidir.
- Ev içi temizlik düzenli yapılmalı, özellikle toz alma ve süpürme işlemleri haftalık olarak gerçekleştirilmelidir. Çünkü ev tozlarının önemli bir kısmı mikroplastik içerir.
- Kişisel çabaların yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik politikalarına destek verilmelidir.

Sonuç olarak unutmayalım ki Toplumsal farkındalık ve yasal düzenlemeler, mikroplastik kirliliğiyle mücadelede kritik rol oynar.

KAYNAKÇA

- Chae, Y. ve An, Y. J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental pollution*, 240, 387-395.
- Chen, L., Qiu, T., Huang, F., Zeng, Y., Cui, Y., Chen, J. ve Fang, L. (2024). Micro/nanoplastics pollution poses a potential threat to soil health. *Global Change Biology*, 30(8), e17470.
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., ve Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental science ve technology*, 53(10), 6044-6052.
- Godoy, V., Calero, M., González-Olalla, J. M., Martín-Lara, M. A., Olea, N., Ruiz-Gutierrez, A. ve Villar-Argaiz, M. (2022). The human connection: First evidence of microplastics in remote high mountain lakes of Sierra Nevada, Spain. *Environmental Pollution*, 311, 119922.
- Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A. ve Rizvi, Z. F. (2023). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130455.
- Kosior, E. ve Crescenzi, I. (2020). Solutions to the plastic waste problem on land and in the oceans. In *Plastic waste and recycling* (pp. 415-446). Academic Press.
- Law, K. L. ve Narayan, R. (2022). Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 104-116.
- Li, J., Song, Y. ve Cai, Y. (2020). Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, 257, 113570.
- Li, H., Wang, F., Li, J., Deng, S. ve Zhang, S. (2021). Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: Kinetics, isotherms, thermodynamics, and molecular dynamics simulation. *Chemosphere*, 264, 128556.
- Liu MengTing, L. M., Lu ShiBo, L. S., Song Yang, S. Y., Lei LiLi, L. L., Hu JiaNi, H. J., Lv WeiWei, L. W. ve He DeFu, H. D. (2018). Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China.

- Masciarelli, E., Casorri, L., Di Luigi, M., Beni, C., Valentini, M., Costantini, E. ve Reale, M. (2024). Microplastics in agricultural crops and their possible impact on farmers' health: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(1), 45.
- Mitrano, D. M. ve Wohlleben, W. (2020). Microplastic regulation should be more precise to incentivize both innovation and environmental safety. *Nature communications*, 11(1), 5324.
- Picó, Y. ve Barceló, D. (2021). Analysis of microplastics and nanoplastics: How green are the methodologies used?. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31, 100503.
- Plastics Europe. Plastics–The Facts. 2021. Available online: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (accessed on 09.09.25).
- Qiu, S., Shen, H., Song, J., Fang, H., Yu, Y. ve Zhang, L. (2024). Different effects of polyethylene microplastics on bioaccumulation of three fungicides in maize (*Zea mays* L.). *Crop Health*, 2(1), 7.
- Ren, S., Wang, K., Zhang, J., Li, J., Zhang, H., Qi, R. ve Chadwick, D. R. (2024). Potential sources and occurrence of macro-plastics and microplastics pollution in farmland soils: A typical case of China. *Critical reviews in environmental science and technology*, 54(7), 533-556.
- Ritter, H. (2022). Kunststoffe für die Menschen: Nutzen und Nachteile. *Chem. Unserer Zeit*, 56, 147.
- Sa'adu, I. ve Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 13.
- Tang, K. H. D. (2025). Effects of microplastics on bioavailability, persistence and toxicity of plant pesticides: An agricultural perspective. *Agriculture*, 15(4), 356.
- Tübitak Bilim Genç (2025). Mikroplastikler Sağlığımızı Nasıl Etkiliyor? Mikroplastikler hakkında her şey | TÜBİTAK Bilim Genç. (Erişim tarihi: 09.09.25).
- Wang, T., Yu, C., Chu, Q., Wang, F., Lan, T. ve Wang, J. (2020). Adsorption behavior and mechanism of five pesticides on microplastics from agricultural polyethylene films. *Chemosphere*, 244, 125491.

- Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. ve Zhang, Z. (2022). Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: effects on ecosystems and human health. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 855292.
- Yusuf, A., Sodiq, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., Eniola, J. O.ve Bilad, M. R. (2022). Updated review on microplastics in water, their occurrence, detection, measurement, environmental pollution, and the need for regulatory standards. *Environmental Pollution*, 292, 118421.

BÖLÜM 10

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI

Prof. Dr. Arda YILDIRIM¹

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048872>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID:0000-0002-5876-4228, E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Hayvan Yetiştirme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-4338-1758, E-posta: ekrem.buhan@gop.edu.tr

GİRİŞ

Plastik malzemelerin üretimi ve kullanımı son on yıllarda çok büyük ölçüde artmıştır. Atıkların doğru şekilde toplanmaması veya yönetilmemesi ise çevrede 5 mm'den küçük plastik parçacıkların yani başka bir adıyla mikroplastiklerin (MP; yaklaşık 1 µm–5 mm) kalıcı olarak birikmesine neden olmuştur (Jambeck ve ark., 2015; Wright ve Kelly, 2017; Geyer ve ark., 2017; Liu ve ark., 2022). Mikroplastikler; atmosfer, sucul ve karasal habitatlar başta olmak üzere hemen her ekosistemde saptanmakta ve gıda zincirine kadar taşınabilmektedir (Wright ve Kelly, 2017; Khalid ve ark., 2023). Nitekim deniz ürünleri (Smith ve ark., 2018), sofraya tuzu (Kosuth ve ark., 2018; Peixoto ve ark., 2019), bal (Liebezeit ve Liebezeit, 2013), bira (Kosuth ve ark., 2018), çay poşetleri (Hernandez ve ark., 2019), süt (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020), tavuk eti (Kedzierski ve ark., 2020) ile yumurtası (Liu ve ark., 2022) ve kırmızı et (van der Veen ve ark., 2022) gibi pek çok gıdada mikroplastik varlığı rapor edilmiştir.

Başlangıçta mikroplastik araştırmaları esas olarak sucul sistemler ve yenilebilir su ürünleri üzerinde yoğunlaşmışken, son bulgular karasal gıda hayvanlarında da maruziyetin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Avrupa Birliği Ortak Araştırma Merkezi'nin kapsamlı derlemesine göre, 201 yenilebilir hayvan türü arasında mikroplastik kontaminasyonu bildirilmiş; bunların 164'ü deniz balığı, 23'ü yumuşakça, 7'si kabuklu, 2'si kuş, 2'si tatlı su balığı, 2'si kaplumbağa ve yalnızca 1'i tavuk olmak üzere sınırlı sayıda karasal türü kapsamaktadır (Toussaint ve ark., 2019). Bu durum, çiftlik hayvanları ve onlardan elde edilen ürünlerde mikroplastiklerin izlenmesi ve risk değerlendirilmesi gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Hayvansal ürünlerde mikroplastik kontaminasyonu; kırmızı ve beyaz et, süt, yumurta ve işlenmiş türevlerinde de rapor edilmiştir. Mevcut çalışmalar, bu parçacıkların bir bölümünün hayvanların çevresel maruziyeti (yem, içme suyu, atmosferik çökelim, barınak tozu vb.) aracılığıyla dokulara ve vücut sıvılarına kadar ulaşabildiğini ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2022). Ayrıca bazı bulgular, mikroplastiklerin sağım, hasat sonrası işleme süreçleri veya ambalajlama sırasında gıdaya bulaşabileceğini göstermektedir (Habib ve ark., 2022; Zimmermann ve ark., 2025). Bu nedenle hem çiftlik düzeyinde (yem, su ve çevresel kaynaklar) hem de hasat-sonrası üretim zincirinde (işleme, ekipman, ambalaj malzemeleri) potansiyel bulaşma

noktalarının tanımlanması, etkili bir gıda güvenliği yönetimi için kritik önem taşımaktadır. Mikroplastiklerin biyolojik etkilerine yönelik kanıtlar giderek artmaktadır. Kara ve su kuşları, balıklar ve memeliler üzerinde yürütülen deneysel ve gözlemsel çalışmalar, mikroplastik maruziyetinin inflamasyon, oksidatif stres, bağırsak bariyer bütünlüğünde bozulma ve bağışıklık yanıtlarında değişiklikler gibi olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermektedir (Liang ve ark., 2021; Hu ve ark., 2022; Toto ve ark., 2022). Öte yandan fare modellerindeki araştırmalar, polietilen mikroplastik maruziyetinin (polietilen mikroplastiklerin (PE-MP; 4–6 µm) 3.75 veya 15 mg/kg dozda 5 hafta boyunca ağızdan verilmesi bağırsak bariyer bütünlüğünde bozulma ve inflamasyonu tetiklediğini ortaya koymuştur (El Gazzar ve ark., 2023). Ayrıca polistiren bazlı mikro/nanoplastikler, fare bağırsaklarında oksidatif stres, mikrobiyota dengesizliği ve epitel bariyer bozulmasına yol açabilmektedir (Djouina ve ark., 2024). Mikroplastiklerin yüzeyinde pestisitler, PCB ve DDT türevleri gibi kalıcı organik kirleticiler, poliaromatik hidrokarbonlar ve ağır metallerin adsorbe olabildiği; bu kirleticilerin mikroplastiklerle birlikte canlıların sindirim sistemi üzerinden taşınarak ikincil toksik etkilere neden olabileceği bildirilmektedir (Campanale ve ark., 2020; Wu ve ark., 2021; Adeleye ve ark., 2024). Bu durum, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel partikül etkileriyle değil, aynı zamanda taşıdıkları kirleticilerle de çiftlik hayvanlarının sağlığını ve hayvansal ürünlerin güvenliğini tehdit ettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, tarımsal sistemlerde toprağa karışan mikroplastiklerin, bitkilerin ağır metal alımını artırarak büyüme ve gelişim üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği kanıtlanmıştır (Kumar ve ark., 2022; Erdem ve ark., 2025). Bu çok boyutlu tablo, mikroplastik kirliliğinin yalnızca çevresel bir sorun değil, ‘Tek Sağlık’ yaklaşımı içinde çevre–hayvan–insan üçgeninde birlikte ele alınması gereken sürekli bir risk alanı olduğunu göstermektedir (Corte Pause ve ark., 2024).

Bu bölümde, mikroplastiklerin sınıflandırılması ve çevresel kaynaklarından başlayarak, çiftlik hayvanlarının yem, su, hava ve tarımsal plastikler üzerinden maruz kalabileceği çoklu giriş yolları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır. Ardından, mikroplastiklerin hayvan vücudundaki davranışları—bağırsaklardaki transit süreç, sınırlı biyoyararlanım, olası doku birikimi ve dışkıyla atılım dinamikleri, mevcut deneysel ve saha bulguları ışığında değerlendirilecektir. Et, süt ve yumurta gibi temel hayvansal ürünlerde

bildirilen mikroplastik varlığı hem biyolojik geçiş hem de proses/ambalaj kaynaklı kontaminasyon açısından tartışılacak; farklı türlerde gözlenen fizyolojik yanıtlar, bağırsak bariyeri değişimleri, oksidatif stres, mikrobiyota bozulmaları ve performans etkileri gibi hayvan sağlığına ilişkin sonuçlar bütüncül bir çerçevede incelenecektir. Son olarak, yem tedarik zinciri, su altyapısı, barınak havası ve plastik ekipman kullanımı gibi kritik noktalar temelinde mevcut bilgi boşlukları ortaya konacak; maruziyetin azaltılmasına yönelik izleme, kontrol ve yönetim stratejileri hayvan besleme biliminin bakış açısıyla değerlendirilecektir.

1. MİKROPLASTİKLERİN TANIMI, SINIFLANDIRILMASI VE BAŞLICA ÇEVRESEL KAYNAKLARI

Mikroplastikler (MP), genel kabul gören tanıma göre çevrede 5 mm'den küçük boyutta bulunan sentetik polimer parçacıklarıdır (Wright ve Kelly, 2017; Rbaibi Zipak ve ark., 2022). Literatürde farklı sınıflandırmalar bulunmakta olup, bazı yaklaşımlar 1 µm–5 mm aralığını mikroplastik boyutu olarak belirtirken (Liu ve ark., 2022), bazıları 2 mm altını esas almaktadır (Hartmann ve ark., 2019; Khalid ve ark., 2023). Mikroplastikler, üretim aşamasında doğrudan mikro boyutta üretilen birincil mikroplastikler (kozmetiklerde kullanılan mikroboncuklar veya endüstride pelet/nurdle formundaki parçacıklar) ve daha büyük plastik materyallerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik ayrışması sonucunda ortaya çıkan ikincil mikroplastikler olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir (Khalid ve ark., 2023; Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Rbaibi Zipak ve ark., 2022). Bunun yanında, <1 µm boyutundaki nanoplastikler ayrı bir araştırma alanı olarak öne çıkmakta ve özellikle biyolojik emilim ve toksisite açısından önem kazanmaktadır. Mikroplastiklerin tanımı boyut kriterlerine dayandırılmakta olup, makroplastik–mikroplastik–nanoplastik ayrımı Şekil 1'de özetlenmiştir. Ayrıca, mikroplastikler yalnızca boyutlarına göre değil, morfolojik özelliklerine göre de sınıflandırılmakta ve bu gruplar Tablo 1'de sunulmuştur.

Çevresel örneklerde en yaygın saptanan polimerler polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) olup, parçacıklar çoğunlukla fiber (lif), fragman, film, köpük ve pelet gibi farklı morfolojik formlarda görülmektedir (Wu ve ark., 2021;

Shufol ve ark., 2025). Mikroplastiklerin boyutu, yoğunluğu ve şekli; çevrede hava, su ve toprak arasında taşınabilirliğini, askıda kalma süresini ve çökme davranışını belirleyen temel faktörlerdir (Wu ve ark., 2021).

Plastik Parçacık Boyut Sınıflandırması



Şekil 1. Plastik parçalarının boyutlarına göre sınıflandırılması.

Yanlış yönetilen plastik atıklar, mikroplastik yükünün en önemli kaynağıdır. Tek kullanımlık ambalajlar, plastik poşetler ve diğer makroplastikler, güneş ışığı (UV), sıcaklık değişimleri, dalga ve mekanik aşınma ile oksidatif süreçlerin etkisiyle zamanla mikro boyutlara parçalanmaktadır (Khalid ve ark., 2023). Sentetik tekstillerden (polyester, naylon, akrilik) çamaşır yıkama sırasında salınan mikroliflerin büyük bölümü atık su sistemine karışmakta; arıtma tesislerinde tutulan kısım ise arıtma çamurlarıyla birlikte tarımsal alanlara taşınarak karasal ekosistemlerde birikmektedir (Hooge ve ark., 2023; Ramage ve ark., 2025). Bu durum tarım topraklarında mikroplastik birikimini önemli ölçüde artırmakta olup, yalnızca Kuzey Amerika ve Avrupa'da yıllık >700 bin ton düzeyinde bir giriş rapor edilmiştir (Nizzetto ve ark., 2016).

Tablo 1. Morfolojiye dayalı mikroplastik sınıflandırması.

Kısaltma	Tür	Boyut	Tanım
PT	Pastil/Pelet	< 5 mm – 1 mm	Çapı 5 mm'den küçük ile 1 mm arasında olan küçük, küresel plastik parça.
MBD	Mikroküre	< 1 mm – 1 µm	Çapı 1 mm'den küçük ile 1 µm arasında olan küçük, küresel plastik parça.
FR	Parça (Fragment)	< 5 mm – 1 mm	En uzun boyutunda 5 mm'den küçük ile 1 mm arasında olan, düzensiz şekilli plastik parça.
MFR	Mikro-parça	< 1 mm – 1 µm	En büyük boyutu 1 mm'den küçük ile 1 µm arasında olan, düzensiz şekilli plastik parça.
FB	Lif/Fiber	< 5 mm – 1 mm	En uzun boyutu 5 mm'den küçük ile 1 mm arasında olan, tel/filament biçimli plastik.
MFB	Mikrolif	< 1 mm – 1 µm	En uzun boyutu 1 mm'den küçük ile 1 µm arasında olan, tel/filament biçimli plastik.
FI	Film	< 5 mm – 1 mm	En uzun boyutu 5 mm'den küçük ile 1 mm arasında olan, zar/ince tabaka biçimli plastik.
MFI	Mikrofilm	< 1 mm – 1 µm	En uzun boyutu 1 mm'den küçük ile 1 µm arasında olan, zar/ince tabaka biçimli plastik.
FM	Köpük	< 5 mm – 1 mm	En uzun boyutu 5 mm'den küçük ile 1 mm arasında olan, sünger veya süngerimsi plastik madde parçası.
MFM	Mikroköpük	< 1 mm – 1 µm	En uzun boyutu 1 mm'den küçük ile 1 µm arasında olan, sünger veya süngerimsi plastik madde parçası.

Mikroplastikler, morfolojik özelliklerine göre standart kategorilere (lif, film, parça, köpük, pelet vb.) ayrılmıştır (Crawford ve ark., 2017).

Tarımsal plastikler örneğin malç filmleri, sera örtüleri veya balya ipleri, tarım alanlarında zamanla UV, aşınma ve diğer fizikokimyasal süreçler sonucunda mikroplastik yüküne önemli katkı sağlamaktadır (Khalid ve ark., 2023). Atık su sistemlerinde biriken lastik kökenli parçacıkların veya yol kaynaklı mikroplastiklerin yağmur sularıyla tarım alanlarına taşınabilme potansiyeli teorik olarak mümkündür; ancak bu mekanizmayı doğrudan kanıtlayan çalışmalara henüz rastlanmamıştır. Ayrıca, sentetik plastik balık ağları ya da halatların sucul sistemlerde yıpranarak mikroplastik yükü artırdığı bilinen bir olgudur; bu durum karasal eşleniklerine dair özel çalışmalarda net olarak belgelenmemiştir. Öte yandan, Huerta Lwanga ve ark. (2017), serbest dolaşan tavukların toprak yüzeyindeki mikro ve makroplastikleri yutarak özellikle taşlıklarında biriktirdiğini göstermiştir. Bu bulgu, plastik atıkların tarımsal topraklardan karasal gıda zincirine geçişine ilişkin literatürdeki ilk

saha kanıtını oluşturmaktadır.

MP'lerin gıda zincirine birden çok aşamada girebildiği; üretim, hasat, işleme, ambalaj ve tüketim basamaklarının her birinde kontaminasyon riski bulunduğu gösterilmektedir. Paketli içeceklerde kap/şişe kaynaklı partikül salımı deneysel olarak gösterilmiş, mineral sular üzerinde yapılan bir çalışmada mikrometre-ölçekli polimer parçacıklarının şişe/kap etkileşimi sonucu suya geçtiği rapor edilmiştir (Schymanski ve ark., 2018; Oßmann ve ark., 2019). Paketlenmiş etlerde ise özellikle ekstrüde polistiren (XPS) tepsi ve film sistemlerinden et yüzeyine lif ve fragman transferi saptanmıştır (Kedzierski ve ark., 2020). Hayvansal ürünler özelinde sütün pastörize ve UHT işleme adımlarında kullanılan membran filtrelerin aşınması sonucu ortaya çıkan ikincil mikroplastikler, her ne kadar miktarca düşük olsa da tutarlı biçimde tespit edilmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Visentin ve ark., 2025). Tavuk yumurtası gibi ürünlerde de MP varlığı gözlenmiştir; örneğin Liu ve ark. (2022), perakende satışa sunulan yumurtalarda ak kısmında ortalama 11,7 MP parça bulunduğunu ve sarıda sayının daha yüksek olduğunu açıklamışlardır. Bu bulgular, yem/hammadde kaynaklı giriş mekanizmalarının yanı sıra işleme, ekipman ve ambalajdan meydana gelen kontaminasyonun da gıda zincirine giriş noktaları oluşturduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Mikroplastiklerin gıda zincirine girişinde yem birincil kapı olarak kabul edilmelidir. Buna örnek verilecek olursa Thiele ve ark. (2021) çalışması, balık unlarında kilogram başına ortalama 123,9 MP parça (çoğunluğu PE), 52 mikrolif tespit etmiş; bu durum su ürünleri yetiştiricilik sistemlerine ve hayvansal beslenmeye doğrudan ulaşabildiğini göstermektedir. Walkinshaw ve ark. (2022), balık unu ve diğer balıkçılık yemlerinin, yetiştirilen türlerin mikroplastik ve diğer insan kaynaklı partiküllere maruz kalmasında önemli bir kaynak olabileceğini vurgulamaktadır. Son dönem saha analizleri, birçok su ürünleri yeminde mikroplastik yoğunluğunun yüksek olduğunu ortaya koymuş ve bu durum yem/hammadde aşamasının gıda zincirindeki en kritik kontrol noktalarından biri olduğunu açık biçimde ortaya çıkarmıştır (Thiele ve ark., 2021; Walkinshaw ve ark., 2022; Mohsen ve ark., 2024).

Yemler ve yem hammaddeleri, çiftlik hayvanları ve kanatlılarda mikroplastik maruziyetinin en önemli kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir; ancak yemlerdeki mikroplastik yoğunluklarını

sistematik biçimde inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Wu ve ark. (2021), 19 çiftlikten aldıkları çift örneklemeler üzerinden yaptıkları değerlendirmede sığır yemlerinde 36 adet/kg, domuz yemlerinde 139 adet/kg ve tavuk yemlerinde 96 adet/kg mikroplastik bulunduğunu bildirmiştir; tespit edilen baskın polimer türünün polietilen (PE) olması ise bu bulgunun yem ambalajlarında yaygın olarak kullanılan PE iç tabaka ile uyumlu olduğunu düşündürmektedir. Çin’de yürütülen bir diğer çalışmada Xu ve ark. (2022), 15 domuz çiftliğinde yalnızca iki polimer türünü değerlendirmiş ve PET’in 45 örneğin 44’ünde medyan 0.15 mg/kg KM düzeyinde bulunduğunu, polikarbonatın (PC) ise yalnızca dört örnekte 0.006–0.09 mg/kg KM aralığında saptandığını rapor etmiştir; araştırmacılar ayrıca domuzlarda PET alımını 0.80–7.79 µg/kg canlı ağırlık/gün olarak tahmin etmiştir. van der Veen ve ark. (2022) ise altı polimer türünü değerlendirdikleri çalışmada, süpermarket kaynaklı karma yem ürünlerinde 39–2600 mg/kg düzeylerinde PE, PS ve PVC türlerinde mikroplastik tespit ederken, taze kaba yem örneklerinde herhangi bir mikroplastik bulgusuna rastlamamıştır. Buna ek olarak Sheehan ve ark. (2022), ticari mineral karışımlarında ftalat içeren PE’yi niteliksel olarak belirlemiş ancak miktar, örnek sayısı ve kontaminasyon kontrol adımları gibi kritik yöntemsel ayrıntıları bildirmemiştir; yine de mineral takviyesi kesildikten 5 hafta sonra altı boğanın dışkıсында mikroplastik yaygınlığının %50 oranında devam etmesi, lif formundaki partiküllerin sindirim kanalında uzun süre kalabileceğine işaret etmektedir.

Jeyasanta ve ark. (2024), Hindistan’ın iki farklı bölgesinden topladıkları sekiz kanatlı yemi ile on iki balık/karides yemi üzerinde üçlü örneklem tasarımıyla yürüttükleri çalışmada, yemlerdeki mikroplastik yoğunluğunun 90–330 adet/kg aralığında değiştiğini bildirmiştir. Çalışmada en baskın polimer türü PE (%33.7) olurken, parçacıkların çoğunlukla 100–500 µm boyut aralığında toplandığı ve SEM analizlerinde partiküllerin çatlak, pürüzlü, oluklu veya kırılğan yüzeyler sergileyerek çevresel aşınmaya işaret ettiği gösterilmiştir. Araştırma ayrıca 500 µm PS, PE ve PET partikülleri için sindirim geri kazanım oranını %90 olarak raporlayan tek çalışma olmuştur.

Hayvancılık faaliyetlerinde yaygın kullanılan plastik materyaller (yem torbaları, silaj örtüleri, balya ipleri, plastik yemlik–suluklar, hortum/borular, sağım sistemleri) UV, ısı ve mekanik aşınma altında mikroparçacıklara ayrışabilir; bu parçacıklar tarla ve yem zincirine karışarak maruziyeti

destekler (Nizzetto ve ark., 2016; Qi ve ark., 2020). Çiftlik ortamında, atmosferik çökelimle taşınan mikrolif ve fragmanlar iç yüzeylerde (ekipman ve yem-su kapları dâhil) birikebilir; hayvanlar yem ve su alımı sırasında bu birikimlerden dolayı olarak ikincil bir maruziyet kaynağı oluşturmaktadır. Uzun menzilli atmosferik taşınım ve ıslak/kuru çökelim, kentsel alanlarda, uzak dağlık bölgelerde ve Antarktika gibi izole ortamlarda da doğrulanmıştır (Dris ve ark., 2017; Allen ve ark., 2019, 2020; Aves ve ark., 2022). Ayrıca arıtma çamurlarının araziye uygulanması, biriken mikroplastiklerin tarımsal topraklara aktarımı için önemli bir yol olup, karasal ekosistemlerdeki yükü artırabilir (Hooge ve ark., 2023).

Mikroplastikler yalın polimerlerden ibaret değildir; üretim aşamasında eklenen ftalatlar, alev geciktiriciler ve benzeri katkı maddelerini içerir ve çevrede kalıcı organik kirleticileri, pestisitleri, poliaromatik hidrokarbonları ile ağır metalleri yüzeylerine adsorbe edebilir. Bu nedenle, uygun çevresel koşullarda kirletici taşıyıcısı (vektör) olarak işlev görmeleri mümkündür (Campanale ve ark., 2020; Zhang ve Xu, 2022; Khalid ve ark., 2023; Wu ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu “vektörlük” etkisinin bağlama (matris, konsantrasyon, temas süresi) duyarlı olduğuna işaret eden eleştirel değerlendirmeler de mevcuttur (Koelmans ve ark., 2016, 2017). Trofik aktarım açısından, mikroplastiklerin alt trofik düzeylerden üst tüketicilere taşınabildiği ve bu süreçte plastik katkı kimyasallarının da biyotik zincire geçişinin artabildiği yapılan araştırmalar sonucu açıklanmıştır (Hasegawa ve Nakaoka, 2021; Wright ve Kelly, 2017). Yürütülen araştırmalar (Espinosa ve ark., 2018; Critchell ve Hoogenboom, 2018), mikroplastiklerin besin zincirinde alt düzey organizmalardan üst tüketicilere aktarılabilirdiğini ve bu aktarım sırasında plastik katkı maddelerinin de biyotik sisteme geçiş gösterebildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, çiftlik hayvanları özelinde mikroplastik maruziyeti ve buna bağlı biyolojik etkiler konusunda nicel veri hâlen oldukça sınırlıdır; güvenilir karşılaştırmalar yapılabilmesi için ise standardize edilmiş analitik yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç devam etmektedir (Kadac-Czapska ve ark., 2022; Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Mevcut veriler ışığında mikroplastik kirliliği kaynak-yol-alıcı çerçevesinde ele alınmalıdır. Bu kapsamda, (i) çevresel ve sektörel çoklu kaynaklar (ambalaj, tekstil, tarımsal plastikler, arıtma çamurları, ekipman), (ii) maruziyet yolları (yem, içme suyu, solunum/aerosol, işleme ve

ambalajlama süreçleri) ve (iii) hayvansal ürünlere geçiş (et, süt, yumurta) bütünsel bir bakış açısıyla değerlendirilmelidir. İzleyen alt başlıklarda, çiftlik hayvanlarının maruziyet yolları, mikroplastiklerin hayvan organizmasındaki akıbeti ve et, süt ile yumurta gibi temel ürünlerde bugüne dek raporlanan bulgular ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2. ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK MARUZİYET YOLLARI

Çiftlik hayvanlarında mikroplastik (MP) maruziyeti esas olarak oral alım ile gerçekleşir; yem ve su başlıca giriş yollarıdır. Toz/aerosol içindeki lif ve kırıntıların solunum yoluyla alınması ikincil; doğrudan dermal temas ise sınırlı bir yoldur (Wu ve ark., 2021).

Fabrikasyon pelet yemler başta olmak üzere, yem hammaddeleri ve çiftlikte değerlendirilen gıda atıkları; hammadde–işleme–ambalaj–depolama–nakliye adımlarının herhangi birinde plastiğe temas ederek parçacık kontaminasyonuna açık hale gelebilmektedir (Abid ve ark., 2025). Bu bağlamda, peletlenmiş karma yemlerin karıştırma, kurutma, soğutma ve paketleme safhalarında kullanılan plastik hortumlar, contalar, bantlar ve elek yüzeyleri; ayrıca polipropilen (PP) torbalar ve plastik kaplamalı silolar, yemle doğrudan temas eden potansiyel kaynaklar olarak öne çıkmaktadır (Wu ve ark., 2021; Akanda ve ark., 2025). Yüksek sürtünme ve tekrarlı mekanik etkileşim, özellikle sıcak iklim ve uzun nakliye koşullarında ambalajdan mikrolif/kırıntı kopmasını hızlandırabilir; bu parçacıklar yeme karışarak hayvanın oral maruziyetine yol açar (Chen ve ark., 2023).

Yem tedarik zincirinin plastik kontaminasyona açık olduğunu gösteren veriler artmaktadır. Örneğin Çin’de ticari domuz yemlerinde, yedi ftalat katkı maddesi ile iki tipik MP (PET, PC) birlikte saptanmış; MP düzeyleri <0,8–302 µg/kg aralığında ölçülmüş ve ftalat esterleriyle pozitif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir (Xu ve ark., 2022). Bu bulgular, işleme ekipmanları, ambalaj ve depolama materyalleri üzerinden yeme parçacık ve katkı geçişini işaret etmektedir. Benzer şekilde, balık unları ve ticari balıkçılık yemlerinde PP, PE, PET ve PS başta olmak üzere çeşitli polimerlerde mikroplastikler doğrulanmıştır (Thiele ve ark., 2021; Walkinshaw ve ark., 2022). Kanatlı yemlerine ilişkin yayımlanmış saha verileri ise henüz sınırlıdır ve standardize yöntemlerle yapılacak çalışmalar gereklidir. Öte yandan çiftlik yemlerinde

mikroplastik (MP) kontaminasyonu çoklu tür ve formülasyonlarda doğrulanmaktadır. Saha gözlemleri, yem çuvallarının iç katmanındaki naylon (PA6/PA66) liflerin sürtünmeyle yeme geçebildiğini; etlik piliç etinde doğrulan PA izlerinin olası ambalaj kaynaklı olduğunu düşündürmektedir (Chen ve ark., 2023). Hindistan’da 12 farklı işletmeden toplanan sığır, domuz, kanatlı ve balık yemlerinden oluşan 36 örneğin tamamında FTIR/DSC ile polimer tanımlaması ve py-GC/MS ile nicelendirme sonucunda PET, PP ve PVC başlıca polimerler olarak saptanmış; parçacık boyutları nanoparçacık analizörüne göre yaklaşık olarak 2,0–10,7 µm aralığında dağılım göstermiştir. Tüm yem tiplerinde MP bulunmakla birlikte, görsel olarak ayırt edilebilen makroplastiklerin bazı örneklerde eleme sırasında uzaklaştırıldığı; SEM görüntülerinde yüzeyi çatlak, lif benzeri morfolojilerin baskın olduğu bildirilmiştir (Maganti ve Akkina, 2023). Polimer yükü yem türleri ve işletmeler arasında değişmekte; çalışmada kanatlı ve balık yemlerinde nispeten yüksek toplam polimer konsantrasyonları öne çıkmaktadır. Bu bulgular, üretim/işleme hattındaki plastik temas yüzeyleri, ambalaj ve depolama materyallerinin yemlere parça/fragman transferi için pratik birer giriş kapısı olabileceğini göstermektedir. Bangladeş’te yapılan bir çalışmada ise ticari balık yemlerinde mikroplastik miktarları 550–11.600 adet/kg aralığında bulunmuş; parçacık boyutları 14–4.480 µm aralığına yayılmış ve başlıca polimerler arasında PP, PET, PS, PE, PVC (ve bazı örneklerde PVA) tanımlanmıştır (Muhib ve Rahman, 2023).

Yem tedarik zincirindeki kontaminasyonun somutluğunu gösteren Hollanda menşeli pilot çalışmada, analiz edilen beş sığır pelet yemi ve dört domuz pelet yeminin tamamında polivinil klorür polimerleri (PVC-P) ve polietilen (PE) ölçülebilir düzeylerde saptanmıştır; sığır peletlerinde PVC-P 700–≥2600 µg/g, PE 540–≥2400 µg/g; domuz peletlerinde PVC-P 340–700 µg/g, PE 340–960 µg/g aralıklarında raporlanmıştır. Stiren polimerleri (Styr-P) sığır peletlerinde 52–740 µg/g, domuz peletlerinde ise çoğunlukla düşük düzeylerde/bazı örneklerde LOD–LOQ (LOD: saptama sınırı; LOQ: miktar tayin sınırı. $LOD < konsantrasyon < LOQ$ aralığındaki bulgular ‘iz’ olarak değerlendirilir) aralığında bildirilmiştir. Aynı çalışmada tarladan doğrudan sağlanan ‘taze kaba yem’ örneklerinde hedeflenen polimerler çoğunlukla tespit limitinin altında kalırken, ‘parçalanmış yem’ kompozitlerinde PVC-P 740–2000 µg/g ve PE 220–640 µg/g gibi yüksek yükler görülmüştür. Bu

bulgular, üretim-hazırlama-ambalaj-depolama süreçlerinde plastik aşınmasının ve parçacık transferinin yeme doğrudan yansıyabildiğini ortaya koymaktadır (van der Veen ve ark., 2022).

Meksika'nın güneydoğusundaki geleneksel Maya ev bahçelerinde yürütülen alan çalışması, topraktaki mikroplastiklerin (MP) toprak solucanlarının döküntülerine ve oradan da tavukların sindirim sistemi ile dışkısına taşınabildiği sonucuna varmışlardır. Tavuk dışkısındaki MP düzeyleri (129,8 parçacık/g) topraktan (0,87 parçacık/g) belirgin şekilde yüksek bulunmuştur. Bulgular, toprak-omurgasız-kanatlı hattında trofik transferin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır (Huerta Lwanga ve ark., 2017). Benzer bir durum mera ve bitki artığı bulunan otlatma alanlarında da görülmüştür. İspanya'nın Murcia bölgesindeki sebze tarlalarında, plastik malç kullanılan yerlerde yapılan ölçümlerde koyun gübrelerinde kuru madde bazında ortalama 997 adet mikroplastik/kg tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, taze dışkıda yaklaşık 500 adet/kg mikroplastik olduğu varsayılmış ve 1 hektarlık bir alanda otlayan 1000 başlık bir sürünün dışkısıyla günde yaklaşık 180.000 adet mikroplastik yayabileceği hesaplanmıştır. Bu alanın yılda iki kez otlatıldığı düşünülürse, yıllık toplam yaklaşık 0,36 milyon mikroplastik parçacığının çevreye taşınabileceği öngörülmüştür (Beriot ve ark., 2021). Batı İran'da yürütülen yeni bir çalışmada ise sığır ve kanatlı gübresi örneklerinin %71.42'sinde MP tespit edilmiş; lif, film, fragman ve küre (pellet) morfolojileri rapor edilmiş ve polimer bileşimi çoğunlukla PE ve PP olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, yalnızca yem kaynaklı değil, tarımsal plastikler ve diğer çevresel girdilerden gelen sürekli maruziyetin hayvansal gübrelere yansıdığını desteklemektedir (Mohammadi ve ark., 2025).

Bazı işletmelerde maliyeti azaltmak ve döngüsellliği desteklemek amacıyla fırıncılık yan ürünleri (bayat ekmek, bisküvi kırığı), meyve-sebze posaları, bira mayası posası gibi gıda endüstrisi artıkları ile süpermarketlerden toplanan tüketilemeyen ürünler yem hammaddesi olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım sürdürülebilirlik açısından cazip görünse de girdi materyallerinin plastikle yoğun teması nedeniyle mikroplastik (MP) kontaminasyonu bakımından özgül riskler içerir. Ambalajdan ayırma ("de-packaging") adımı çoğu zaman kusursuz değildir; streç film, poşet ve kap parçalarının milimetrik/kılcal kırıntıları ayrışma hatalarından ya da mekanik işlem sırasında ufalanmadan kaynakla yeme karışabilir (Akanda ve ark.,

2025). Gıda atığı bazlı yemlerde risk yalnızca “de-packaging” hatalarından ibaret değildir; ön kontaminasyon da önemli bir giriş kapısıdır. Nitekim sofratuzlarında ve bazı şekerli ürünlerde mikroplastik (MP) varlığı tekrarlayan şekilde rapor edilmiştir; bu tür bileşenlerin önce gıdaya, ardından atık akışına MP taşınması mümkündür (Pironti ve ark. 2021).

Deniz ürünleri yan ürünleri ve balık unu için de benzer bir tablo söz konusudur: Balık ve kabuklularda yaygın MP birikimi bulunduğundan, bu hammaddeler yem zincirine MP getirme potansiyeli taşımaktadır. Bangladeş’te iki popüler kurutulmuş deniz balığı ürününde MP saptanması, bölgesel yem/gıda tedarik zincirlerinde kaynak yönetiminin önemini vurgulamaktadır (Djouina ve ark., 2024; Akanda ve ark., 2025).

Saha bildirimleri, yoğun barınak koşullarındaki su kuşlarında (ördek) MP kontaminasyonunu göstermiştir; maruziyetin yem, su ve çevresel toz gibi birden çok kanaldan beslendiğini işaret eder. Bu nedenle, gıda atığı bazlı yemlerde hem bileşen kökeninin izlenmesi hem de ön arıtma/ayıklama ve hijyen protokollerinin sıkılaştırılması kritik görülmelidir (Akanda ve ark., 2025). Tarlada ve merada kullanılan silaj streç filmleri ile balya ipleri zamanla ufalanıp kaba yem matrisine karışabilir; bu da özellikle gıda atığı bazlı yem akışlarıyla birlikte değerlendirildiğinde ek bir mikroplastik (MP) yükü doğurur. İspanya’daki saha çalışması, plastik malç kullanılan sebze tarlalarında koyun dışkılarında (kuru madde) yüksek MP düzeyleri ve film/fragment ağırlıklı morfolojiler bildirmiş; tarladaki malç kalıntılarının başlıca kaynak olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, otlatma/bitki artığı tüketimi yoluyla MP alımının sahada gerçekçi bir risk olduğunu gösterir (Beriot ve ark., 2021). Öte yandan, bazı bölgelerde başıboş/gezinici küçük-büyükbaşların çöplük ve yol kenarı atıklarında makroplastik tükettiği ve bunun rumen impaksiyonu, indigestion/tekrarlayan timpani gibi kronik sindirim sorunlarına yol açabildiği çok sayıda saha çalışması ve derlemede rapor edilmiştir. Bu uç örnekler, özellikle gıda atığı tabanlı beslemede ambalaj artıklarının titizlikle uzaklaştırılmasının kritikliğini vurgular (Mekuanint ve ark., 2017; Priyanka ve Dey, 2018).

Uygulamada riski azaltmak için, hammadde kabulünde ambalaj kalıntılarının tam ayrıştırılması ve optik–hava ayırıcı, elek, yoğunluk bazlı ön-temizleme gibi mekanik adımlarla plastiklerin uzaklaştırılması esastır. Süreç tarafında paslanmaz çelik/cam esaslı ekipman, kapalı transfer ve toz kontrolü;

“de-packaging” hatlarında sürtünmeyi azaltan tasarımlar eklenerek aşınma kaynaklı bulaşmayı sınırlar. Tedarik zinciri için girdi spesifikasyonları (balık unu ve kuru deniz ürünlerinde MP için tedarikçi beyanı) ile periyodik doğrulama (örnekleme–analiz planı) pratik ve etkili iyileştirme alanlarıdır. Bu önlemler, derlemelerde vurgulanan çok yönlü azaltım paketinin parçasıdır (Akanda ve ark., 2025). Düzenleme boyutunda, pek çok ülkede yemlerde MP’ye özgü sistematik bir izleme standardının bulunmaması önemli bir boşluktur; izin verilebilir seviyelerin tanımlanması ve HACCP içinde MP-odaklı kritik kontrol noktalarının belirlenmesi, yem güvenliği yönetimini güçlendirir.

Su, ikinci önemli maruziyet yoludur. Dünya genelinde yüzey suları ve bazı içme suyu kaynaklarında (ham/arıtılmış/şişelenmiş) mikropplastik (MP) bildirimleri artmaktadır; içme suyu üzerine sistematik derlemeler ve tesis ölçekli çalışmalar bunu desteklemektedir. İçme suyu şebekelerinde boru ve bağlantı parçalarının aşınması da ek bir MP giriş yoludur (Wu ve ark., 2021; Akanda ve ark., 2025). Paketli içeceklerde, ambalajın kendisinden suya mikroparçacık geçişi mikroskopik/Raman analizleriyle kanıtlanmıştır (Schymanski ve ark., 2018). Kümes ortamlarında damlalık tipi suluklar, plastik su hatları ve kaplar zamanla ufalanarak suya mikropplastik geçişine zemin hazırlayabilir; saha örneklemelerinde su hattı, hayvan ağız yolu ile alımı, gübre zinciri olası bir taşıma yolu olarak tanımlanmıştır (Wu ve ark., 2021). Bu çerçevede suyun kaynağı (yüzey/yeraltı), ön arıtım süreçleri ve hat/rezervuar malzemesi seçimi, maruziyetin yönetiminde kritik önemdedir.

Solunum yoluyla alım, özellikle kapalı barınaklarda yem doldurma/boşaltma sırasında ve günlük faaliyetler esnasında yükselen lif ve tozların havada askıda kalabildiği durumlarda önem kazanmaktadır. İç ortamlarda lif konsantrasyonları ve çökelim hızları dış ortama göre belirgin biçimde yüksektir; liflerin önemli bir bölümü tekstil/ambalaj kaynaklıdır. Bu durum, barınak havasında da lif ve parçacık yükünün birikebileceğine işaret etmektedir. Maruziyet yolları insanlarda başlıca inhalasyon, ardından oral alım, daha düşük ölçüde dermal temas olarak tanımlanır; havadaki lif ve parçacıklar, toz yutumu gibi dolaylı mekanizmalarla sindirim sistemine de ulaşabilir. Bu nedenle, barınak havasının kalitesi (toz/lif kontrolü), yüzeylerin temizlik pratiği ve materyal seçimi maruziyet yönetiminde kritik öneme sahiptir (Dris ve ark., 2017; Pronti ve ark., 2021). Açık çevresel bağlamda,

mikroplastiklerin atmosferle uzun mesafelere taşınıp uzak ve seyrek nüfuslu alanlara dahi ıslak/kuru çökelimle ulaştığı gösterilmiştir; bu bulgular, çiftlik içi/dışı hava yüklerinin de rüzgâr ve yağışla beslendiğini düşündürmektedir (Allen ve ark., 2019).

Yapılan çalışmalar çiftlik hayvanlarında sahadaki yetiştiriciliklerde ve kümes içi örneklerinde kümes hayvanları ve diğer türlerde mikroplastik varlığı rapor edilmiştir; bu durum, yem-su-çevresel toz hatlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir. Buna örnek olarak etlik piliçlerin kas dokusunda MP tespiti; derlemelerde su/yem/ambalaj ve atmosferik girdiler verilebilir (Chen ve ark., 2023; Akanda ve ark., 2025).

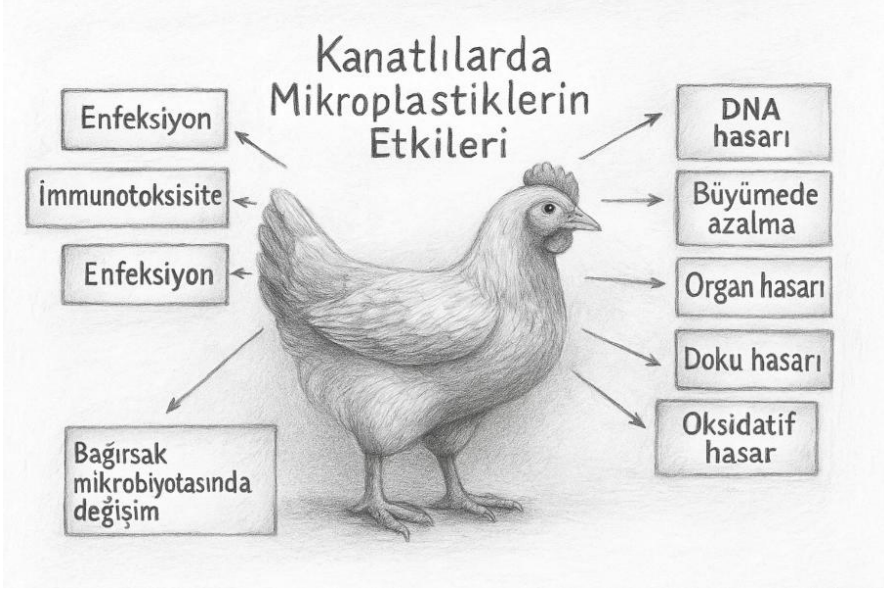
Deri yoluyla maruziyet, mevcut kanıtlara göre ikincil ve sınırlı kabul edilmektedir; asıl girişler inhalasyon ve oral alım üzerinden olmaktadır (Pironti ve ark., 2021). Deri yoluyla mikroplastik emilimine ilişkin çiftlik hayvanlarında yapılmış bir araştırma henüz bulunmamaktadır ve literatürde bu konudaki bilgi son derece sınırlıdır. Mevcut çalışmalar arasında yalnızca bir araştırma, çiftlik hayvanlarının akciğer dokularındaki mikroplastik varlığını incelemiştir. Li ve ark. (2023), hem yetişkin hem de fetal domuz akciğerlerinde mikroplastik tespit etmiş; özellikle fetal dokuda mikroplastik bulunması, bu partiküllerin yalnızca inhalasyon yoluyla akciğere ulaşmadığını ve farklı aktarım mekanizmalarının da söz konusu olabileceğini düşündürmüştür. Dong ve ark. (2023) ise çiftlik hayvanlarının vücut yüzeyini kaplayan yün ve kılların mikroplastiklere karşı fiziksel bir bariyer oluşturarak dermal girişe karşı belirli düzeyde koruyucu bir rol oynayabileceğini ileri sürmektedir. Bu bulgular, solunum ve dermal maruziyet yollarının yeniden değerlendirilmesini ve özellikle deri yoluyla emilim konusunda daha fazla araştırma yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Toparlayıcı kanıtlar, yem ve su hijyeninin, ekipman/ambalaj malzemesi seçiminin ve barınak içi toz-hava yönetiminin mikroplastik maruziyetini kontrol etmede belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle besleme sürecinde kullanılan plastik ürünlerin bileşimi ile gübrede saptanan MP'lerin bileşimi arasındaki uyum, yem hattı ve ekipman kaynaklı girişleri işaret eder; bu nedenle yem hammaddelerinin kökeni-işlenmesi, depolama/nakliye pratikleri ve temas eden malzemelerin (kap, boru, astar, ambalaj) polimer türü kritik önemdedir. Çiftlik ölçeğinde önleme/azaltma stratejileri literatürde vurgulanmakta; giriş kapılarının (yem, su, altyapı-ekipman) birlikte yönetimi

önerilmektedir. Ayrıca MP'lerin atmosferik taşınımıyla çevresel bölmeler arasında aktarılabilirdiği göz önüne alındığında, barınak içi hava kalitesi ve toz kontrolü de maruziyet yönetiminin ayrılmaz parçasıdır. Yem hammaddelerinin kökeni ve işlenme hattı, depolama ve nakliye pratikleri; su temin zinciri ve hat materyalleri barınak içi hava kalitesi ve toz kontrolü birlikte ele alındığında maruziyet azaltımında anlamlı kazanımlar sağlanabilir (Wu ve ark., 2021; Beriot ve ark., 2021; Xu ve ark., 2022; Akanda ve ark., 2025).

3. MİKROPLASTİKLERİN HAYVAN VÜCUDUNDAKİ AKİBETİ (ABSORPSİYON, DAĞILIM VE ATILIM)

Mikroplastiklerin tarımsal üretim sistemlerinde giderek daha fazla tespit edilmesi, bu partiküllerin hayvan organizmasında nasıl davrandığının anlaşılmasını önemli hâle getirmiştir. Özellikle kanatlılarda maruziyet yolları ve toksikokinetik süreçler hem sağlık hem de ürün güvenliği açısından dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Mikroplastiklerin kanatlı üretimi üzerindeki olası etkileri Şekil 2'de özetlenmektedir. Dong ve ark. (2023), hayvanların mikroplastiklere (i) oral yolla, yem ve su tüketimi aracılığıyla, (ii) solunum yoluyla, hava içerisindeki partiküllerin akciğerlere inhalasyonu ile ve (iii) deri teması üzerinden üç temel maruziyet yoluyla karşılaşabileceğini belirtmektedir. Sheriff ve ark. (2023) ise mikroplastiklerin vücuda girdikten sonra organizmada çeşitli toksikokinetik süreçlere (emilim, dağılım, metabolizma ve atılım) ve buna bağlı toksikodinamik etkilere yol açabileceğini bildirmektedir. Bu süreçler, mikroplastik maruziyetinin hayvan sağlığı üzerindeki çok boyutlu etkilerini ortaya koymaktadır (Abd El-Hack ve ark., 2025).



Şekil 2. Mikroplastiklerin kanatlı üretimi üzerindeki olası etkilerini gösteren şema

Gehring ve van der Merwe (2014) ile Richardson (2020), bir kimyasalın toksikodinamik etkilerini, maruziyet süresi, dozu, sıklığı ve miktarı gibi değişkenlere bağlı olarak organizmada ortaya çıkan biyolojik tepkiler şeklinde tanımlamaktadır. Buna karşılık, toksikokinetik, yabancı bir kimyasalın vücuda alındıktan sonra geçirdiği emilim, dağılım, metabolizma ve atılım süreçlerini kapsamaktadır (van der Merwe ve ark., 2018; Asati ve ark., 2022). Sığır ve kanatlılarda mikroplastiklerin toksikodinamik ve toksikokinetik sonuçlarına ilişkin araştırmalar ise oldukça yenidir ve mevcut literatür henüz sınırlı düzeydedir (Sheriff ve ark., 2023).

Kuşlar tarafından alınan mikroplastikler, inflamasyona, gastrointestinal tıkanmalara ve besin emiliminde bozulmalara yol açarak normal sindirim süreçlerinin işleyişini bozabilir ve buna bağlı olarak genel sağlık durumunu olumsuz yönde etkileyebilir. Mikroplastikler (MP) ağız yoluyla alındıktan sonra çiftlik hayvanlarının gastrointestinal kanalında büyük ölçüde emilmeden transit geçer ve dışkıyla uzaklaştırılır; kontrollü deneyler ve saha gözlemleri bu sonucu doğrulamaktadır (Shelver ve ark., 2024; Beriot ve ark., 2021; Huerta Lwanga ve ark., 2017; Wu ve ark., 2021). Yumurtacı tavuklarda [^{14}C]-işaretli polistiren MP maruziyetinde, uygulanan dozun %96,8'i ilk 24 saat içinde dışkıyla elimine edilmiş; kan, yumurta ve dokularda kalan toplam

fraksiyon %1'in altında bulunmuştur (Shelver ve ark., 2024). Öte yandan Malik ve ark. (2025) 32 civcivi dört gruba ayırmış ve kontrol grubunun yanı sıra üç farklı mikroplastik maruziyet düzeyi uygulanmıştır (%20 MP, %30 MP ve %40 MP). Mikroplastikler kozmetik ürünlerden ekstrakte edilmiş ve yarı pişmiş hamur formunda günlük rasyonun belirli oranları şeklinde hayvanlara 28 hafta boyunca verilmiştir. Araştırmacıların bulgularına değerlendirildiğinde; mikroplastik maruziyetinin kanatlılarda çok yönlü fizyolojik bozulmalara yol açtığını, özellikle yüksek dozlarda (>%30 günlük rasyon) büyüme performansını düşürdüğünü, enzimatik ve hormonal yanıtları belirgin şekilde değiştirdiğini ve metabolik stres göstergelerini artırdığını göstermektedir. Araştırmacılar, bu değişimlerin hayvanlarda net enerji alımını azaltarak büyüme ve genel sağlık üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu vurgulamaktadır. Susanti ve ark. (2021), Endonezya'nın beş farklı kentindeki yoğun üretim sistemlerinde yetiştirilen ördeklerde mikroplastik varlığını araştırmış ve bağırsaklarda dikkate değer düzeyde mikroplastik birikimi tespit etmiştir. Bazı bölgelerde bir kuşta bulunan mikroplastik sayısının 39 ile 49 adet arasında değiştiği bildirilmiştir. Ördeklerde saptanan mikroplastiklerin çoğu fragman ve filament formunda olup, parçacık boyutları 100–5000 µm aralığında değişmiştir. Ayrıca analiz edilen örneklerde en sık karşılaşılan polimer türlerinin naylon, PBM, PET, PVC ve PE olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Filipinler'in South Caloocan bölgesindeki pazarlardan temin edilen tavukların taşlık ve bağırsak dokularında film, fragment ve pellet formunda çeşitli mikroplastik türleri tespit edilmiştir (Leon ve ark., 2022). Meksika'da yürütülen bir başka araştırmada ise 5 mm'den küçük mikroplastiklerin %16,45'inin tavuk taşlıklarında biriktiği bildirilmiştir (Huerta Lwanga ve ark., 2017). Bu bulgular, kümes hayvanlarının çevresel mikroplastik yükünden önemli ölçüde etkilenebildiğini göstermektedir. Mikroplastiklerin kanatlıların üreme sistemi üzerindeki olumsuz etkileri de deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Hou ve ark. (2022), 28 ve 42 gün süreyle sırasıyla 1 ve 100 mg/L polistiren (PS) mikroplastik verilen tavuklarda testis dokusunda yapısal bozulmalar, oksidatif stres ve belirgin inflamatuvar infiltrasyon geliştiğini rapor etmiştir. Meng ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen daha güncel bir çalışmada ise, 42 gün boyunca 5 µm boyutunda PS mikroplastiklere maruz bırakılan tavuklarda özellikle 10 mg/L ve 100 mg/L konsantrasyonlarında böbrek hasarı, oksidatif stres artışı ve

mitokondriyal fonksiyonlarda bozulma tespit edilmiştir.

Çeşitli saha çalışmalarında koyun gübrelerinde lif/film/fragman biçiminde ve çoğunlukla PE/PP bileşiminde MP'lerin düzenli olarak rapor edilmesi (Beriot ve ark., 2021) ve toprak–solucan–tavuk trofik hattında partikül transferinin deneysel olarak gösterilmesi (Huerta Lwanga ve ark., 2017), yeme ve çevresel girdilere rağmen alımın büyük kısmının emilmeden atıldığını desteklemektedir. Derleme çalışmalar da çiftlik hayvanlarında mikrometre boyutundaki MP'lerin biyoyararlanımının düşük, sistemik seviyelerin ise sınırlı olduğunu bildirmektedir (Wu ve ark., 2021).

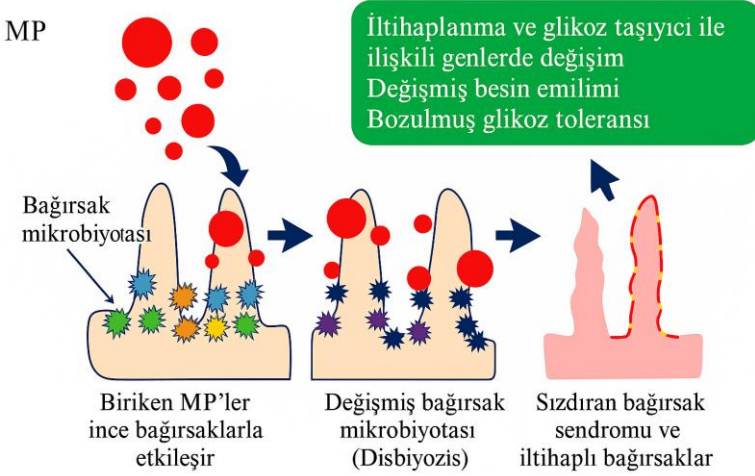
Mikroplastiklerin bağırsaklardan emilme olasılığı; parçacığın boyutuna, yüzey özelliklerine ve bağırsak bariyerinin (mukus tabakası, bağırsak epitel hücreleri, M-hücreleri/Peyer plakları ve sıkı bağlantılar) yapısına bağlıdır. Çeşitli araştırmalar, 100–150 mikrometreden daha büyük mikroplastiklerin bağırsaktan neredeyse hiç geçmediğini göstermektedir. Buna karşılık 100 mikrometreden küçük ve özellikle 1–2 mikrometreden daha küçük nano boyuttaki parçacıkların, epitel tabakasından geçebildiği; bunun da mukus üzerinden geçiş, M-hücreleri aracılığıyla taşınma veya hücreler tarafından endositoz yoluyla alınma gibi mekanizmalarla gerçekleşebileceği bildirilmektedir (Wright ve Kelly, 2017; Bruno ve ark., 2024; Obeng ve ark., 2025). Monclús ve ark. (2022), Japon bıldırcınlarında 5 hafta boyunca toplam 600 mg polietilen/polipropilen (PE/PP) mikroplastik uygulanarak parçacık boyutunun etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 125 mikrometreden küçük parçacıkların antioksidan enzimleri (CAT, GST, GPx) artırdığı; 3 mm boyutundaki daha büyük parçacıkların ise AST düzeyini yükselttiği ve dışı bıldırcınlarda 17 β -östradiol hormonunu azalttığı gösterilmiştir. Hayvanların son canlı ağırlığı değişmemiş olsa da büyüme hızının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, küçük parçacıkların ($\leq 125 \mu\text{m}$) bağırsak epiteline daha kolay ulaşım hücresel stres ve oksidatif yanıt oluşturma ihtimalinin yüksek olduğunu; büyük parçacıkların ise çoğunlukla mide–taşıklıkta daha uzun süre kaldığını ve bağırsaklara daha yavaş geçtiğini göstermektedir.

Kemirgen modelinde PE (40–48 μm) ve PA (15–20 μm) mikroplastiklerine kısa süreli oral maruziyetinin duodenum geçirgenliğini ve sıkı bağlantı proteinlerine ait gen ekspresyonlarını etkilediği bildirilmiştir; bu, bariyer bütünlüğünün MP maruziyetinde hassas bir hedef olabileceğine işaret eder (Toto ve ark., 2022). PE (10–150 μm) için, farelerde barsak

mikrobiyotası ve inflamasyon üzerinde olumsuz etkiler bildirilmiştir (Li ve ark., 2020). PS ile yapılan çalışmalarda da barsak bariyeri bozulması ve metabolik etkileri rapor edilmiştir (Jin ve ark., 2019). Tür farklılıkları ve deney koşulları nedeniyle genelleme dikkat gerektirse de parçacık boyutu küçüldükçe (özellikle $<100\ \mu\text{m}$ ve mikro-altı) epitel geçişi ve biyoyararlanım olasılığının arttığı yönünde tutarlı bir eğilim bulunmaktadır. Tekrarlayan maruziyet koşullarında, mikroplastiklerin kas dokusunda tespit edilebilir düzeyde birikebildiğine dair kanıtlar mevcuttur. Etlik piliçlerde yürütülen çalışmada, çiftlikten doğrudan alınan örneklerde PS ve özellikle PA6 başta olmak üzere çok sayıda polimer göğüs ve but kasında spektroskopik olarak doğrulanmıştır; akabinde yapılan kontrollü PS maruziyeti, göğüs kasında birikimin arttığını, but kasında ise zamanla azaldığını bildirilmiştir (Chen ve ark., 2023). Bu bulgular, kaslar arasındaki kan akımı ve dokunun yenilenme hızı (turnover) farklı olduğundan, mikroplastiklerin birikme, temizlenme dinamikleri de kas grubuna göre değişebileceğini göstermektedir. Tavşanlarda yeme katılan PVC parçacıkları, ince bağırsağın (ileum) iç yüzeyinde eksfoliasyona, yani epitelin üst tabakasındaki hücrelerin dökülmesine/soyulmasına yol açmış; ayrıca dalakta bağışıklık hücreleri (makrofajlar) içinde plastik tanecikleri görülmüştür. Bu bulgular, bağırsak bariyerinin kısmen aşılabildiğini ve parçacıkların sınırlı ölçüde kana/organlara taşınabileceği düşünülebilir. Yüksek doz ya da uzamış maruziyet ve uygun boyut-morfoloji koşullarında kısıtlı bir sistemik yayılım mümkündür; ancak yanıt, tür, hedef doku ve parçacık özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Papp ve ark., 2024)

Son dönemde yapılan Saijo ve ark. (2025)'nin gerçekleştirdiği bir çalışmada, yüksek yağlı diyetle beslenen farelere farklı boyutlarda ($0,5\text{--}100\ \mu\text{m}$) polistiren mikroplastikler (PS-MP) verilmiştir. Bulgular, parçacık boyutundan bağımsız olarak glikoz toleransının bozulduğunu göstermiştir. Ayrıca, ince bağırsak yüzeyindeki villuslarda atrofi (yani villusların kısalıp incilmesi, emilim yüzeyinin küçülmesi) gözlenmiştir. Bağırsak dokusunda bağışıklık sistemi hücrelerinde de değişimler saptanmıştır. Özellikle doğal öldürücü hücreler (Natural Killer–NK hücreleri) sayısında artış rapor edilmiştir. NK hücreleri bağışıklık sisteminin ilk savunma hattında yer alan, virüs bulaşmış veya tümörleşmiş hücreleri ortadan kaldırabilen hücrelerdir. Bunun yanında makrofajlar (vücuttaki yabancı maddeleri fagosite eden, yani

“yiyip parçalayan” bağışıklık hücreleri) da artış göstermiştir. Bu durum, bağırsak mukozasında inflamasyonun (iltihaplanmanın) arttığını göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Polistiren mikropplastiklerin bağırsak bariyeri, mikrobiyota ve glikoz metabolizması üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi. Saijo ve ark. (2025) çalışmasındaki grafik öğeleri temel alınarak Türkçeye çevrilmiş ve özgün biçimde yeniden düzenlenmiştir.

Ruminantlarda emilim–dağılım–eliminasyon dinamikleri, ön midelerin varlığı ve rumen mikrobiyotasının etkileri nedeniyle monogastriklerden farklılık gösterebilir. İn-vitro rumen çalışmalarında, yem matriksine karıştırılan mikropplastiklerin fermantasyon dengesini bozabildiği görülmüştür. Örneğin düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) parçacıkları gaz üretimini ve amonyak ($\text{NH}_3\text{-N}$) seviyelerini artırırken, yemin parçalanabilirliğini ve protozoa sayısını azaltmıştır; bu etkinin diğer polimerlerden daha belirgin olduğu rapor edilmiştir. Saha gözlemleri de bu bulguları desteklemektedir. İspanya’da yapılan bir çalışmada koyun dışkılarının %92’sinde mikropplastik varlığı rapor edilmiştir (Beriot ve ark., 2021). Benzer şekilde, Ekvador’da yürütülen bir araştırmada keçi dışkılarının %93’ünde mikropplastik tespit edilmiştir (González-Puetate ve ark., 2024). Bu veriler, ruminant dışkılarında mikropplastik kontaminasyonunun farklı kıtalarda yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Hollanda’da yapılan pilot bir çalışmada, 12 sığır ve 12 domuzun kan örneklerinin tamamında polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve stiren bazlı polimerlere ait sinyaller saptanmıştır. Ayrıca,

domuzların yaklaşık %40'ında polietilen tereftalat (PET), sığırların üçte birinde ise polipropilen (PP) bulunmuştur. Aynı çalışmada, süt örneklerinin çoğunda farklı plastik türleri tespit edilmiş, et örneklerinin yaklaşık %75'inde ise en az bir polimer bulunmuştur. Bu sonuçlar, ruminantlarda mikroplastiklerin büyük kısmının dışkıyla atıldığını, ancak düşük düzeyde de olsa kana ve ürünlere geçişin mümkün olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, işleme ve ekipman kaynaklı bulaşmanın da göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, gerçek endojen geçiş ile dış kaynaklı bulaşmayı ayırt edebilmek için daha kapsamlı ve standart yöntemlerle yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır. Chang ve ark. (2024), bireysel bölmelerde barındırılan Hulunbuir kuzularına 60 gün boyunca oral yolla farklı boyutlarda polistiren (PS) mikroplastikler (0, 25 ve 50 µm; 150 mg/gün) uygulayarak mikroplastik maruziyetinin fizyolojik ve metabolik etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, partikül boyutu büyüdükçe jejunum epitelinde daha belirgin histolojik hasar oluştuğunu ve bu yapısal bozulmanın günlük canlı ağırlık artışında azalma, yemden yararlanma oranının düşmesi, besin maddesi sindirilebilirliğinin gerilemesi ve rumen pH'sında anlamlı bir düşüş gibi performans ve sindirim parametrelerindeki olumsuz değişikliklerle ilişkili olduğunu göstermiştir. Buna karşın, kuru madde tüketiminde ve rumen ile kolon epiteli morfolojisinde belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir. PS maruziyetinin rumen mikrobiyotasını da dikkate değer ölçüde yeniden şekillendirdiği görülmüş; Bacteroidetes, Prevotellaceae ve Actinobacteria gibi bazı mikrobiyal grupların relatif abundansı artarken, özellikle Coriobacteriales incertae sedis başta olmak üzere selüloz parçalayıcı mikroorganizma popülasyonlarında belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Kan parametrelerinde gözlenen değişiklikler, oksidatif stres belirteçlerinin yükseldiğini ve inflamatuvar yanıtın aktive olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, partikül boyutuna bağlı bu fizyolojik ve metabolik bozulmaların, longissimus lumborum kasında tespit edilen et kalite özelliklerindeki değişimlerle—özellikle kesme kuvveti, renk parametreleri ve pH farklılıklarıyla—ilişkili olabileceğini göstermiştir.

Dolaşıma geçen fraksiyonun hangi dokularda bulunduğu, kullanılan analitik yöntem ve modele bağlıdır. Tavuklarda karaciğer, ince bağırsak ve iskelet kası gibi dokularda PS, PET, PA6/PA66 varlığı spektroskopik olarak gösterilmiştir; özellikle kas dokusunda PA6 yüksek düzeydedir (Chen ve ark.,

2023). Elverişli deney koşullarında, yumurtacı tavuklarda tek doz [^{14}C]-işaretli polistiren uygulamasında mikroplastiklerin yalnızca çok küçük bir kısmı emildiği; kan, dokular ve yumurtadaki toplam birikim %1'in altında kaldığı kanıtlanmıştır. Uygulanan dozun yaklaşık %97'si ilk 24 saat içinde dışkıyla uzaklaştırılmıştır. Eser düzeyde emilen PS'nin yumurta akı ve sarısına geçtiği yumurta akında erken saptanırken, sarıdaki düzey yaklaşık dördüncü günde en yüksek değerine ulaşmaktadır (Shelver ve ark., 2024).

Süt için de benzer bir ikilem söz konusudur: MP'nin kan-süt bariyerini aşabildiğine dair doğrudan, net kanıtlar sınırlıyken; sağım hatlarında boru/hortum/filtre aşınmasıyla eksojen bulaşma olasıdır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Pironti ve ark., 2021). Bu nedenle, biyolojik emilim ve süreç-kaynaklı bulaşmanın dikkatle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Huerta Lwanga ve ark. (2017), iki tavuk dışkısı örneğinde kilogram başına 129.800 adet gibi son derece yüksek düzeyde mikroplastik bulunduğunu bildirmiştir. Buna karşın Wu ve ark. (2021), sekiz farklı tavuk çiftliğinden aldıkları çift numunelerde mikroplastik yoğunluğunu yalnızca 667 adet/kg yaş ağırlık olarak belirlemiştir; üstelik bu çalışma, Lwanga ve ark. (2017)'nin filtre boyutundan çok daha küçük olan 0.22 μm filtre kullanmasına rağmen daha düşük bir değer rapor etmiştir. Yan ve ark. (2020), çiftlik sayısını belirtmedikleri çalışmalarında incelenen 10 dışkı örneğinin 4'ünde mikroplastik tespit ederken, Yu ve ark. (2023) tek bir dışkı örneğinde 14.900 adet/kg mikroplastik belirlemiştir. Kanatlılarda mikroplastiklerin sindirim sürecinde nasıl parçalandığını doğrudan değerlendiren bir çalışma bulunmamaktadır; ancak mevcut bulgular bu olasılığı desteklemektedir. Örneğin Bilal ve ark. (2023), taşlıkta tespit edilen mikroplastiklerin kursakta bulunanlara kıyasla daha küçük boyutta olduğunu rapor etmiş ve bunun taşlığın güçlü kaslı öğütme işleviyle ilişkili olabileceğini öne sürmüştür. Benzer şekilde Huerta Lwanga ve ark. (2022), dışkıda bulunan mikroplastiklerin taşlıkta tespit edilenlerden daha küçük olduğunu göstererek, sindirim sürecinde parçalanmanın daha ileri düzeyde devam edebileceğine işaret etmiştir. Bu gözlemler, kanatlılarda mikroplastiklerin gastrointestinal sistem boyunca nasıl değişime uğradığını anlamak için daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Mevcut bulgular, kütle dengesi açısından yani mikroplastiklerin vücutta izlediği toplam yolun şöyle görüldüğünü göstermektedir: mikroplastikler çoğunlukla bağırsaktan

emilmeden geçer (transit); emilen küçük kısım sınırlı kalır; organlara dağılım düşüktür ve doku ile koşullara göre değişir; atılımın ana yolu ise dışkıdır. Bununla birlikte bu tablo; maruziyet dozu ve süresi, parçacık özellikleri (boyut, morfoloji, polimer tipi, yüzey kimyası), tür-yaş-fizyolojik durum ve kullanılan analitik yöntem duyarlıdır; gözlenen kinetik ve farklı matrislerdeki saptanabilirlik bu değişkenlere göre anlamlı biçimde değişebilir (Shelver ve ark., 2024; Chen ve ark., 2023; Abid ve ark., 2025). Analitik yöntem ile, kullanılan ölçüm tekniğinin (Raman/FTIR, Py-GC-MS, LDIR) algılama sınırı ve seçiciliğinin sonucu etkileyebilir. Bu nedenle hem deney tasarımlarında hem de gıda güvenliği risk değerlendirmelerinde standartlaştırılmış protokoller, kontaminasyon kontrolü (blank/körler) ve matrise özgü yöntem doğrulaması vazgeçilmezdir. Matrise özgü doğrulama” ise, her örnek türü (kan, süt, et, dışkı vb.) için yöntemin gerçekten çalıştığını, yanlış pozitif/negatifleri ve geri kazanımı kontrol ederek kanıtlamayı ifade eder.

4. SONUÇ

Çiftlik hayvanlarında mikroplastik maruziyetinin uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak sucul ekosistemlerle ilişkilendirilmesine karşın, günümüzde karasal üretim sistemlerinde de giderek artan ve sistematik bir risk oluşturduğu net olarak görülmektedir. Bu bölümde sunulan kanıtlar, mikroplastiklerin kaynakları, hayvanlara ulaşma yolları ve vücut içindeki davranışlarının oldukça karmaşık ve çok katmanlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle yem tedarik zinciri, içme suyu hatları, barınak atmosferi ve tarımsal plastiklerin kullanımı gibi birden fazla temas noktası aynı anda devrede olduğundan, maruziyetin yönetilmesi her geçen gün daha da güç hale gelmektedir. Bu sebeple mikroplastikler yalnızca bir “çevresel kirlilik” unsuru olarak değil, yem güvenliği, hayvan sağlığı ve gıda güvenliği kesişiminde yer alan çok yönlü bir risk faktörü olarak ele alınmalıdır.

Mevcut bilimsel veriler, çiftlik hayvanlarının mikroplastikleri ağırlıklı olarak yem ve su yoluyla oral olarak aldığı ve bu parçacıkların büyük bölümünün bağırsaklardan emilmeden dışkıyla atıldığı yönünde tutarlıdır. Ancak dışkıyla uzaklaştırılma oranının yüksek olması, maruziyetin önemsiz olduğu anlamına gelmez. Zira boyutları küçük olan partiküller (özellikle <100 µm olanlar) bağırsak bariyerini geçerek oksidatif stres, inflamasyon, bağırsak geçirgenliğinde artış ve mikrobiyota dengesizlikleri gibi fizyolojik

değişikliklere yol açabilmektedir. Bu etkilerin ruminantlarda rumen fonksiyonlarını ve fermantasyon süreçlerini, monogastriklerde ise bağırsak epitel bütünlüğünü ve bağışıklık sistemini etkileyebildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla, geçmişte sıkça kabul edilen “mikroplastikler sadece sindirimden geçerek atılır” yaklaşımı günümüz verileriyle uyumlu değildir. Özellikle yoğun ve kapalı üretim sistemlerinde düşük seviyeli ancak sürekli maruziyetin zaman içinde subklinik ve kronik etkilere yol açma ihtimali göz ardı edilmemelidir.

Mikroplastiklerin biyolojik dokulara geçişinin düşük düzeylerde olduğu genel olarak doğru görünse de kas ve karaciğer gibi dokularda polimer izlerinin saptandığı saha çalışmaları, maruziyetin yalnızca pasif bir geçiş süreci olmadığını düşündürmektedir. Ancak bu bulguların yorumlanmasında önemli bir belirsizlik bulunmaktadır: bu polimerlerin ne kadarının gerçekten biyolojik geçişten ne kadarının ise örnekleme, laboratuvar işleme süreçleri veya ekipman kaynaklı kontaminasyondan kaynaklandığı kesin değildir. PET, PP veya PA6 gibi polimerlerin hem gıda işleme hatlarında hem de numune toplama ekipmanlarında yaygın olarak bulunması, yanlış pozitif sonuç olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların sıkı laboratuvar kontaminasyon kontrolleri, kör örnek uygulamaları ve matrise özgü doğrulama yöntemleri içermesi, sonuçların güvenilirliği açısından zorunludur.

Çiftlik düzeyinde değerlendirildiğinde, mikroplastiklerin hayvanlara girişindeki en önemli kaynak yemdir. Pelet yemler, balık unu, gıda atığı bazlı rasyonlar ve ambalaj malzemesi temasları maruziyeti artıran başlıca faktörlerdir. Özellikle balık unu gibi su ürünleri kökenli hammaddelerin zaten mikroplastik içeren dokulardan üretiliyor olması, yem kaynaklı kontaminasyonu daha kritik bir hale getirmektedir. Ayrıca mikroplastiklerin yalnızca küçük plastik parçalar değil, aynı zamanda yüzeylerinde ftalatlar, pestisitler, kalıcı organik kirleticiler ve ağır metaller taşıyabilen “kimyasal vektörler” olduğu düşünüldüğünde, riskin çok daha geniş bir çerçevede değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum, klasik hayvan besleme yaklaşımında fiziksel safsızlık olarak değerlendirilen olgunun bugün artık kimyasal ve biyolojik etkilerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Barınak içi hava ve toz da özellikle kümes hayvanlarında sanılandan

çok daha önemli bir maruziyet yolu olarak öne çıkmaktadır. Kapalı ortamlarda lif ve toz yoğunluklarının dış ortama göre oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Tekstil, ambalaj veya yem torbalarından kaynaklanan liflerin yem üzerine çökmesi; hayvanların solunum ve daha sonra yutma yoluyla bu parçacıkları sindirim kanalına taşımasına neden olmaktadır. Bu nedenle barınak havalandırması, toz kontrolü ve yüzey hijyeni yalnızca hayvan refahı açısından değil, mikroplastik maruziyetinin azaltılması açısından da kilit uygulamalardır.

Bu bölümde değerlendirilen veriler bir arada ele alındığında, çiftlik hayvanlarında mikroplastik kirliliğinin:

- Kaynaklarının çok çeşitli ve üretim sistemi boyunca süreklilik gösterdiği,
- Yem, su, hava ve çevresel toz yoluyla eşzamanlı çoklu maruziyet oluşturduğu,
- Emilim ve dokulara geçişin düşük düzeylerde olsa da tamamen göz ardı edilemeyeceği,
- Atılımın büyük ölçüde dışkı ile gerçekleştiği,
- Hayvansal ürünlere geçiş konusunda hem biyolojik hem de proses kaynaklı belirsizliklerin bulunduğu,
- Kontaminasyonun azaltılması için yem güvenliği, ekipman seçimi, ambalaj yapıları, atık yönetimi ve barınak hijyenini kapsayan çok yönlü müdahalelerin gerektiği,
- Türler arası karşılaştırmaların ancak standardize analiz yöntemleri geliştirildiğinde anlamlı hale gelebileceği

sonucunu ortaya koyduğu görülmektedir. Bu bağlamda mikroplastik maruziyetinin hem hayvan sağlığı hem de hayvansal ürün güvenliği üzerindeki etkilerinin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için “Tek Sağlık” yaklaşımını temel alan, disiplinler arası ve standardizasyona dayalı yeni bir araştırma altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulama boyutunda ise yem tedarik zincirindeki plastik temas yüzeylerinin azaltılması, balık unu ve gıda atığı bazlı hammaddelerin daha sıkı izlenmesi, su hatlarında plastik aşınmasının kontrol edilmesi, barınaklarda toz yönetiminin iyileştirilmesi ve plastik kullanımının mümkün olduğunca azaltılması, maruziyeti düşürmeye yönelik en etkin stratejiler arasında yer almaktadır.

Son dönem çalışmalar, mikroplastiklerin kanatlı ve diğer çiftlik

hayvanlarında oluşturduğu hücresel stres yanıtları ile üretim performansı arasındaki ilişkinin henüz tam olarak ortaya konmadığını göstermektedir. Özellikle oksidatif stres, inflamatuvar yanıt, apoptozis ve endokrin etkileşimlerin uzun dönem üretim kaybına nasıl yansıdığı belirsizdir. Mevcut veriler, mikroplastiklerin lokal doku etkileri ile makro düzeyde ekonomik sonuçlar arasında bir ‘bağlantı eksikliği’ olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların, hem gerçek çevresel mikroplastik tiplerini kullanması hem de performans verilerini eşzamanlı olarak değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında kullanılan mikroplastiklerin çoğu, tek bir polimer türünden oluşmakta ve genellikle çok yüksek konsantrasyonlarda uygulanmaktadır. Bu durum, hayvanların gerçek çevre koşullarında maruz kaldığı mikroplastik miktarlarını tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle gelecekteki araştırmalarda, çevrede gerçekten karşılaşılan daha düşük dozların, yaşlanmış (weathered) polimerlerin, farklı boyut ve türlerden oluşan karma mikroplastik karışımlarının ve düşük doz–uzun süreli maruziyet modellerinin öncelikli olarak ele alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, çiftlik hayvanlarında tespit edilen mikroplastik düzeyleri günümüzde düşük görünse de maruziyetin sürekliliği, parçacık çeşitliliği, kimyasal yükleri ve potansiyel biyolojik etkileri dikkate alındığında, bu konunun hem bilimsel hem de düzenleyici açıdan önümüzdeki dönemin en önemli araştırma başlıklarından biri olacağı açıktır. Hayvansal üretim sistemlerinde mikroplastik kontrolü sağlanmadığı sürece hem hayvan sağlığı hem de gıda güvenliği açısından risklerin devam edeceği unutulmamalıdır. Bu nedenle mikroplastikler, modern hayvancılıkta dikkate alınması şart olan yeni nesil bir kontaminant olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, 104, 104456.
- Abid, K., Aroua, M., Barbera, S., Petrucco, S. G., Kaihara, H., Mahouachi, M., Ben Saïd, S., & Tassone, S. (2025). Effect of microplastic contamination on in vitro ruminal fermentation and feed degradability. *Animal Science Journal*, 96, e70063.
- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., Fang, C., & Rahman, M. M. (2024). The unseen threat of the synergistic effects of microplastics and heavy metals in aquatic environments: A critical review. *Current Pollution Reports*, 10(3), 478–497.
- Akanda, M. R., Kawsar, M. A., Sabuj, M. S. S., Ashik-Uz-Zaman, M., Siddiqui, M. S. I., & Hossain, M. A. (2025). Microplastic pollution in livestock farming in Bangladesh: A critical review of its key findings and mitigation strategies to address public health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7), 732.
- Allen, S., Allen, D., Moss, K., Le Roux, G., Phoenix, V. R., & Sonke, J. E. (2020). Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLOS ONE*, 15(5), e0232746.
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5), 339–344.
- Asati, S., Pandey, V., Gour, V., Tiwari, R., Soni, V., Rajpoot, K., Tekade, M., Sharma, M. C., & Tekade, R. K. (2022). Toxicity and toxicokinetic considerations in product development and drug research (Chapter 16). In R. K. Tekade (Ed.), *Pharmacokinetics and toxicokinetic considerations* (Vol. 2, pp. 401–424). Academic Press.
- Aves, A. R., Revell, L. E., Gaw, S., Ruffell, H., Schuddeboom, A., Wotherspoon, N. E., LaRue, M., & McDonald, A. J. (2022). First evidence of microplastics in Antarctic snow. *The Cryosphere Discussions*, 2022, 1–31.

- Bilal, M., Taj, M., Ul Hassan, H., Yaqub, A., Shah, M. I. A., Sohail, M., Rafiq, N., Atique, U., Abbas, M., & Sultana, S. (2023). First report on microplastics quantification in poultry chicken and potential human health risks in Pakistan. *Toxics*, 11(10), 612.
- Bruno, A., Dovizio, M., Milillo, C., Aruffo, E., Pesce, M., Gatta, M., Chiacchiaretta, P., Di Carlo, P., & Ballerini, P. (2024). Orally ingested micro- and nano-plastics: A hidden driver of inflammatory bowel disease and colorectal cancer. *Cancers*, 16, 3079.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212.
- Chang, X., Li, Y., Han, Y., Fang, Y., Xiang, H., Zhao, Z., Zhao, B., & Zhong, R. (2024). Polystyrene exposure induces lamb gastrointestinal injury, digestive disorders and inflammation, decreasing daily gain and meat quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 277, 116389.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, 882, 163305.
- Corte Pause, F., Urli, S., Crociati, M., Stradaoli, G., & Baufeld, A. (2024). Connecting the Dots: Livestock Animals as Missing Links in the Chain of Microplastic Contamination and Human Health. *Animals*, 14(2), 350.
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Microplastic identification techniques. In C. B. Crawford & B. Quinn (Eds.), *Microplastic pollutants* (pp. 219–267).
- Critchell, K., & Hoogenboom, M. O. (2018). Effects of microplastic exposure on the body condition and behaviour of planktivorous reef fish (*Acanthochromis polyacanthus*). *PLOS ONE*, 13(3), e0193308.
- Djouina, M., Loison, S., & Body-Malapel, M. (2024). Recent progress in intestinal toxicity of microplastics and nanoplastics: Systematic review of preclinical evidence. *Microplastics*, 3(2), 217–233.
- Dong, X., Liu, X., Hou, Q., & Wang, Z. (2023). From natural environment to animal tissues: A review of microplastics (nanoplastics) translocation and hazards studies. *Science of the Total Environment*, 855, 158686.

- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458.
- El Gazzar, W. B., Sliem, R. E., Bayoumi, H., Elsayed Nasr, H., Shabanah, M., Elalfy, A., Radwaan, S. E., Gebba, M. A., Mansour, H. M., Badr, A. M., Amer, M. F., Ashour, S. S., Morsi, H., Aboelkomsan, S. A. F., Baioumy, B., Hamid Sayed, A. E., & Farag, A. A. (2023). Melatonin alleviates intestinal barrier damaging effects induced by polyethylene microplastics in albino rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13619.
- Erdem, H., Gence, C. Ç., Öztürk, M., Buhan, E., Kholikulov, S. T., & Kaya, Y. (2025). Microplastics in soil increase cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, 575.
- Espinosa, C., Beltrán, J. M. G., Esteban, M. A., & Cuesta, A. (2018). In vitro effects of virgin microplastics on fish head-kidney leucocyte activities. *Environmental Pollution*, 235, 30–38.
- Gehring, R., & van der Merwe, D. (2014). Toxicokinetic–toxicodynamic modelling (Chapter 8). In R. C. Gupta (Ed.), *Biomarkers in toxicology* (pp. 149–153). Academic Press.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782.
- González-Puetate, I., Martínez-Cepeda, G., Torres-Lasso, P., Chávez, K., & Guevara, G. (2024). Microplastics in ruminant feces in Ecuador. *Ciencia Veterinaria*, 26(2), 114–129.
- Habib, R. Z., Poulose, V., Alsaidi, R., Al Kendi, R., Iftikhar, S. H., Mourad, A. H. I., Kittaneh, W. F., & Thiemann, T. (2022). Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(3), 609–619.
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., & Jonsson, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039–

1047.

- Hasegawa, T., & Nakaoka, M. (2021). Trophic transfer of microplastics from mysids to fish greatly exceeds direct ingestion from the water column. *Environmental Pollution*, 273, 116468.
- Hernandez, L. M., Yousefi, N., & Tufenkji, N. (2019). Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea. *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12300–12310.
- Hooge, A., Hauggaard-Nielsen, H., Heinze, W. M., Lyngsie, G., Ramos, T. M., Sandgaard, M. H., Vollertsen, J., & Syberg, K. (2023). Fate of microplastics in sewage sludge and in agricultural soils. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117184.
- Hou, L., Wang, D., Yin, K., Zhang, Y., Lu, H., Guo, T., Li, J., Zhao, H., & Xing, M. (2022). Polystyrene microplastics induce apoptosis in chicken testis via crosstalk between NF- κ B and Nrf2 pathways. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 262, 109444.
- Hu, L., Zhao, Y., & Xu, H. (2022). Trojan horse in the intestine: A review on the biotoxicity of microplastics combined environmental contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129652.
- Huerta Lwanga, E., Mendoza-Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Segura, G. E., Gertsens, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7, 14071.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, N., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- Jeyasanta, I., Sathish, M. N., Patterson, J., Esmeralda, V. G., & Laju, L. R. (2024). Microplastics contamination in commercial fish meal and feed: A major concern in the cultured organisms. *Chemosphere*, 363, 142832.
- Jin, Y., Lu, L., Tu, W., Luo, T., & Fu, Z. (2019). Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of the Total Environment*, 649, 308–317.
- Kadac-Czapska, K., Knez, E., & Grembecka, M. (2022). Food and human safety: The impact of microplastics. *Critical Reviews in Food Science*

- and Nutrition*. Advance online publication.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzaud, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., & Rizvi, Z. F. (2023). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130455.
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3315–3326.
- Koelmans, A. A., Kooi, M., Law, K. L., & van Sebille, E. (2017). All is not lost: Deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114028.
- Kosuth, M., Mason, S. A., & Wattenberg, E. V. (2018). Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLOS ONE*, 13(4), e0194970.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks—Are they immune from microplastics contamination? *Science of the Total Environment*, 714, 136823.
- Leon, L. I. D., Bautista, I. M. R., Deza, A. G. M., Kok, J. F. F., Mundo, E. F. D., & VinceCruz-Abeledo, C. C. (2022). Microplastic fragments from poultry entrails in wet markets from South Caloocan, Philippines. *Research Square*.
- Li, B., Ding, Y., Cheng, X., Sheng, D., Xu, Z., Rong, Q., Wu, Y., Zhao, H., Ji, X., & Zhang, Y. (2020). Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice. *Chemosphere*, 244, 125492.
- Li, H., Yang, Z., Jiang, F., Li, L., Li, Y., Zhang, M., Qi, Z., Ma, R., Zhang, Y., Fang, J., Chen, X., Geng, Y., Cao, Z., Pan, G., Yan, L., & Sun, W. (2023). Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research*, 216, 114623.
- Liang, B., Zhong, Y., Huang, Y., Lin, X., Liu, J., Lin, L., Hu, M., Jiang, J., Dai, M., Wang, B., Zhang, B., Meng, H., Lelaka, J. J. J., Sui, H., Yang,

- X., & Huang, Z. (2021). Underestimated health risks: Polystyrene micro- and nanoplastics jointly induce intestinal barrier dysfunction by ROS-mediated epithelial cell apoptosis. *Particle and Fibre Toxicology*, 18, 20.
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status. *Food Chemistry*, 397, 133771.
- Maganti, S. S., & Akkina, R. C. (2023). Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 13(5), 348–356.
- Malik, A., Azam, S. M., Ambreen, M., Khan, R., Durrani, R., Ruby, T., Ahmad, S., Naqvi, S., Arshad, M., Zain ul Abideen, A., Sattar, N., Imtiaz, A., & Khan, A. A. (2025). Effect of microplastic ingestion on digestive enzymes, hormones, hematology, and serum biochemistry of *Gallus gallus domesticus*. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 56(6), 1317–1326.
- Mekuanint, S., Alemneh, T., & Asredie, T. (2017). Indigestible rumen foreign bodies—Causes of rumen impaction in cattle, sheep and goats slaughtered at Addis Ababa abattoir enterprise, Ethiopia. *Journal of Veterinary Science and Medicine*, 5(1), 5.
- Meng, X., Yin, K., Zhang, Y., Wang, D., Lu, H., Hou, L., Zhao, H., & Xing, M. (2022). Polystyrene microplastics induced oxidative stress, inflammation and necroptosis via NF- κ B and RIP1/RIP3/MLKL pathway in chicken kidney. *Toxicology*, 478, 153296.
- Mohammadi, M., Dargahi, A., Almasi, A., Mousavi, S. A., & Mohammadi, P. (2025). Occurrence of microplastic, antibiotics, hormones, and heavy metals in livestock and poultry manure in west Iran. *Scientific Reports*, 15, 27228.
- Mohsen, M., Lin, J., Lu, K., Wang, L., & Zhang, C. (2024). Microplastic pollution in aquafeed of diverse aquaculture animals. *Heliyon*, 10(17).
- Monclús, L., McCann Smith, E., Ciesielski, T. M., Wagner, M., & Jaspers, V. L. B. (2022). Microplastic ingestion induces size-specific effects in Japanese quail. *Environmental Science & Technology*, 56(24), 15902–

15911.

- Muhib, M. I., & Rahman, M. M. (2023). Microplastics contamination in fish feeds: Characterization and potential exposure risk assessment for cultivated fish of Bangladesh. *Heliyon*, 9(9), e19789.
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777–10779.
- Obeng, E. M., Hodge, C., & You, J. (2025). Microplastic pollution: A review of specific blood-tissue barrier breaches and health effects. *Environmental Pollution*, 126416.
- Oßmann, B., Schymanski, D., Ivleva, N. P., Fischer, D., Fischer, F., Dallmann, G., & Welle, F. (2019). Comment on “Exposure to microplastics (<10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study by Zuccarello et al. [Water Research 157 (2019) 365–371]”. *Water Research*, 162, 516–517.
- Papp, P. P., Hoffmann, O. I., Libisch, B., Keresztény, T., Geröcs, A., Posta, K., Hiripi, L., Hegyi, A., Gócza, E., Szőke, Z., & Olasz, F. (2024). Effects of polyvinyl chloride (PVC) microplastic particles on gut microbiota composition and health status in rabbit livestock. *International Journal of Molecular Sciences*, 25, 12646.
- Peixoto, D., Pinheiro, C., Amorim, J., Oliva-Teles, L., Guilhermino, L., & Vieira, M. N. (2019). Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 161–168.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Priyanka, M., & Dey, S. (2018). Ruminal impaction due to plastic materials—An increasing threat to ruminants and its impact on human health in developing countries. *Veterinary World*, 11(9), 1307.
- Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C. (2020). Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Science of the Total Environment*, 703, 134722.
- Ramage, S. J., Coull, M., Cooper, P., Campbell, C. D., Prabhu, R., Yates, K., Dawson, L. A., Devalla, S., & Pagaling, E. (2025). Microplastics in

- agricultural soils following sewage sludge applications: Evidence from a 25-year study. *Chemosphere*, 376, 144277.
- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2022). Evaluation of microplastic presence in yogurt production process. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 28(5), 633–641.
- Richardson, R. J. (2020). Toxicant interactions with macromolecular targets (Chapter 4). In *An introduction to interdisciplinary toxicology* (pp. 45–57). Academic Press.
- Saijo, Y., Hasegawa, Y., Okamura, T., Ono, Y., Ichikawa, T., Nakanishi, N., Tsuchimura, Y., Morioka, T., Tanaka, S., Takano, H., Hamaguchi, M., & Fukui, M. (2025). Negative impact of oral exposure to polystyrene microplastics on glucose tolerance and intestinal environment in mice is independent of particle size. *Environmental Sciences Europe*, 37(125), 1–16.
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162.
- Sheehan, K. L., Lawson, P., & Emerson, B. (2022). Fate of plastics in cattle digestive systems. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 28(3), 205–214.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of the Total Environment*, 909, 168512.
- Sheriff, I., Yusoff, M. S., & Halim, H. B. (2023). Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104039.
- Shufol, M. B. A., Riya, K. K., Hossain, M. K., Albeshr, M. F., Arai, T., Yu, J., Ngah, N., & Hossain, M. B. (2025). Microplastic contamination in highly consumed wild and cultured Asian seabass from a subtropical coastal region: Exposure and consumer risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107867.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics

- in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386.
- Susanti, R., Yuniastuti, A., & Fibriana, F. (2021). The evidence of microplastic contamination in central Javanese local ducks from intensive animal husbandry. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 178.
- Thiele, C. J., Hudson, M. D., Russell, A. E., Saluveer, M., & Sidaoui-Haddad, G. (2021). Microplastics in fish and fishmeal: An emerging environmental challenge? *Scientific Reports*, 11(1), 2045.
- Toto, B., Refosco, A., O’Keeffe, M., Barkhald, Ø. H., Brønstad, A., Lied, G. A., Yadetie, F., Goksøyr, A., Kögel, T., & Dierkes, J. (2022). Intestinal permeability and gene expression after polyethylene and polyamide microplastic ingestion in Wistar rats. *Toxicology Letters*, 370, 35–41.
- Toussaint, B., Raffael, B., Angers, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio Echevarria, I. M., & Van den Eede, G. (2019). Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain. Joint Research Centre (European Commission). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(5), 639–673.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study* (Report EH22-01). Vrije Universiteit Amsterdam.
- Visentin, E., Niero, G., Benetti, F., O’Donnell, C., & De Marchi, M. (2025). Assessing microplastic contamination in milk and dairy products. *NPJ Science of Food*, 9(1), 135.
- Walkinshaw, C., Tolhurst, T. J., Lindeque, P. K., Thompson, R., & Cole, M. (2022). Detection and characterisation of microplastics and microfibrs in fishmeal and soybean meal. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114189.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Xu, J., Bi, W., Hua, L., Cheng, Z., Wang, Y., Li, D., Liu, W., Wang, L., & Sun, H. (2022). Wide occurrence of seven phthalate plasticizers and two typical microplastics in pig feed. *Chemosphere*, 307, 135847.

- Yan, Z., Zhao, H., Zhao, Y., Zhu, Q., Qiao, R., Ren, H., & Zhang, Y. (2020). An efficient method for extracting microplastics from feces of different species. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121489.
- Yu, X., Zhou, Z.-C., Shuai, X.-Y., Lin, Z.-J., Liu, Z., Zhou, J.-Y., Lin, Y.-H., Zeng, G.-S., Ge, Z., & Chen, H. (2023). Microplastics exacerbate co-occurrence and horizontal transfer of antibiotic resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131130.
- Zhang, M., & Xu, L. (2022). Transport of micro- and nanoplastics in the environment: Trojan-Horse effect for organic contaminants. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), 810–846.
- Zimmermann, L., Geueke, B., Parkinson, L. V., Schür, C., Wagner, M., & Muncke, J. (2025). Food contact articles as source of micro- and nanoplastics: A systematic evidence map. *NPJ Science of Food*, 9(1), 111.

BÖLÜM 11

HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER

Prof. Dr. Arda YILDIRIM¹
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048962>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID:0000-0002-5876-4228, E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Hayvan Yetiştirme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-4338-1758, E-posta: ekrem.buhan@gop.edu.tr

GİRİŞ

Plastik kirliliği, insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan en ciddi çevresel tehditlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Güncel tahminlere göre küresel plastik üretimi yıllık 430 milyon tonu aşmakta olup, bu miktarın büyük bölümü kısa ömürlü ürünlerden oluştuğu için hızla atığa dönüşmektedir (Naz ve ark., 2024). Çevreye kontrolsüz şekilde yayılan bu plastik atıkların önemli bir kısmı zaman içerisinde parçalanarak mikroplastiklere dönüşmekte ve nihayetinde hayvansal üretim sistemlerine ve gıda zincirine kadar ulaşabilmektedir. Sistematik incelemeler, her yıl 5–13 milyon ton plastiğin deniz ekosistemlerine karıştığını ortaya koymakta; tatlı su, toprak ve okyanuslar dâhil olmak üzere çok çeşitli habitatlarda mikroplastik birikiminin hızla arttığını göstermektedir (Al Nahian ve ark., 2023; Pourebrahimi ve Pirooz, 2023; Sharma ve Vidyarthi, 2024).

Mikroplastikler; kuşlar, balıklar, omurgasızlar ve memeliler gibi çok farklı hayvan gruplarında tespit edilerek geniş bir maruziyet spektrumuna ve biyobirikim potansiyeline işaret etmektedir. Mikroplastik tüketiminin bağırsak mikrobiyotasını bozduğu, besin emilimini azalttığı ve sindirim verimini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Ayrıca bu partiküller, yüzeylerine adsorbe olabilen kimyasal kirleticiler için taşıyıcı görevi görerek oksidatif stres, inflamasyon ve endokrin sistem bozuklukları gibi fizyopatolojik süreçleri tetikleyebilir (Khan ve ark., 2024; Abd El Hack ve ark., 2025).

Tarımsal üretim ortamlarında mikroplastik kaynaklarının çeşitliliği maruziyeti önemli ölçüde artırmaktadır. Sera ve silaj örtüleri, plastik malçlar, atık çamuru gibi organik gübre kaynakları, sulamada kullanılan geri kazanılmış atık su, plastik boru ve vanalar, çiftlik ekipmanlarının parçaları ve kontamine yemler, çiftlik hayvanları ve kanatlılar için başlıca mikroplastik giriş kapılarıdır (Rodríguez-Seijo ve Pereira, 2019; Beriot ve ark., 2021; Wu ve ark., 2021; Ziajahromi ve ark., 2024; Olmo ve Holman, 2025). Bu plastik malzemeler UV ışınları, mekanik aşınma ve çevresel koşullar nedeniyle parçalanarak çevrede mikroplastik yükünün hızla artmasına yol açmaktadır (Siddiqui ve ark., 2023).

EFSA (2016), 150 µm'den büyük partiküllerin çoğunun dışkıyla atıldığını; buna karşılık daha küçük boyuttaki partiküllerin gastrointestinal bariyeri aşarak dokulara taşınabildiğini bildirmiştir. Nitekim doğal maruziyet çalışmalarında sığır dışkısında 74 MP/kg, tavuk dışkısında 667 MP/kg ve

domuz dışkısında 900 MP/kg düzeylerinde mikroplastik tespit edilmiştir (Wu ve ark., 2021). Taşlık, bağırsak, karaciğer ve hatta kas dokusunda birikim gösteren mikroplastikler de rapor edilmiş; etlik piliçlerde 2.2–1751.4 mg/kg aralığında birikim düzeyleri bildirilmiştir (Chen ve ark., 2023). Perakende et örneklerinde bile 53–7700 mg/kg mikroplastik saptanmış olması, gıda zinciri açısından önem taşımaktadır (van der Veen ve ark., 2022).

Bu bulgular, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerine potansiyel etkilerinin ihmal edilemeyeceğini göstermektedir. Mikroplastik partiküllerinin hücre düzeyinde inflamasyon, oksidatif stres ve apoptoza yol açtığı; üretkenlik, bağışıklık fonksiyonları ve genel fizyolojik denge üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu ortaya konmuştur (Blackburn ve Green, 2022). Ayrıca et ürünlerinde mikroplastik bulunması, yalnızca gıda güvenliği değil, aynı zamanda insan üreme sistemi ve gelişimi açısından potansiyel toksisite nedeniyle halk sağlığı için de risk oluşturmaktadır.

Toplum genelinde mikroplastik maruziyeti giderek artmaktadır. ABD’de yapılan bir tahmine göre yetişkin bir birey, yalnızca belirli gıda gruplarından yıllık 46.000–52.000 mikroplastik tüketmektedir; bu hesaplama tüm hayvansal ürünleri kapsamamakla birlikte, et ve et ürünlerinin maruziyete katkısına ilişkin verilerin hâlen sınırlı olduğu vurgulanmaktadır (Cox ve ark., 2019). Bu durum, hayvansal ürünlerde mikroplastik düzeylerinin belirlenmesi ve maruziyetin niceliksel olarak daha iyi anlaşılması gereksinimini ortaya koymaktadır.

Düzenleyici çerçeve henüz küresel ölçekte tam olarak oluşmuş değildir. Avrupa Birliği’nde gıdayla temas eden plastiklerde 60 mg/kg’dan fazla madde geçişine izin verilmezken (European Commission, 2011), Birleşik Krallık gıda atıklarının yem olarak kullanımında plastik ambalajı ağırlıkça %0.15 ile sınırlamaktadır (Parfitt ve ark., 2016). Hollanda ise yemlerde plastik ambalaj kalıntılarının tamamen uzaklaştırılmasını zorunlu kılarak hayvanlardaki plastik alımını azaltmayı hedeflemektedir (van der Veen ve ark., 2022). Bu düzenlemeler, gelecekte et ürünlerinde mikroplastik limitlerinin belirlenmesi yönünde küresel bir eğilim gelişeceğine işaret etmektedir (Olmo ve Holman, 2025).

Kanatlı endüstrisi de bu çevresel baskıdan doğrudan etkilenmektedir. Mikroplastiklerin üretim ortamına çok sayıda kanal üzerinden girmesi (yem, su hattı boruları, ekipman aşınması, altlık materyalleri vb.) nedeniyle

maruziyet riski yüksektir. Alınan partiküllerin bir kısmı dışkıyla atılsa da partikül boyutu, polimer yapısı, yük yoğunluğu, maruziyet süresi ve eşlik eden kimyasal kirleticiler gibi faktörler, sistemik etki potansiyelini artırmaktadır.

Öte yandan gıda geri kazanım süreçlerinde ağır metaller, mikotoksinler, biyojen aminler, mikroplastikler ve anti-besinsel faktörler gibi kontaminantların tamamen uzaklaştırılması çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle geri kazanılmış gıdaların hayvan beslemede kullanımı sırasında kirleticilerin düzeylerinin belirlenmesi ve bunların azaltılmasına yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Simmons ve ark., 2023).

Son yıllarda mikroplastiklerin giderilmesine yönelik çevresel açıdan sürdürülebilir yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bakteriler, mantarlar ve alglerin rol aldığı mikrobiyal biyobozunma stratejileri, mikroplastiklerin parçalanmasını hızlandırma potansiyeli nedeniyle önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Kotova ve ark., 2021; Qin ve ark., 2021; Chen ve ark., 2022; Cholewinski ve ark., 2022). Bu bağlamda mikroplastiklerin çevresel kalıcılığı, biyo birikim kapasitesi ve hayvansal üretimden insan tüketimine uzanan çok yönlü etkileri, sorunun yalnızca “çevresel kirlilik” boyutunda değil, aynı zamanda gıda güvenliği, yem hijyeni, hayvan refahı ve sürdürülebilir üretim başlıklarında da değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Mikroplastik krizinin azaltılması; plastik kullanımının düşürülmesi, etkili atık yönetimi, geri dönüşüm sistemlerinin iyileştirilmesi ve biyobozunur alternatiflerin geliştirilmesi gibi bütüncül politikaları gerektirmektedir.

Bu kitap bölümünün amacı, mikroplastiklerin çeşitli hayvansal ürünlerde nasıl ortaya çıktığını, bu kontaminasyonun hayvan sağlığı ve nihai ürün kalitesi üzerindeki olası etkilerini bilimsel veriler ışığında değerlendirmek ve hayvansal ürünlerde mikroplastik yükünü azaltmaya yönelik uygulanabilir kontrol ve iyileştirme stratejilerini kapsamlı bir çerçeve içinde ele almaktır.

1. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE MİKROPLASTİKLER

Son yıllarda mikroplastiklerin (MP) yalnızca deniz ürünlerinde değil, karasal kökenli hayvansal ürünlerde de giderek daha fazla rapor edilmesi, et ve et ürünlerinde maruziyetin gerçek boyutunu değerlendirmeyi zorunlu hâle

getirmiştir. Et dokusu, hayvan yaşamı boyunca karşılaşılan çevresel mikroplastik girişlerinin (yem, su, toprak-toz, barınak ekipmanları) yanı sıra kesim, işleme ve ambalajlama basamaklarındaki eksojen kaynaklarla da kontamine olabilir. Bu nedenle kas dokusunda saptanan mikroplastiklerin kökeni çoğu zaman çok etmenlidir ve hem endojen (hayvanın gerçekten absorbe ettiği) hem de eksojen (süreçten gelen) katkıların birlikte değerlendirilmesini gerektirir.

Hayvanın yaşam döngüsü boyunca karşılaştığı yem, su, barınak tozu, plastik kaplamalı ekipmanlar veya silaj örtüsü parçacıkları gibi çevresel girdiler, özellikle polietilen (PE), polipropilen (PP) ve poliamid (PA) temelli mikropartiküllerin sindirim sistemi aracılığıyla organizmaya girmesine neden olabilir. Bununla birlikte mevcut veriler, bu tür endojen geçişlerin genellikle düşük düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Buna karşın kesim ve işleme ortamlarında kullanılan plastik eldivenler, kesme yüzeyleri, taşıma kasaları, bant sistemleri, vakum torbaları ve özellikle ekstrüde polistiren (XPS) tepsiler, sürtünme ve mekanik aşınma yoluyla ete mikrolif ve kırıntı aktarabilmektedir. Bu mekanizma, literatürde farklı ülkelerden raporlanan polimer profilleriyle uyumludur; kırmızı ve beyaz etlerde en sık tespit edilen polimerlerin PE, PET, PS ve PVC olması, bu materyallerin hem üretim zinciri hem de tüketici ambalajı boyunca yoğun kullanımını yansıtmaktadır.

Ambalaj-gıda etkileşiminin mikroplastik geçişindeki rolü özellikle dikkat çekicidir. Paketleme filmlerinin ve tepsilerinin aşınma kaynaklı mikrokırıntı salımı hem laboratuvar ölçekli hem de saha çalışmalarında doğrulanmıştır. Kas dokusunun yağ ve protein içeriği yüksek olduğundan, polimerlerin yüzeye bağlanma eğilimi artmakta ve basit yıkamayla uzaklaştırılamayan bir kontaminasyon formu ortaya çıkmaktadır. İşlenmiş et ürünlerinde ise temas yüzeyi sayısı daha yüksek olduğundan (kıyma makinesi burguları, karıştırıcılar, dolum kılıfları, vakum tünelleri vb.) plastik kökenli partikül girişinin daha fazla olabileceği değerlendirilmektedir.

Analitik çalışmalar arasında yöntem farklılıkları bulunmakla birlikte, çoğu incelemede enzimatik veya alkali sindirim sonrası μ FTIR, Raman veya pyrolysis-GC/MS gibi spektroskopik tekniklerle polimer doğrulaması yapılmıştır. Ancak farklı araştırmalarda ölçüm birimlerinin (adet/kg vs. μ g/kg), sindirim protokollerinin ve algılama sınırlarının değişken olması, verilerin doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle et

dokusunda mikroplastik yükünü güvenilir biçimde değerlendirmek için, temiz oda koşullarında örnek hazırlama, kör/kontaminasyon kontrolleri ve matrise özgü yöntem doğrulamasının standardize edilmesi gereklidir.

Bugüne kadar yapılan çalışmaların genel çerçevesi, et ve et ürünlerinde mikroplastiklerin düşük ila orta düzeyde fakat yaygın olarak saptandığını göstermektedir. Kaynak açısından bakıldığında, çiftlik aşamasındaki yem-su-çevre temasının yanı sıra, kesim-işleme hattındaki sürtünme kaynaklı plastik aşınmasının ve nihai ambalaj materyallerinin önemli bir paya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle et üretim zincirinde mikroplastik kontrolü, yalnızca hayvanın yetiştirme koşullarını değil, gıda işleme teknolojilerinin tasarımını, ekipman seçimini, bakım protokollerini ve ambalaj materyallerinin özelliklerini birlikte değerlendiren bütüncül bir yaklaşım gerektirir.

1.1. Kırmızı Et

Hayvansal gıdalar içinde et ve et ürünleri, mikroplastik bulaşması açısından hem hayvanın yaşam boyu maruziyetine hem de kesim sonrası işlemlere bağlı riskler taşır. Mevcut araştırmalar, sığır ve domuz eti gibi kırmızı etlerde mikroplastik saptandığını; ancak bu plastiklerin bir kısmının hayvan dokularından gelmekle birlikte bir kısmının da paketlenme süreçlerinde bulaşabileceğini göstermektedir.

Hayvansal gıdalar arasında et ve et ürünleri, mikroplastik (MP) bulaşmasına hem yaşam boyu maruziyet (yem-su-çevresel çökelim) hem de kesim/işleme-ambalaj aşamalarındaki temaslar nedeniyle açıktır. Bugüne kadarki kanıtlar, sığır ve domuz etinde MP varlığını doğrulamakla birlikte, ölçülen parçacıkların bir bölümünün hayvanın dokularına endojen geçişle, bir bölümünün ise süreç ve ambalajdan eksojen bulaşmayla açıklanabileceğini göstermektedir (Akanda ve ark., 2025; Kedzierski ve ark., 2020).

Hollanda'da yayımlanan pilot çalışmada plastik ambalajlı 8 sığır eti ve 8 domuz eti örneği incelenmiş; sığır etlerinin 7/8'inde, domuz etlerinin 5/8'inde en az bir polimer türünde MP saptanmıştır (van der Veen ve ark., 2022). Bulguların çekirdeğini PE (polietilen) oluşturmuş; sığır etinde 150–7700 µg/kg, domuz etinde 88–690 µg/kg PE aralığı rapor edilmiştir. Bazı sığır eti örneklerinde PS ve PVC de bulunmuş; örneğin organik etiketli bir dana burgerde yaklaşık yaklaşık olarak 200 µg/kg PS ve 2600 µg/kg PVC ölçülmüştür. Domuz örneklerinde PS saptanmazken, tekil örneklerde PVC

(yaklaşık olarak 130 $\mu\text{g/kg}$) ve PP (63 $\mu\text{g/kg}$) rapor edilmiştir. Organik statünün “düşük plastik” anlamına gelmediği; tersine, en yüksek PE yüklerinden birinin organik etiketli işlenmiş üründe gözlenebildiği dikkat çekicidir. Elde edilen bu sonuçlar, ambalaj/süreç kaynaklı katkının önemine işaret etmektedir. Çalışmadaki tüm etler kesim sonrası plastik filmle pakletlendiğinden araştırmacılar, yüzey parçalarının uzaklaştırılması için dış tabakayı ayırmalarına karşın iç kısımda dahi MP bulunmasını, ambalajdan nüfuz eden veya işleme sırasında karışan partiküllerle uyumlu değerlendirmiştir (van der Veen ve ark., 2022). Benzer şekilde paketli gıdalarda MP salımı ve işlenmiş et ürünlerinde ambalaj/ekipman temasının rolü daha önce de vurgulanmıştır (Kedzierski ve ark., 2020). Kesimhane ve işleme hatlarında plastik eldiven, kesme tahtası, palet/kap gibi materyallerin sürtünme-aşınma ile mikro-kırıntı bırakabildiğini gösteren bulgular, et ürünlerinin zincirin geç safhalarında da kontaminasyona maruz kalabileceğini desteklemektedir (Chen ve ark., 2023; Habib ve ark., 2022). Öte yandan endojen katkı açısından aynı pilot çalışmada incelenen sığır ve domuzların tüm kan örneklerinde başta PVC, PE ve PS olmak üzere MP sinyalleri ölçülmüştür. Yem ve su üzerinden kronik maruziyet, düşük de olsa sistemik geçiş ve dokuya ulaşım olasılığını güçlendirmektedir (van der Veen ve ark., 2022). Bu çerçeve, kanatlı etinde dokusal MP varlığını gösteren deneysel çalışmalarla da uyumludur (Chen ve ark., 2023). Hayvanın türü, yaşı, beslenme deseni ve yetiştirme koşulları; maruziyetin dozu/süresi ve parçacığın boyut-morfoloji-polimer özellikleriyle birleşerek, kas dokusunda saptanabilir yükün geniş aralıkta değişmesine neden olabilir (Shelver ve ark., 2024; Monclús ve ark., 2022; Akanda ve ark., 2025). İran’ın farklı bölgelerinde kesilen sığır ve koyunlardan alınan et, karaciğer ve içkembe örneklerinde mikroplastik varlığını ayrıntılı şekilde inceleyen Bahrani ve ark. (2024), raman spektroskopisi ile yapılan analizlerde, her iki hayvan türünün tüm dokularında mikroplastiklerin bulunduğu belirlemişlerdir. En sık görülen polimer türlerinin polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) olduğu rapor edilmiştir. Mikroplastik miktarları dokuya göre değişmiş; özellikle içkembe ve karaciğer dokularında, kas dokusuna kıyasla daha yüksek MP seviyeleri tespit edilmiştir. Çocuklar ve yetişkinler için yapılan tahmini günlük MP alımı hesaplamalarında, vücut ağırlığına göre çocukların daha yüksek maruziyet gösterdiği bulunmuştur. Örneğin, sığır eti tüketiminde

günlük MP alımı çocuklarda 0,64 adet/kg canlı ağırlık/gün iken yetişkinlerde 0,48 adet/kg canlı ağırlık/gün olarak hesaplanmıştır. Araştırma; kesim hijyeni, çevresel toz, hayvanların yediği yemler ve barınak koşulları gibi faktörlerin dokulardaki mikroplastik miktarını etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Elde edilen bulgular, çiftlik hayvanlarının yalnızca çevreden değil, aynı zamanda yem ve barınak materyallerinden de düzenli olarak mikroplastiklere maruz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle et, sakatat ve diğer hayvansal ürünlerdeki mikroplastik varlığının gıda güvenliği ve halk sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Kırmızı ette raporlanan polimerler çoğunlukla PE, PVC, PS, PET ve PP gibi yaygın ambalaj/süreç plastikleridir; bu durum hem hammaddeden hem de işleme–ambalajdan gelen çoklu girdilerle uyumludur (Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Saha verileri ayrıca, ruminant ve domuz gübrelerinde lif–film–fragment morfolojilerinde MP çeşitliliğini göstermekte; hayvanların üretim ortamında (yem torbası lifleri, silaj örtüsü kırıntıları, toz-aerosol) çoklu kaynaklara temas ettiğini düşündürmektedir (Beriot ve ark., 2021; Mohammadi ve ark., 2025). Bu bağlamda, kırmızı ette ölçülen MP’nin tek kaynağa indirgenemeyeceğini; çok-etmenli bir kontaminasyon tablosunun söz konusu olduğunu ortaya koymaktadır.

Metodolojik olarak çalışmalar; örnek hazırlamada enzimatik/kimyasal sindirim, polimer tanımlamada μ FTIR/Raman veya pyrolysis-GC/MS yaklaşımlarına dayanmaktadır. Bir kısmı kütle (μ g/kg), bir kısmı sayı (adet/kg) temelli raporlama yaptığından, sonuçların karşılaştırılması sınırlıdır; ayrıca örnekleme hijyeni ve “kör” kontrolleri özellikle düşük yüklerde belirleyici rol oynamaktadır (Toto ve ark., 2023; Abid ve ark., 2025). Bu nedenle, kırmızı ette MP’nin prevalans ve yüküne ilişkin güvenilir kıyaslamalar için standardizasyon gereklidir. Genel tablo, kırmızı ette MP’nin düşük–orta düzeyde fakat yaygın bir olgu olabileceğini; yükün hayvandan hayvana ve ürün tipine göre geniş aralıkta değiştiğini; işlenmiş/paketli ürünlerde ambalaj–süreç katkısının belirginleşebildiğini göstermektedir. Üretici ve denetim açısından, yem ve su hijyeninin yanı sıra kesim–işleme ekipmanı ve ambalaj materyallerinde aşınmayı azaltan seçimler, yüzey yenileme/bakım protokolleri ve MP-odaklı örnekleme/izleme planları anlamlı fayda sağlayacaktır (van der Veen ve ark., 2022; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025).

1.2. Beyaz Et

İnsan beslenmesinde gıdalar yoluyla maruziyet en önemli bulaşma yolu olup, deniz ürünleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına karşın (Smith ve ark., 2018; Xu ve ark., 2020), kırmızı et ve özellikle kümes hayvanları etindeki durum uzun süre ihmal edilmiştir. Oysa tavuk, dünya genelinde en fazla tüketilen et kaynağıdır (Whitton ve ark., 2021). Yakın zamanda, tavuk gübresinde MP varlığına işaret eden çalışmalar (Wu ve ark., 2021) ile tavuk etinde kesim tahtalarından kaynaklanan polietilen bazlı MP bulaşmasının ortaya konması (Habib ve ark., 2022), kanatlı etinde mikroplastik varlığının insan sağlığı açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Etlik piliç, yumurta tavuğu, hindi ve benzeri kanatlı türleri; kısa yaşam döngüleri, yüksek yemden yararlanma oranları ve yoğun yetiştirme koşulları nedeniyle mikroplastiklerin (MP) vücutta birikimi açısından kendine özgü bir maruziyet profili sergilemektedir. Kanatlılarda özgün bir maruziyet profili oluşmasının temelinde ise kısa fakat yoğun yaşam döngüsü boyunca yüksek miktarda yem tüketmeleri, sindirim kanalındaki hızlı geçiş süreleri ve metabolik hızlarının diğer çiftlik hayvanlarına kıyasla belirgin şekilde yüksek olması yatmaktadır. Sahadan elde edilen bulgular ve kontrollü deneysel modeller, mikroplastiklerin (MP) kanatlılarda başlıca sindirim sistemi yoluyla alındığını ve daha sonra kas dokusu da dâhil olmak üzere çeşitli organ ve dokularda izlenebildiğini ortaya koymaktadır. Pakistan’da sekiz farklı çiftlikten toplanan 24 etlik tavuğun kursak ve taşlık içeriklerinde toplam 1227 mikroplastik (MP) parçacığı tespit edilmiştir. Ortalama olarak bir tavuğun kursağında yaklaşık olarak 18, taşlığında ise yaklaşık olarak 33 adet MP parçacığı bulunmuştur. Partiküllerin çoğunluğu 300–500 µm boyut aralığında yer almakta olup, baskın morfolojiyi kırıntılar oluşturmaktadır (kursakta %64, taşlıkta %53). Polimer bileşimi açısından en yüksek oranı polivinil klorür (PVC, %51.2) göstermiş, bunu düşük yoğunluklu polietilen (LDPE, %30.7), polistiren (PS, %13.6) ve polipropilen homopolimer (PPH, %4.5) izlemiştir. Araştırmacılar, bu bulguları büyük ölçüde yem kaynaklı kontaminasyonla ilişkilendirmiştir (Bilal ve ark., 2023). Benzer biçimde, sahadan gelen gözlemler ve deneysel çalışmalar, tarımsal üretim alanlarında kullanılan plastik film ve bağ materyali kırıntılarının mer’a ve kaba yem akışına karışabildiğini ortaya koymuştur. Meksika’daki saha verileri,

mikroplastiklerin topraktan solucanlara ve oradan da tavuklara geçişini gösterirken (Huerta Lwanga ve ark., 2017), İspanya'daki gözlemler ise sebze tarlalarında malç film kalıntılarıyla beslenen koyunların dışkılarında yoğun mikroplastik varlığına işaret etmiştir (Beriot ve ark., 2021). Bu bulgular, hayvanların doğrudan plastik kalıntılarını tüketebildiğini ve sindirimsel maruziyetin süreklilik gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kas dokusunda mikroplastik birikimine dair kanıtlar hem saha verileri hem de kontrollü deneysel çalışmalarla desteklenmektedir. Büyük ölçekli bir piliç işletmesinden alınan göğüs ve but etlerinde tüm numunelerde mikroplastikler saptanmış; polimer kimliklendirmesi özellikle polistiren (PS) ve poliamid (PA6/PA66, naylon) lehine sonuçlanmıştır. Deneysel olarak, etlik piliçlere 21–35 gün boyunca PS-MP verilmesi göğüs kasında anlamlı düzeyde birikimi doğrulamıştır. Bu maruziyet, canlı ağırlık ve kas kütlesinde artışa yol açarken, et kalitesini belirleyen parametrelerde bozulma, enerji ve yağ metabolizmasında düzensizlikler, oksidatif stres belirteçlerinde yükselme ve nörotoksosite ile ilişkili genlerin ekspresyonunda değişiklikler ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, dokuya giren poliamidlerin kimyasal parmak izinin bir bölümünün PA6/PA66 olması, yem torbalarının iç astarlarının olası bir kaynak olabileceğini düşündürmektedir (Chen ve ark., 2023).

Kesim sonrası zincir, kanatlı etindeki mikroplastik yükünü artırabilecek ikinci bir eksen oluşturmaktadır. Fransa'da yapılan bir çalışmada, ekstrüde polistiren (XPS) tepsilerde paketlenen tavuk etlerinde 4.0–18.7 adet/kg düzeyinde mikroplastik saptanmış; FTIR analizleri bu parçacıkların doğrudan paketleme materyali kaynaklı polistiren olduğunu doğrulamıştır. Ortalama 300–450 µm boyutunda olan bu partiküller, et yüzeyine sıkıca yapıştıkları için basit yıkama ile uzaklaştırılamamış ve ambalaj–gıda temasında sürtünme/aşınma yoluyla kalıcı bir transferin gerçekleşebildiğini ortaya koymuştur (Kedzierski ve ark., 2020).

Ambalaj–gıda arasındaki potansiyel mikroplastik transferinin kaynağını geriye doğru izlemek için Raman tabanlı polimer kimliklendirmesi kullanılmakta; bu yaklaşımda ambalaj polimeri ile gıda matrisinde saptanan polimerlerin eşleşmesi, belirli korelasyon eşikleri üzerinden doğrulanabilmektedir (Devilliers ve ark., 2024). Tarama ve izleme açısından yapılan fizibilite çalışmalarında, ATR-MIR spektroskopisinin yüksek katkı düzeylerini (%1–10 arası) güvenilir biçimde ayırt edebildiği, ancak düşük

düzeylerde (%0.02–1) doğru saptama oranlarının sınırlı kaldığı ve bu nedenle yöntem hassasiyetinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir (Huang ve ark., 2020). Kas gibi protein ve yağ bakımından zengin gıda matrislerinde ise polimer bütünlüğünü koruyarak matrisi uzaklaştırmaya yönelik ılımlı sıcaklık prensibine dayalı örnek hazırlama protokolleri öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, %10 KOH çözeltisinde 40 °C’de 48 saat sindirim ve ardından %30 H₂O₂’nin oda sıcaklığında kademeli eklenmesiyle gerçekleştirilen çift sindirim yöntemi, polimerlerin yapısını bozmadığı gibi, matrisi etkin biçimde ortadan kaldırarak mikroplastiklerin güvenilir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır (Devilliers ve ark., 2024).

Piyasada satılan kanatlı ürünlerinde bölgesel ölçekte de mikroplastik varlığı doğrulanmıştır. Orta Doğu’da marketlerden alınan bütün tavuk örneklerinde 0,03–1,19 parça/gram aralığında mikroplastik saptanmış; bu yük aynı çalışmadaki balık örneklerinde raporlanan 0,014–2,6 parça/gram düzeyleriyle benzer bulunmuştur (Akanda ve ark., 2025). Güncel derlemeler, kanatlıların kas, karaciğer ve gastrointestinal dokularında mikroplastik birikimlerinin yaygın biçimde raporlandığını ortaya koymaktadır (Corte Pause ve ark., 2024). Ayrıca, tavuklarda yapılan [¹⁴C]-polistiren deneyleri, alınan dozun büyük kısmının hızla dışkıyla atıldığını, ancak eser miktarda polistirenin kana ve yumurta bileşenlerine geçtiğini göstermiştir. Bu bulgular, sindirim yoluyla alınan mikroplastiklerin sınırlı da olsa dolaşıma taşınabileceğini ve kas gibi periferik dokularda düşük düzeyde birikimle uyumlu olduğunu düşündürmektedir (Shelver ve ark., 2024).

Milne ve ark. (2024) tarafından yapılan analizlerde, tavuk göğsünde kilogram başına 100 adet mikroplastik parçacığı bulunurken, tavuk nugget örneklerinde bu değer kilogram başına 310 parçacığa ulaşmıştır. Nuggetlerde gözlenen daha yüksek mikroplastik yoğunluğu, özellikle işleme aşamalarında oluşabilecek ek kontaminasyon riskine işaret etmektedir. Nitekim, ruminantlarda bildirilen bulgulara paralel olarak, kanatlı etinin yüzeyine mikroplastiklerin yapışabildiği ve et işleme süreçlerinin hayvansal ürünlerde önemli bir mikroplastik kaynağı olabileceği çeşitli çalışmalar tarafından yeniden vurgulanmıştır.

Kanatlı etlerinde saptanan polimer tayfı, üretim zincirinin farklı aşamalarını yansıtan çok yönlü bir kontaminasyon desenine işaret etmektedir. Yem ve çiftlik kaynaklı polipropilen (PP), polietilen (PE) ve poliamid (PA) ile

ambalaj, tepsi/film ve proses yüzeyleriyle ilişkili polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) bu tayfin başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır (Chen ve ark., 2023; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Bu çoklu giriş yolları, kontaminasyonu tek bir kaynağa indirgemeyi güçleştirmekte, dolayısıyla gıda güvenliği değerlendirmesinde yalnızca 'parçacık varlığına' değil, maruziyetin biyolojik işlevsel sonuçlarına da odaklanmayı gerekli kılmaktadır. Nitekim, polietilen mikroplastiklerle yapılan M-ARCOL adlı yapay insan kalın bağırsak modelinde, bağırsakta normalde düşük miktarda bulunan bazı zararlı bakterilerin (Enterobacteriaceae ve Desulfovibrionaceae) çoğaldığı belirlenmiştir. Ayrıca kötü kokuya neden olan skatol isimli bileşiğin üretimi artmış ve bağırsak mikrobiyotasının ürettiği metabolitlerin genel yapısında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Kısa vadede bağırsak bariyer bütünlüğünde anlamlı bir değişiklik görülmemekle birlikte, bu mikrobiyota ve metabolit değişimleri, kanatlı ürünleri ve ambalajı kaynaklı mikroplastik maruziyetinin değerlendirilmesinde özellikle mikrobiyota bileşimi ve skatol gibi belirli metabolitlerin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır (Fournier ve ark., 2023).

Toplam bulgular, kanatlı etlerinde mikroplastik (MP) varlığının hem endojen (yem, çevresel maruziyet) hem de eksojen (işleme ve ambalaj) girdilerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yükün düzeyi; hayvanın üretim koşulları, kullanılan yem ve ambalaj materyali ile kesim ve işleme hattındaki hijyen uygulamalarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kaynak kontrolü için yem ambalajlarında aşınmaya dirençli malzemelerin tercih edilmesi ve kapalı transfer sistemlerinin uygulanması, kesim–işleme zincirinde plastik temasını en aza indiren ekipman seçimi ve düzenli bakım önlemleri, ayrıca ambalaj–gıda polimer eşleşmesini Raman tabanlı kimliklendirme ve korelasyon eşikleri ile iz sürme yaklaşımları önerilmektedir (Devilliers ve ark., 2024; Chen ve ark., 2023; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Kanatlı etlerinde mikroplastik kirliliği artık çeşitli saha ve deneysel çalışmalarla kesin olarak gösterilmiştir. Bununla birlikte, bu yükün baskın kaynağının yem ve çevresel maruziyet gibi endojen girdilerden mi, yoksa kesim ve ambalaj süreçleri gibi eksojen girdilerden mi kaynaklandığı henüz netlik kazanmamıştır. Mevcut veriler, paketlenmiş tavuk etlerinde saptanan lif formundaki partiküllerin ambalajdan geçtiğini

gösterirken, tavukların sindirim sisteminde yüksek sayıda mikroparçacık bulunması içsel bulaş potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekte karkas ve kas dokularına yönelik ayrıntılı araştırmalar, bu kaynak katkılarının görelî önemini aydınlatmada kritik rol oynayacaktır.

1.3. İşlenmiş Et Ürünleri ve Diğer Gıdalar

Sucuk, sosis, salam/jambon gibi işlenmiş et ürünleri, ham maddeden (et) gelebilecek içsel mikroplastik (MP) izlerine ek olarak, üretim hattındaki çok sayıda plastik temas yüzeyi nedeniyle eksojen kontaminasyona açıktır. Kıyma makinelerinin hazne ve burguları, plastik kaplı karıştırıcı kanatlar, taşıma bantları, tezgâh ve kesme tahtaları, koruyucu eldivenler ile dolum–vakum–kaplama aşamalarında kullanılan kılıf, tepsi ve film materyalleri sürtünme/aşınma yoluyla ürüne mikrolif ve mikrokırıntı bırakabilmektedir. Nitekim, paketlenmiş tavuk etlerinde polistiren esaslı ekstrüde köpük (XPS) tepsilerden lif/kırıntı salımının yüzeye geçtiği deneysel olarak gösterilmiştir (Kedzierski ve ark., 2020). Benzer şekilde, vakum paketlenmiş salam, bacon ve mortadella örneklerinde düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) depolamanın 9–28. günleri arasında et yüzeyine geçtiği Raman spektroskopisi ile doğrulanmıştır (Katsara ve ark., 2022). Ayrıca, plastik kesme tahtalarından polietilen parçacıklarının tavuk etine transferi belgelenmiş, bunun işlenmiş/kırmızı et ürünleri için de olası bir risk olduğu vurgulanmıştır (Habib ve ark., 2022; Chen ve ark., 2023). İran’da yapılan güncel bir çalışmada, piyasadaki en çok tüketilen sosis markalarında 10–175 partikül/kg düzeyinde MP bulunmuş; partiküllerin çoğunluğu lif formunda olup başlıca polimerler polietilen (PE) ve polistiren (PS) olarak belirlenmiştir (Pirsaheb ve ark., 2024). Bu bulgular, işlenmiş et ürünlerinde MP yükünün yalnızca hammadde değil, aynı zamanda proses ve ambalaj kaynaklı çoklu girişlerle şekillendiğini göstermektedir. Dolayısıyla gıda güvenliği değerlendirmelerinde, hem ekipman/ambalaj kaynaklı sürtünme-aşınma transferleri hem de ürünün depolama koşulları dikkate alınmalıdır (Kutram-Muniasamy ve ark., 2020; Oyedun ve Lawal, 2023).

İşlenmiş et ürünlerinde bulunan yağ, protein ve baharatlar ile ambalajdan gelebilecek plastik kalıntıları, mikroplastik analizlerinde yanlış sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle güvenilir analiz yapabilmek için temiz oda koşullarında çalışmak, ayrıca mikroplastik içermemesi gereken kontrol

örnekleri (blank) ve işlem boşları kullanmak gerekir. Böylece sahte pozitif sonuçların önüne geçilebilir (Toto ve ark., 2023). Ambalajdan gıdaya olası geçişleri izlemek için, üründe bulunan polimer ile ambalaj polimerinin Raman veya FTIR spektrumları karşılaştırılarak korelasyon eşikleri üzerinden eşleştirme yapılabilir (Devilliers ve ark., 2024). Hızlı tarama için ATR-MIR yöntemi yüksek düzeydeki katkıları güvenilir biçimde tanıyabilmektedir ($\geq 1\%$), ancak düşük düzeylerin ($< 1\%$) doğru şekilde saptanabilmesi için yöntem hassasiyetinin artırılması gerekmektedir (Huang ve ark., 2020). Bu nedenle, kimyasal ve enzimatik sindirim protokollerinin doğrulanması ve birden fazla spektroskopik yöntemle teyit yapılması, işlenmiş ürünlerde mikroplastiklerin güvenilir biçimde belirlenmesi için temel yaklaşımlar arasında yer almaktadır.

Diğer gıdalar içinde hayvansal kökenli bal ve süt gibi ürünlerde de mikroplastik raporları artmaktadır. Balda, arıların çevreden taşıdığı lif formundaki parçacıklar başat olup Almanya’da market ballarında ortalama yaklaşık olarak 166 parça/kg düzeyi bildirilmiştir (Liebezeit ve Liebezeit, 2013). Tuz ve şeker gibi bileşenlerdeki MP’ler de işlenmiş et ürünlerine dolaylı giriş kapısı olabilir (Peixoto ve ark., 2019). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), gıda zinciri boyunca MP tespitlerine ilişkin kanıt birikimi nedeniyle konuyu izlemektedir (EFSA, 2016). Bu çerçevede, işlenmiş et ürünlerinde MP riskinin, ham madde kalitesi + işlem hijyeni + ambalaj seçimi üçlüsünün bileşesiyle belirlendiği söylenebilir (Kutram-Muniasamy ve ark., 2020).

2. SÜT ve SÜT ÜRÜNLERİNDE MİKROPLASTİKLER

Çiğ süt, hayvandan elden edildiği haliyle, herhangi bir işleme tabi tutulmamış süttür. Süt ve ondan üretilen peynir, yoğurt, tereyağı, krema, sade yağ (ghee), ayran ve dondurma gibi ürünler, insan beslenmesinde temel bir yere sahiptir (Ahmad ve Aleem, 2023). Besin zincirinin kritik bir bileşeni olan süt, kalsiyum, protein ve çeşitli vitaminler başta olmak üzere birçok temel besin öğesinin doğal kaynağıdır ve aynı zamanda çok sayıda süt ürününün ana hammaddesini oluşturur. Bununla birlikte, süt üretiminde ortaya çıkabilecek her türlü kontaminasyon hem bu ürünlerin besinsel bütünlüğünü hem de tüketici sağlığını olumsuz yönde etkileyebileceğinden dikkatle değerlendirilmelidir (Górska-Warsewicz ve ark., 2019; Anika ve ark., 2025).

Süt; endojen (hayvan dolaşımından sınırlı geçiş) ve eksojen (sağım–toplama–işleme–ambalaj) olmak üzere iki ana yoldan MP içerebilir. Hayvan çalışmalarının bir kısmı, belirli senaryolarda süte geçen fraksiyonun %1’in altında kalabileceğine işaret eder; ancak bu oran tür, yem ve polimer tipine göre değişebilir ve saha doğrulaması gerektirir (Abid ve ark., 2025). Pratikte sütün MP yükünü çoğu kez ekipman ve ortam belirler: sağım başlıkları, hortum/contalar, vana–filtre elemanları, tank ve dolum hatları ile hava-toz yükü başlıca kaynaklardır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Toto ve ark., 2023).

Son yıllarda dünya genelinde yapılan çalışmalar, süt ve süt ürünlerinde mikroplastik (MP) kontaminasyonunun yaygın ve giderek önem kazanan bir gıda güvenliği sorunu olduğunu ortaya koymaktadır. Bangladeş’in Dakka bölgesinde beş farklı süt türü üzerinde yürütülen çalışmada 130–1666.73 MP/L düzeyinde mikroplastik saptanmış; parçacık boyutlarının $>100\ \mu\text{m}$ olduğu ve parçacıkların çoğunun lif, fragment ve pellet formunda olup polipropilen (PP), düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen (LDPE, HDPE) kaynaklı olduğu belirlenmiştir (Anika ve ark., 2025). Bangladeş’in güneybatı bölgesinde markalı sütlerde yapılan bir diğer araştırma ise 120–570 MP/kg ve 95–250 MP/L düzeylerinde kontaminasyon bildirmiş; parçacıkların $>50\ \mu\text{m}$ boyutunda olduğu ve özellikle poliamid, polietilen, polistiren, naylon 6 ve polipropilen gibi polimerlerin ağırlıkta olduğunu göstermiştir (Chakraborty ve ark., 2024). Meksika’da tam yağlı, yarım yağlı, hafif ve laktozsuz sütleri kapsayan çalışmada 3–11 MP/L düzeylerinde mikroplastik saptanmış; partiküllerin $>11\ \mu\text{m}$ boyutunda, mavi, kırmızı, kahverengi, yeşil ve pembe renklerde lif ve fragment formunda olduğu ve polifenilsülfon (polysulfone) polimerinin baskın olarak tespit edildiği rapor edilmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Avrupa’nın sekiz ülkesinde yağsız süt tozu üzerinde yapılan çalışmada 536 MP/kg düzeyinde mikroplastik bulunmuş; partiküllerin $>60.50\ \mu\text{m}$ boyutunda olduğu, siyah, mavi, kahverengi, fuşya, yeşil ve gri renklerde fiber, küresel ve düzensiz fragman formunda bulunduğu ve bunların polipropilen, polietilen, polistiren ve polietilen tereftalat kökenli olduğu belirlenmiştir (Visentin ve ark., 2024). İsviçre’de bütün sıvı süt, yağsız süt ve süt tozlarını kapsayan çalışmada 204–1004 MP/100 mL arasında mikroplastik rapor edilmiş; partikül boyutlarının $\geq 5\ \mu\text{m}$ olduğu, çok farklı renklerde lifsi fragmentlerden oluştuğu ve polipropilen, polietilen, polistiren,

poliamid ve polimetilmetakrilat gibi polimerleri içerdiği açıklanmıştır (Da Costa Filho ve ark., 2021). Ekvador'da yağsız sütlerde yapılan araştırmada MP düzeyinin 16–53 MP/L arasında değiştiği; parçacık boyutlarının 2.48–183.37 µm aralığında olduğu ve polipropilen, düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen ile poliakrilamid polimerlerinin tespit edildiği bildirilmiştir (Díaz-Basantes ve ark., 2020). Çin'de süt tozu üzerine yapılan bir başka çalışma, 1–11 MP/100 g düzeyinde mikroplastik varlığını ortaya koymuş; parçacıkların >50 µm boyutunda, şeffaf, beyaz ve mavi renklerde olup lif ve fragment formunda bulunduğu belirlenmiştir. Polietilen, polipropilen ve polietilen tereftalat bu ürünlerde baskın polimerlerdir (Zhang ve ark., 2023). İtalya'da anne sütü örneklerinde 3–11 MP/L düzeyinde mikroplastik tespit edilmiş; parçacık boyutlarının 2–12 µm olduğu, özellikle mavi ve turuncu–sarı renklerde fragmentler içerdiği ve polietilen, polivinil klorür ile polipropilenin öne çıktığı görülmüştür (Ragusa ve ark., 2022). Çin'de bebek beslenmesinde kullanılan mama şişelerinde yapılan çalışmada 2080–8220 MP/L gibi son derece yüksek düzeylerde mikroplastik bulunmuş; partiküllerin 20–50 µm aralığında olduğu ve polietilen tereftalat ile akrilat türevi polimerlerin yoğun olarak tespit edildiği rapor edilmiştir (Liu ve ark., 2023). Hindistan'da markalı süt ürünlerinde yapılan iki farklı çalışmada ise 25–30 MP/200 mL ve 164–427 MP/L arasında mikroplastik düzeyleri bildirilmiş; partiküllerin 2–12 µm ve <500 µm aralıklarında olduğu, kırmızı, mavi, mor, pembe ve yeşil renklerde lif, fragment ve pellet formunda bulunduğu ve polietilen glikol, polibütadien, polivinil klorür, polietilen, polipropilen ve poliakrilamid gibi polimer tiplerinin belirgin olduğu görülmüştür (Badwanache ve Dodamani, 2024; Kiruba ve ark., 2022).

Bu veriler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, süt ve süt ürünlerinde mikroplastik varlığının küresel ölçekte yaygın ve değişken bir sorun olduğu; ürün tipi, üretim süreci, paketlenme materyali ve bölgesel faktörlere bağlı olarak MP düzeylerinin ve polimer bileşimlerinin geniş bir aralıkta değiştiği anlaşılmaktadır. Bulgular, özellikle polietilen, polipropilen, polistiren, poliamid ve PET gibi yaygın sanayi polimerlerinin süt zincirine farklı aşamalarda karışabildiğini göstermekte ve bu durumun gıda güvenliği ile hayvansal üretimde halk sağlığı açısından önemli bir araştırma alanı oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nden alınan 588 çiğ süt örneğinin

incelendiği çalışmada örneklerin %89’unda mikroplastik tespit edilmiştir. Parçacıkların %52’si lif formundadır; boyutları 50 µm–mm aralığındadır. ATR-FTIR analizinde yedi polimer tipi belirlenmiş, bunların içinde etilen-propilen kopolimer (EPC) %77 ile en baskın bileşen olmuştur. Bunu PTFE, poliamid ve akrilik türevler izlemiştir. EPC’nin modern sağım sistemlerindeki hortum ve contaların aşınmasından; PTFE’nin ise valf ve kaplama malzemelerinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Sanayi bölgelerinden (İstanbul, Bursa, Kocaeli) alınan sütlerdeki MP miktarı kırsal örneklere göre belirgin biçimde yüksektir; bu durum ekipman profili ve çevresel toz yüküyle ilişkilendirilmiştir (Rbaibi Zipak ve ark., 2024).

Hollanda’da yapılan pilot bir çalışmada ise elle sağılmış beş örnekten birinde PMMA (polimetil metakrilat) 0,5 µg/g düzeyinde saptanırken, tank sütlerinde ölçümlerin çoğu LOQ (Limit of Quantification) yani kantitatif tayin sınırının altında kalmıştır. Buna karşılık, perakende tam yağlı pastörize sütlerde PVC (13 µg/g) ve PE (21 µg/g) tespit edilmiştir. Araştırmacılar, yağ fazının mikroplastikleri askıda tutma eğiliminin bu farklılığa katkı sağlayabileceğini belirtmiştir (van der Veen ve ark., 2022). Farklı araştırmalarda, çiğ ve ticari sütlerde PP, PE, PA, PET, PTFE, PES, PSU, EVA ve PU gibi çok çeşitli polimer türleri bildirilmiştir. Bu çeşitlilik, sütün birden fazla plastik yüzeyle temas ettiğini ve üretim süreçlerinin her tesis için kendine özgü “polimer imzası” oluşturabileceğini göstermektedir (Pironti ve ark., 2021; Basaran ve ark., 2023; Corte Pause ve ark., 2024; Ragusa ve ark., 2022). Bazı bölgelerde çiğ süte su eklenmesi uygulaması, suyun kendi MP yükü nedeniyle ikincil bir bulaşma kaynağı oluşturabilir. Ayrıca filtrelerin düzenli temizlenmemesi veya değiştirilmemesi, gözeneklerde biriken parçacıkların akışla süte karışmasına yol açabilir (Kutram-Muniasamy ve ark., 2020). İşleme sonrası ürünlerde (pastörize/UHT süt, yoğurt, peynir vb.) üretim hattı ve ambalaj kaynaklı kontaminasyon devam edebildiğinden, hat–su–ambalaj etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir (Toto ve ark., 2023; Mondal ve ark., 2024).

İtalya’da gerçekleştirilen ve beş ticari markaya ait farklı tiplerde toplam 20 süt ürününün incelendiği çalışmada, örneklerin üçte ikisinden fazlasında mikro lif (MF) kontaminasyonu tespit edilmiştir. Ürünlerdeki lif seviyeleri %67,5’inde 1–27 lif/100 mL aralığında değişmiş olup, hem sentetik (polietilen, polyester, akrilik) hem de doğal/rejenere selülozik lifler

doğrulanmıştır. Süt zincirindeki kontaminasyonun kaynağı olarak filtreler, işleme hatları, membran sistemleri, çalışan kıyafetleri ve ortam havası gibi üretim zinciri unsurlarının öne çıktığı belirtilmiştir. Çalışmada özellikle “kan-süt bariyerinin” bu tür liflerin doğrudan meme dokusundan süte geçişini sınırladığı vurgulanmakta; dolayısıyla tespit edilen liflerin büyük ölçüde çevresel ve teknolojik süreçlerden kaynaklanan dış bulaşmalar olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca UHT sütlerde ve özellikle yağsız ürünlerde lif sayılarının daha yüksek bulunması, süt işleme süreçlerinin karmaşıklığı ve termal-mekanik etkilerin kontaminasyonu artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, sütteki mikropplastik ve mikro lif varlığının daha çok işlem zincirindeki ekipman kaynaklı fiziksel yıpranma ve çevresel döküntülerle ilişkili olduğunu ve üretim tesislerinde bütüncül kontrol önlemlerinin önemini ortaya koymaktadır (Santonicola ve ark., 2025). Süt tüketiminden kaynaklanan mikrofiber (MF) maruziyet düzeyi, bireylerin tüketim alışkanlıklarına ve yaş gruplarına göre değişiklik gösterebildiğinden, özellikle çocukların daha yüksek düzeyde maruziyete sahip olabileceği değerlendirilmektedir. Araştırmada tespit edilen 350–1000 µm boyutundaki MF’lerin yaygınlığı, bir yandan tüketici açısından nispeten daha güven verici olabilir; zira bu büyüklükteki liflerin normal koşullarda bağırsak epitelinden geçerek emilmesi beklenmemektedir. Ancak diğer yandan, bu liflerin sindirim sürecinde daha küçük parçalara ayrılabilmesi ve böylece vücudun farklı organlarına taşınma potansiyeli taşıdığı da göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, süt üretim zincirinin tamamının detaylı biçimde incelenmesi, MP ve MF kontaminasyonuna yol açabilecek kritik proses aşamalarının belirlenmesi ve buna yönelik etkili azaltma ile kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Mevcut bulguların sınırlılığı göz önünde bulundurulduğunda, konuya ilişkin daha kapsamlı araştırmalara duyulan ihtiyaç devam etmektedir.

İtalya’da yürütülen ve süt, taze peynir ve olgun peynir örneklerinde mikropplastik (MP) varlığını değerlendiren çalışmada, toplam 28 ürün ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve MP kontaminasyonunun hem niteliksel hem de niceliksel özellikleri ortaya konmuştur. Çalışmada 20 farklı polimer sınıfı tanımlanmış olup en sık rastlanan türün polietilen tereftalat (PET) olduğu, bunu polietilen (PE) ve polipropilen (PP) polimerlerinin izlediği bildirilmiştir. Tespit edilen MP’lerin büyük çoğunluğu 150 µm’den küçük boyutlarda, özellikle de 51–100 µm aralığında (%33,8) yoğunlaşmıştır. Parçacıkların

önemli bir kısmı irregüler (düzensiz) şekilli (%77,4) ve gri renkte (%68,4) bulunmuş, bu morfoloji işlem hatları, plastik ekipman yüzeyleri ve ambalaj materyallerinin mekanik aşınmasıyla ilişkili olası kaynakları desteklemiştir. Ürün türüne göre bakıldığında olgun peynirde 1857 MP/kg, taze peynirde 1280 MP/kg ve sütte 350 MP/kg düzeylerinde kontaminasyon saptanmıştır. Peynirlerdeki yüksek değerler, peynir yapım sürecinin (süzme, pıhtı oluşturma, presleme, olgunlaştırma) katı madde oranını artırarak mevcut MP'leri yoğunlaştırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bulgular genel olarak, farklı süt ürünlerinde plastik temelli ekipman, ambalaj ve işlem yüzeylerinin MP kontaminasyonunda temel rol oynadığını ve işleme adımlarının yoğunluğu arttıkça MP seviyelerinin de yükseldiğini göstermektedir (Visentin ve ark., 2025)

Türkiye’de bir süt işletmesinde ayran üretim hattı boyunca yapılan proses-içi izlemeler, mikroplastik (MP) yükünün yalnızca hammaddeden değil, üretim adımlarının kendisinden de önemli ölçüde kaynaklandığını göstermiştir. Çalışmada en yüksek MP yoğunluğu, salamura suyu (43 MP/100 mL), tuz (33 MP/100 g) ve pastörizasyon–homojenizasyon aşaması (26 MP/100 mL) gibi yardımcı girdiler ve ısı- mekanik aşamalarla ilişkili noktalarda tespit edilmiştir. Final ürün olan ayranda ise 18 MP/100 mL düzeyinde kontaminasyon belirlenmiştir. Araştırmacılar, günler arası hammadde (süt) varyasyonunun bulunmasına rağmen MP yükünü asıl belirleyen unsurların kullanılan suyun kaynağı, tuzun kalitesi, polimer esaslı contalar, hortumlar, vana ve filtre yüzeyleri gibi ekipman elemanları olduğunu vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, özellikle ayran gibi fermente süt ürünlerinde yardımcı malzemelerin (su, tuz, salamura) ve metal–plastik temas yüzeylerinin düzenli olarak izlenmesinin ve kontrol edilmesinin, proses kaynaklı MP bulaşmasını azaltmak açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Buyukunal ve ark., 2023).

Süt ve süt ürünlerinde mikroplastiklerin güvenilir biçimde tespit edilmesi uzun süre mümkün olmamış, özellikle 20 µm’den küçük parçacıkların ayrıştırılması ve polimer yapısının doğrulanması metodolojik sınırlıklar nedeniyle güçlük yaratmıştır. Da Costa Filho ve ark. (2021), enzimatik–kimyasal sindirim ile mikro-Raman spektroskopisini birleştiren analitik bir protokol geliştirerek bu boşluğu dolduran ilk çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Bu bütünleşik yöntem, süt matrisinin kontrollü şekilde

parçalanmasını sağlarken polimer bütünlüğünü korumakta ve ≥ 5 μm boyutundaki mikroplastiklerin yüksek uzaysal hassasiyetle tanımlanmasına imkân vermektedir. Araştırmacılar, yöntemin ham süt, pastörize süt ve toz süt dâhil farklı ürünlerde güvenilir şekilde çalıştığını doğrulamış ve böylece süt ürünlerinde küçük boyutlu mikroplastiklerin analitik olarak kanıtlanabilir hale geldiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, özellikle daha önceki μFTIR veya görsel taramaya dayalı çalışmaların tespit edemediği küçük boyutlu parçacıkların ortaya konması açısından önemli bir metodolojik ilerleme olarak değerlendirilmektedir.

Rbaibi Zipak ve ark. (2022) İstanbul’da orta ölçekli bir yoğurt üretim tesisinde yürüttüğü çalışmada, üretim hattındaki 12 proses aşamasından/örnekleme noktasından alınan numunelerde toplam 171 mikroplastik (MP) parçacığı belirlenmiş ve MP yoğunluğunun 20–580 parçacık/L aralığında değiştiği gösterilmiştir. En yüksek kontaminasyon düzeyi yoğurt kaplarının doldurulması aşamasında saptanmış; süt kabul, pastörizasyon ve homojenizasyon basamakları da görece yüksek MP yükü taşıyan kritik noktalar olarak dikkat çekmiştir. Mikroskopi, SEM ve ATR-FTIR analizleriyle tanımlanan polimer türleri arasında etilen-propilen, neopren, polikrilamid ve polietrafloroetilen (PTFE) gibi endüstriyel polimerler yer almakta; tartışma bölümünde bu bileşiklerin işletmede kullanılan contalar, boru ve hortum sistemleri, filtrasyon membranları, valfler ve diğer plastik temas yüzeyleriyle ilişkili muhtemel kaynaklar olabileceği belirtilmektedir. Çiğ süt ve yoğurt kaplarında özellikle yüksek MP konsantrasyonları bildirilmiş; bu durumun süt taşımada kullanılan tankerler, depolama tankları, lastik aksamlar ve temizlik işleminde kullanılan su ve kimyasallar gibi süreç bileşenlerinden kaynaklanabileceği vurgulanmıştır. Parçacıkların önemli bir kısmı 1–150 μm boyut aralığında olup farklı renk ve morfolojik özellikler (lif, fragment, film, küre) sergilemektedir. Türk Beslenme Rehberi’nde önerilen yoğurt tüketim miktarları esas alınarak, çocuklar, ergenler, gebeler ve emzirenler ile postmenopozal kadınlar için yaklaşık 134–268 MP/gün, yetişkin bireyler için ise yaklaşık 200 MP/gün düzeyinde potansiyel maruziyet hesaplanmış ve bu maruziyetin insan sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Genel olarak çalışma, yoğurt üretiminde mikroplastik kontaminasyonunun yalnızca hammadde süttten değil, proses hattındaki çok sayıda plastik temas yüzeyinden

kaynaklanabileceğini göstermekte ve süt ürünlerinde MP risk değerlendirmesi için proses içi kontrol ve ekipman yönetiminin kritik önemini ortaya koymaktadır. Öte yandan Banica ve ark. (2024) yapmış oldukları araştırmasında hem konvansiyonel hem de organik yoğurt örneklerinde doğal ve sentetik kökenli mikropartiküllerin varlığı doğrulanmış, bu partiküller optik mikroskopi ve mikro-FTIR ile morfolojik ve kimyasal açıdan detaylı biçimde karakterize edilmiştir. Toplam 17 yoğurt örneğinde mikropartikül yükü konvansiyonel ürünlerde 400–4600 MP/kg, organik ürünlerde ise 800–4400 MP/kg aralığında değişmiş ve tüm örneklerde toplam 38.200 mikropartikül tespit edilmiştir. FTIR ile analiz edilen 236 partikülün yaklaşık yarısının pamuk, selüloz, keten veya yün gibi doğal lifler; diğer yarısının ise polyester, naylon, akrilik, elastan, polietilen veya poliüretan içeren sentetik partiküller olduğu belirlenmiştir. Kirlilik yük indeksine göre örneklerin önemli bir bölümü ‘orta’, ‘yüksek’ ve ‘çok yüksek tehlike’ kategorilerinde sınıflandırılmıştır. Çalışmada ayrıca mikropartiküllerin kaynağının çiğ sütün toplanması, taşınması, üretim hattındaki ekipman ve proses adımları, işçi kıyafetleri, kişisel koruyucu ekipmanlar ve ambalaj materyalleri gibi geniş bir zincir boyunca ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır. Araştırmacılar, süt ürünlerinde mikroplastik tespitine yönelik standart bir analitik protokol bulunmamasının önemli bir eksiklik olduğunu belirtmiş ve çalışmanın süt bazlı gıda ürünlerinde mikroplastik maruziyetinin anlaşılmasına yönelik gelecekteki araştırmalar için temel oluşturması gerektiğini ifade etmişlerdir.

3. YUMURTALARDA MİKROPLASTİKLER

Yumurta, oluşumu bütünüyle tavukların iç ortamına dayanan bir biyolojik üründür; bu nedenle yenilebilir fraksiyonunda (ak ve sarı) saptanan mikroplastiklerin (MP) temel kaynağı, hayvanın endojen maruziyeti ve dolaşımsal transferidir. Dışsal bulaş çoğunlukla kabuk yüzeyiyle sınırlıdır ve içerik analizlerinde kabuğun ayrılması/temizlenmesiyle büyük ölçüde kontrol edilebilir.

Pazardan temin edilen yumurtalar üzerinde yapılan ilk nicel çalışmalar, düşük de olsa tutarlı MP varlığına işaret etmektedir. Çin’de yapılan bir çalışmada, bir adet yumurtada ortalama 11–12 mikroplastik parçası bulunduğu belirlenmiştir. Bu parçaların büyük kısmı yumurta sarısında (yaklaşık 8.95 adet) görülürken, yumurta akında ise ortalama 3.40 adet

mikroplastik tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2022). Baskın polimerin polietilen (PE) olması ve sarı fraksiyonunda sayımın daha yüksek çıkması, lipofilik matrisin (yumurta sarısı) hidrofobik mikroparçacıkları daha kolay tutmasıyla uyumludur (Liu ve ark., 2022). Aynı çalışmada buharda pişirmenin yumurtadaki MP sayısını anlamlı biçimde azaltmadığı, evsel pişirmenin MP'leri uzaklaştırmadığı bildirilmiştir (Liu ve ark., 2022).

Bu konuda en net mekanizma kanıtı, yumurtacı tavuklarda yapılan ve radyoaktif işaretli polistiren mikroplastiklerin takip edildiği bir çalışmadan elde edilmiştir. Tek bir doz verildikten sonra, mikroplastiklerin yaklaşık %96,8'i ilk 24 saatte dışkıyla atılmıştır. Ancak dozun çok küçük bir kısmı (yüzde 1'den az) kana geçebilmiş ve zaman içinde hem yumurta akında hem de sarısında izlenebilir seviyelere ulaşmıştır (Shelver ve ark., 2024). Çalışmada, uygulamadan sonraki ilk günlerde gelişmekte olan yumurta foliküllerinde sinyal görülürken, 2-4. günlerde bu işaretin olgun yumurta sarısına taşındığı belirlenmiştir. Bu bulgular, mikroplastiklerin bağırsaktan kana, oradan da ovaryuma sınırlı düzeyde de olsa geçebildiğini göstermektedir ve pazardan alınan yumurtalarda tespit edilen mikroplastiklerle uyumludur (Liu ve ark., 2022). Saha çalışmalarında elde edilen sonuçlar değerlendirilirken, yumurtalara üretim sonrası süreçlerden gelebilecek dış kaynaklı plastik katkılarının da olabileceği unutulmamalıdır. Özellikle polietilenden (PE) üretilen ambalaj malzemeleri, taşıma kapları veya yıkama hattındaki plastik fırça kılları yumurta kabuğu üzerinde lif bırakabilir. Yumurta kırılırken bu liflerin iç kısma geçmesi de teorik olarak mümkündür. Ancak Liu ve ark. (2022), bu olası dış karışımları azaltmak için yumurta içeriğini kabuktan tamamen ayırıp sindirerek analiz ettiği bir yöntem kullanmıştır. Buna rağmen, büyük ölçekli ticari üretimlerde ambalajlama ve yıkama süreçleri az da olsa ikincil bir kontaminasyon kaynağı olmaya devam edebilir. Tavuğun gastrointestinal maruziyeti yumurtaya giden endojen yükün temel belirleyicisidir. Serbest dolaşım/zemin temaslı sistemlerde toprak-omurgasız-kanatlı zinciriyle MP geçişi belgelenmiş; tavukların taşlık/kursak içeriklerinde PVC, PE, PS, PP türü çok sayıda parçacık sayılmıştır (Huerta Lwanga ve ark., 2017; Bilal ve ark., 2023). Bu durum, tavukların yem, su ve çevresel tozlar yoluyla mikroplastiklere sürekli olarak maruz kaldığını ve bu nedenle kanda az miktarda da olsa taşınan bir mikroplastik fraksiyonunun bulunduğunu göstermektedir. Kontrollü deney sonuçları da, yumurtaya geçen

miktarın çok küçük olduğunu ancak tamamen sıfır olmadığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Shelver ve ark., 2024).

Gıda güvenliği perspektifinde, yumurta başına birkaç parçacık düzeyi “düşük” görünse de düzenli tüketimle kümülatif alıma katkıda bulunabilir; farklı gıdaların toplamından yıllık on binler mertebesinde MP alımı olabileceği öngörülmüştür (Cox ve ark., 2019). Ayrıca parçacık boyutu da önemli bir etkidir. Mikrometre büyüklüğündeki mikroplastiklerin vücutta ilerlemesi oldukça sınırlıdır; buna karşılık nano boyuttaki çok daha küçük parçacıklar daha kolay emilir ve dokulara ya da yumurta gibi hayvansal ürünlere geçme ihtimalleri daha yüksektir. Bu nedenle özellikle nano boyut aralığı, mikroplastiklerin yumurtaya geçişi açısından hâlâ daha fazla araştırılması gereken kritik bir bölge olarak görülmektedir (Shelver ve ark., 2024). Pratikte mikroplastik kontrolü için üç temel nokta önemlidir.

(i) Yem ve su kalitesinin iyileştirilmesi: Yem torbalarındaki plastik astarlar, naylon lifler ve içme suyu hatlarındaki plastik parçalar gibi kaynakların azaltılması gerekir.

(ii) Yumurta işleme alanında hijyen: Yıkama sularının filtrelenmesi, plastik fırçaların aşınmasının kontrol edilmesi ve polietilen (PE) tabanlı iç kartuşlar yerine daha güvenli alternatiflerin kullanılması önerilir.

(iii) Analiz sürecinde kalite kontrol: Yumurta kabuğu ile içeriğinin doğru şekilde ayrılması, saha ve laboratuvar boş örneklerinin kullanılması ve laboratuvar ortamındaki hava kaynaklı lif karışımlarının pamuklu tekstillerle izlenmesi gerekir.

Mevcut bulgular, yumurtanın mikroplastik geçişini izlemek için uygun bir biyogösterge olduğunu ve geçişin düşük düzeyde de olsa gerçekleştiğini göstermektedir (Liu ve ark., 2022; Shelver ve ark., 2024). Daha geniş kapsamlı ve farklı bölgeleri kapsayan çalışmalar, yetiştirme sistemi, yem kalitesi ve ambalaj uygulamalarının etkilerini daha net ortaya koyacak ve riskin nasıl yönetilebileceğini daha açık biçimde gösterecektir.

4. MİKROPLASTİKLERİN HAYVAN SAĞLIĞI ve ÜRÜN KALİTESİNE ETKİLERİ

Mikroplastiklerin (MP) çiftlik hayvanları üzerindeki etkileri, ekotoksikoloji ve hayvan besleme bilimlerinin kesişim noktasında hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Bugüne kadar elde edilen deneysel ve saha

verileri, MP maruziyetinin hayvan organizmasını yalnızca mekanik bir irritan olarak etkilemediğini; aynı zamanda hücresel düzeyde biyokimyasal, immünolojik ve metabolik yanıtları tetikleyen çok katmanlı bir stres etmeni olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Bu yanıtlar, hayvan sağlığı-refahı ekseninde önemli sonuçlar doğurmakta ve nihayetinde elde edilen hayvansal ürünlerin (et, süt, yumurta) kalitesini dolaylı veya doğrudan etkileyebilmektedir.

MP'lerin biyolojik etkisini belirleyen temel faktörler partikül boyutu, şekli, polimer türü, yüzey yükü, maruziyet süresi ve eşlik eden kimyasal kirleticilerdir. Özellikle 150 µm'den küçük parçacıklar, gastrointestinal bariyeri aşarak sistemik dolaşıma geçme potansiyeli taşımaktadır. Nanoplastik boyutuna yaklaştıkça hücre düzeyindeki biyoyararlanım artmakta; hücre membranıyla doğrudan etkileşim, endositoz ile alım ve lizozomal fonksiyonlarda bozulma gibi mekanizmalar daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum literatürde "membran-stres yanıtı" olarak tanımlanan süreci tetiklemekte; iyon dengesi, mitokondriyal fonksiyon ve hücre içi redoks yapıları üzerinde baskı oluşturmaktadır.

Oksidatif stres, MP maruziyetinin en tutarlı biyobelirteçlerinden biridir. Polistiren, polietilen ve polipropilen gibi yaygın polimerlerle yapılan deneylerde; süperoksit üretimi, glutatyon tüketimi, lipid peroksidasyonu ve DNA hasarı belirgin biçimde artmıştır. Oksidatif stresin kronikleşmesi durumunda hücre membranı bütünlüğü zayıflamakta, bağırsak epitel bariyeri geçirgenliği artmakta ("leaky gut" benzeri tablolar) ve bağışıklık sisteminde sapmalar meydana gelmektedir. Bu mekanizmalar hem ruminantlarda hem de kanatlılarda bildirilen subklinik inflamasyon, bağırsak mikrobiyotasında dengesizlik ve besin emiliminde azalma gibi bulgularla uyumludur. Ayrıca MP yüzeylerinin hidrofobik yapısı, dioksin, PCB, PAH, ftalatlar ve ağır metaller gibi toksik maddelerin adsorpsiyonuna izin verdiğinden, bu partiküller hayvan dokusunda bir "kimyasal taşıyıcı" niteliği kazanabilmektedir.

Sindirim fizyolojisi açısından bakıldığında MP'ler, mekanik aşındırıcı etkileri nedeniyle taşlık zedelenmesi, bağırsak mukozasında irritasyon ve epitel yüzeyinde mikroerozyonlar oluşturabilir. Kanatlılarda taşlık içeriğinde yoğun MP varlığının saptanması, özellikle yem torbaları, altlık materyalleri ve çevresel toz yüküyle ilişkili sürekli bir alım döngüsüne işaret etmektedir. Bu

durum, büyüme performansı üzerinde iki yönlü etki yaratabilir: (i) düşük dozlarda enerji metabolizmasında düzensizlik, büyümede yavaşlama ve yemden yararlanma oranında bozulma; (ii) bazı deneysel modellerde görüldüğü gibi, oksidatif stres kaynaklı “hiperkompansasyon” ile kısa dönemli canlı ağırlık artışı. Ancak bu ikinci durum çoğunlukla kalitesiz karkas kompozisyonu, su tutma kapasitesinde azalma, pH dengesinin bozulması ve göğüs eti miyopatilerinde (ör. wooden breast) artış gibi kalite sorunlarıyla birlikte görülmektedir.

MP maruziyetinin bağışıklık sistemi üzerine etkileri de giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Özellikle makrofaj ve heterofil gibi fagositik hücrelerde MP birikimi, lizozomal stabilitenin bozulmasına ve inflamatuvar sitokin üretiminin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, hayvanın enfeksiyonlara verdiği yanıtı değiştirebilir, aşılama başarısını etkileyebilir ve metabolik stres dönemlerinde (ör. pik laktasyon, hızlı büyüme) bağışıklık sistemini daha kırılgan hale getirebilir. Ruminantlarda rapor edilen rumen mikrobiyota değişimleri, uçucu yağ asitlerinin üretiminde kaymalara neden olabilir ve sonuçta süt verimi–kompozisyonu üzerinde etkiler gösterebilir.

Reprodüktif fizyoloji açısından MP’lerin potansiyel etkileri henüz başlangıç aşamasında olsa da, in-vitro modellerde gonad hücrelerinde oksidatif stres, steroidogeneze bozulma ve spermatozoa fonksiyonlarında azalma bildirilmiştir. Kanatlılarda yapılan radyoaktif izleme çalışmaları ise MP’lerin çok küçük bir fraksiyonunun ovaryuma ulaşabildiğini, yumurtanın gelişim dönemine göre sarı ve hatta albümine geçebildiğini göstermektedir. Bu bulgular, MP’lerin yem kaynaklı maruziyetinin, özellikle yoğun yumurta verimi beklentisi olan sürülerde potansiyel bir reprodüktif stres bileşeni olabileceğini düşündürmektedir.

Hayvansal ürün kalitesi bakımından MP’ler, içsel (doku içi) ve dışsal (işleme–ambalaj süreçleri) kaynaklı olmak üzere iki yönlü risk oluşturur. Doku içinde birikim, ürünün güvenilirliğini ve tüketici algısını zedeleyebilir; dışsal bulaşma ise özellikle kesim ve işleme zincirinde kullanılan plastik yüzeylerin aşınmasına bağlıdır. Kas dokusunda MP varlığının etin renk stabilitesi, oksidatif raf ömrü ve tekstürel özellikler üzerinde dolaylı etkileri olabileceğine dair hipotezler giderek güçlenmektedir. Benzer şekilde süt ürünlerinde ekipman kaynaklı MP yükünün artması, peynir altı suyu proteinlerinin oksidasyonunu, yağ globül membranının bozulmasını ve ürünün

raf ömrünü etkileyebilir.

Nitekim mevcut veriler, mikroplastiklerin çiftlik hayvanlarında çok boyutlu fizyolojik stres oluşturduğunu, bağırsak mikrobiyotasından immün sisteme, metabolik dengeden ürün kalitesine kadar uzanan geniş bir etki alanına sahip olduğunu göstermektedir. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkileri, klasik toksikolojik yaklaşımlarla tam olarak açıklanamamaktadır; çünkü MP'ler hem fiziksel partikül hem de kimyasal kontaminant taşıyıcısı olarak "ikili bir stresör" niteliği taşımaktadır. Bu nedenle gelecekte, yem hijyeni-çevresel maruziyet-işleme ekipmanları üçlüsünü birlikte değerlendiren bütüncül risk modelleri geliştirilmesi; ayrıca MP ve nanoplastiklerin biyoyararlanımı, toksikodinamik etkileri ve ürün kalitesine uzun vadeli yansımalarını ele alan disiplinler arası çalışmaların artırılması gerekmektedir.

5. SONUÇ

Mikroplastikler, günümüz hayvancılık sistemlerinin öngörmediği ölçüde yaygın ve giderek büyüyen bir çevresel stres faktörü hâline gelmiştir. Çevreye karışan milyonlarca ton plastik atığın zaman içinde parçalanmasıyla oluşan bu mikroskobik parçacıklar, artık yalnızca denizel canlılarda değil; sığır, koyun, domuz ve özellikle kanatlılar gibi karasal çiftlik hayvanlarında da düzenli biçimde tespit edilmektedir. Bu durum, hayvan üretim zincirinin tamamını—yem tedarikinden kesim ve işleme süreçlerine kadar—ilgilendiren çok boyutlu bir gıda güvenliği ve hayvan refahı sorununu gündeme getirmektedir.

Bölüm boyunca sunulan kanıtlar, mikroplastiklerin hayvan organizmasını yalnızca "yabancı partiküller" olarak değil, çok yönlü bir fizyolojik stresör olarak etkilediğini göstermektedir. Partikül boyutu küçüldükçe ve yüzey kimyası daha reaktif hâle geldikçe; oksidatif stres, inflamasyon, bağışıklık yanıtının baskılanması, bağırsak bariyer disfonksiyonu, hormonal dengesizlik ve enerji metabolizmasında düzensizlik gibi çok katmanlı biyolojik etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu etkilerin bir kısmı kısa vadede performans parametrelerine yansıyabilirken, bir kısmı ise yalnızca moleküler düzeyde başlayıp uzun süre gözden kaçabilecek kronik hasarlara dönüşebilmektedir.

Kanatlılarda taşlık ve bağırsak içeriğinde yüksek sayıdaki

mikroplastiklerin rapor edilmesi, maruziyetin sürekliliğini ve çevresel girdilerin (yem torbaları, altlık materyalleri, toz yükü, su hattı boruları) önemini açıkça ortaya koymaktadır. Deneysel veriler, kas dokusunda birikebilen mikroplastiklerin et kalitesini; renk stabilitesi, pH dengesi, su tutma kapasitesi ve oksidatif bozulma gibi önemli kalite ölçütleri üzerinden olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu durum, hem üreticiler hem de tüketiciler açısından giderek daha dikkat çeken bir konu hâline gelmektedir. Özellikle paketli beyaz et ve kırmızı et ürünlerinde saptanan lif formundaki plastik parçacıkların, işleme ve ambalaj aşamalarındaki sürtünme-aşınma kaynaklı “eksojen bulaşma” yoluyla ete geçebilmesi, gıda zincirinde ekipman ve ambalaj yönetiminin kritik rolünü vurgulamaktadır.

Süt ve süt ürünlerinde bildirilen veriler, mikroplastik kontaminasyonunun yalnızca hayvansal dokulara sınırlı olmadığını; sağım sistemleri, hortumlar, filtreler, membranlar ve ambalaj materyallerindeki aşınmanın da önemli bir paya sahip olduğunu göstermiştir. Yoğurt üretim hatlarında süreç içi örneklemenin yüksek MP yüküne işaret etmesi, bu kontaminasyonun kaynağının büyük ölçüde hammadde dışı faktörlerden (su, tuz, ekipman yüzeyleri, hava kaynaklı lifler) kaynaklanabileceğini daha da belirgin hâle getirmiştir. Benzer şekilde yumurtada saptanan düşük düzeyli fakat tutarlı mikroplastik varlığı, gastrointestinal maruziyetin küçük bir fraksiyonunun kan dolaşımı üzerinden ovaryuma ve gelişen yumurta bileşenlerine taşınabildiğini göstermektedir.

Bu bulguların tamamı, hayvansal ürünlerde saptanan mikroplastiklerin tek bir kaynağa indirgenemeyeceğini, aksine hem endojen (hayvanın absorbe ettiği) hem de eksojen (işleme/ambalaj süreçlerinden gelen) girdilerin birlikte katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle mikroplastiklerin risk değerlendirmesi, yalnızca “üründe partikül var mı?” sorusuna indirgenemeyecek kadar karmaşıktır; maruziyetin biyolojik sonuçları, partikülün polimer türü, boyutu, şekli, yaşlanma derecesi ve yüzeyindeki kimyasal kirleticiler de dikkate alınmalıdır.

Bu alandaki en önemli sınırlılıklardan biri, hayvanların gerçek üretim koşullarında karşılaştıkları maruziyet düzeyleri ile laboratuvar modellerindeki maruziyet arasındaki ciddi farklılıktır. Çoğu deneyde hayvanlar, doğal koşullarda maruz kalmayacakları derecede yüksek dozda ve tek tip polimerle karşılaştırılmakta, bu da sonuçların ticarî üretim koşullarına doğrudan

uyarlanmasını güçleştirmektedir. Üstelik mikroplastiklerin çevredeki yaşlanma derecesi, oksidatif bozunma ürünleri ve ağır metal–organik kirleticileri adsorbe etme kapasitesi gibi gerçek hayata özgü özellikler, deneysel tasarımlarda yeterince temsil edilmemektedir.

Bir diğer bilgi boşluğu, mikroplastiklerin yemden hayvana ve oradan insana taşınma mekanizmalarının hâlen tam olarak aydınlatılamamış olmasıdır. Özellikle 10–100 µm boyutundaki parçacıkların bağırsak duvarından hangi mekanizmalarla geçtiği, dolaşımında ne kadar süre kaldığı ve farklı dokularda birikim dinamiklerinin nasıl şekillendiği konusu daha fazla araştırmayı gerektirmektedir. Aynı şekilde nanoplastik boyutuna inildiğinde biyoyararlanımın daha da arttığı bilinmekle birlikte, bu parçacıkların dokular ve ürünler üzerinden insan sağlığına taşınması hâlen büyük ölçüde belirsizdir.

Mevcut veriler ışığında, çiftlik ortamlarında mikroplastik maruziyetini azaltmak için geliştirilebilecek stratejiler; yem ambalajı ve ekipman aşınmasının en aza indirilmesi, su hattı borularında polimer türevli materyaller yerine alternatiflerin tercih edilmesi, altlık materyallerinin düzenli izlenmesi, temizlik süreçlerinde mikroplastik yükü düşük su kaynaklarının kullanılması ve plastik bazlı ekipmanların kullanım ömrü–aşınma davranışlarının izlenmesi gibi çok yönlü yaklaşım gerektiren adımları içermektedir. Buna ek olarak, mikrobiyal biyobozunma potansiyeli üzerine yapılan araştırmaların hızlanması, çevresel kalıcılığı azaltmaya yönelik sürdürülebilir biyoteknolojik stratejilerin geliştirilmesi açısından umut vericidir; ancak endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik henüz sınırlıdır.

Sonuç olarak, mikroplastiklerin hayvan sağlığına, üretim performansına ve hayvansal ürünlerin güvenilirliğine yönelik etkileri artık göz ardı edilemeyecek kadar açık bir bilimsel gündem oluşturmuştur. Bu krizin etkili yönetimi, yalnızca hayvan besleme veya gıda hijyeni disiplinlerinin sınırlarını aşmakta; çevre bilimleri, toksikoloji, analitik kimya, veteriner hekimlik, biyomühendislik ve gıda teknolojisinin birlikte ele alması gereken kapsamlı bir araştırma alanı hâline gelmektedir. Mikroplastiklerin hayvansal üretim sistemlerindeki davranışını, toksisite mekanizmalarını ve insan sağlığına olası uzun vadeli etkilerini tam olarak anlayabilmek için çok merkezli, standardize edilmiş, disiplinler arası araştırmaların önümüzdeki yıllarda hızla artması zorunluluktur.

Mikroplastiklerin yükünü azaltmaya yönelik etkili ve sürdürülebilir

stratejiler geliştirilmedikçe hem hayvan sağlığı hem de insan sağlığı açısından risklerin büyümeye devam edeceği açıktır. Bu nedenle, plastik kullanımının azaltılması, ileri analitik yöntemlerle düzenli izleme sistemlerinin kurulması, yem ve gıda zincirinde kritik kontrol noktalarının belirlenmesi ve bilim temelli düzenlemelerin güçlendirilmesi; hayvansal üretimin geleceği ve toplum sağlığı açısından stratejik bir öncelik olmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, 104, 104456.
- Abid, K., Aroua, M., Barbera, S., Petrucco, S. G., Kaihara, H., Mahouachi, M., Ben Saïd, S., & Tassone, S. (2025). Effect of microplastic contamination on in vitro ruminal fermentation and feed degradability. *Animal Science Journal*, 96, e70063.
- Ahmad, U., & Aleem, K. (2023). A review exploring the incorporation of microalgae to enhance the nutritional profile and health benefits of dairy products. *Agrobiological Records*, 13, 92–100.
- Akanda, M. R., Kawsar, M. A., Sabuj, M. S. S., Ashik-Uz-Zaman, M., Siddiqui, M. S. I., & Hossain, M. A. (2025). Microplastic pollution in livestock farming in Bangladesh: a critical review of its key findings and mitigation strategies to address public health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(7), 732.
- Al Nahian, S., Rakib, M. R. J., Kumar, R., Haider, S. M. B., Sharma, P., & Idris, A. M. (2023). Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 855, 158892.
- Anika, F., Rahman, M. A., Anik, A. H., & Tareq, S. M. (2025). Dairy under the microscope: A study on microplastic pollution in commercially available milk in Bangladesh. *Journal of Food Composition and Analysis*, 147, 108037.
- Badwanache, P., & Dodamani, S. (2024). Qualitative and quantitative analysis of microplastics in milk samples. *Indian Journal of Health Sciences and Biomedical Research (KLEU)*, 17(2), 150–154.
- Bahrani, F., Mohammadi, A., Dobaradaran, S., De-la-Torre, G. E., Arfaeinia, H., Ramavandi, B., Saeedi, R., & Tekle-Röttering, A. (2024). Occurrence of microplastics in edible tissues of livestock (cow and

- sheep). *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 22145–22157.
- Banica, A. L., Radulescu, C., Dulama, I. D., Bucurica, I. A., Stirbescu, R. M., & Stanescu, S. G. (2024). Microplastic debris in yogurt: Occurrence, characterization, and implications for human health. *Journal of Science and Arts*, 24(1), 223–248.
- Basaran, B., Özçifçi, Z., Akcay, H. T., & Aytan, Ü. (2023). Microplastics in branded milk: Dietary exposure and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 106511.
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., & Huerta Lwanga, E. (2021). Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, 755, 142653.
- Bilal, M., Taj, M., Ul Hassan, H., Yaqub, A., Shah, M. I. A., Sohail, M., Rafiq, N., Atique, U., Abbas, M., & Sultana, S. (2023). First report on microplastics quantification in poultry chicken and potential human health risks in Pakistan. *Toxics*, 11(10), 612.
- Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51, 518–530.
- Buyukunal, S. K., Rbaibi Zipak, S., & Muratoglu, K. (2023). Microplastics in a traditional Turkish dairy product: Ayran. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(2), 139–150.
- Chakraborty, T. K., Hasan, M. J., Netema, B. N., Rayhan, M. A., Asif, S. M. H., Biswas, A., Sarker, S., Ahmmed, M., Nice, M. S., Islam, K. R., Debnath, P. C., Chowdhury, P., Rahman, M. S., Zaman, S., Ghosh, G. C., & Hasibuzzaman, M. (2024). Microplastics in the commercially available branded milk in Bangladesh: An emerging threat for human health. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135374.
- Chen, C. C., Dai, L., Ma, L., & Guo, R. T. (2020). Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers. *Nature Reviews Chemistry*, 4, 114–126.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces

- meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, 882, 163305.
- Cholewinski, A., Dadzie, E., Sherlock, C., Anderson, W. A., Charles, T. C., Habib, K., & Zhao, B. (2022). A critical review of microplastic degradation and material flow analysis towards a circular economy. *Environmental Pollution*, 315, 120334.
- Corte Pause, F., Urli, S., Crociati, M., Stradaoli, G., & Baufeld, A. (2024). Connecting the Dots: Livestock Animals as Missing Links in the Chain of Microplastic Contamination and Human Health. *Animals*, 14(2), 350.
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074.
- Da Costa Filho, P. A., Andrey, D., Eriksen, B., Peixoto, R. P., Carreres, B. M., Ambühl, M. E., Descarrega, J. B., Dubascoux, S., Zbinden, P., Panchaud, A., & Poitevin, E. (2021). Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Scientific Reports*, 11(1), 212046.
- Devilliers, M., Lhomme, S., Tempez, M., Viudes, F., Chaïb, I., & Doyen, P. (2024). Les alternatives végétales à la viande : Potentielles sources de microplastiques pour nos estomacs. In *Congrès National de la Recherche des IUT, Université de Haute-Alsace (UHA), Mulhouse–Colmar, France*. <https://hal.science/hal-04619742>
- Díaz-Basantes, M. F., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2020). Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants. *Sustainability*, 12(12), 5514.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6), e04501.
- European Commission. (2011). *Commission Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food*.
- Fournier, E., Leveque, M., Ruiz, P., Ratel, J., Durif, C., Chalancon, S., Amiard, F., Edely, M., Bézirard, V., Gaultier, E., Lamas, B., Houdeau, E., Lagarde, F., Engel, E., Etienne-Mesmin, L., Blanquet-Diot, S., & Mercier-Bonin, M. (2023). Microplastics: What happens in the human

- digestive tract? First evidences in adults using in vitro gut models. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130010.
- Górska-Warsewicz, H., Rejman, K., Laskowski, W., & Czebotko, M. (2019). Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average Polish diet. *Nutrients*, 11(8), 1771.
- Habib, R. Z., Poulouse, V., Alsaidi, R., Al Kendi, R., Iftikhar, S. H., Mourad, A. H. I., Kittaneh, W. F., & Thiemann, T. (2022). Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(3), 609–619.
- Huang, Y., Chapman, J., Deng, Y., & Cozzolino, D. (2020). Rapid measurement of microplastic contamination in chicken meat by mid infrared spectroscopy and chemometrics: A feasibility study. *Food Control*, 113, 107187.
- Huerta Lwanga, E., Mendoza-Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Segura, G. E., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7, 14071.
- Katsara, K., Kenanakis, G., Alissandrakis, E., & Papadakis, V. M. (2022). Low-density polyethylene migration from food packaging on cured meat products detected by micro-Raman spectroscopy. *Microplastics*, 1(3), 428–439.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Khan, A., Qadeer, A., Wajid, A., Ullah, Q., Rahman, S. U., Ullah, K., Safi, S. Z., Ticha, L., Skalickova, S., Chilala, P., Bernatova, S., Samek, O., & Horky, P. (2024). Microplastics in animal nutrition: Occurrence, spread, and hazard in animals. *Journal of Agricultural and Food Research*, 17, 101258.
- Kiruba, R., Preethi, M., Aganasteen, R., Rithick Raj, M., Thabitha, C. H., Monica, P., Sakthivel, J., Levince, C., & Naseera Banu, I. (2022). Identification of microplastics as emerging contaminant in branded milk of Tamil Nadu State, India. *Asian Journal of Biological and Life Sciences*, 11(1), 181–187.

- Kotova, I. B., Taktarova, Y. V., Tsavkelova, E. A., Egorova, M. A., Bubnov, I. A., Malakhova, D. V., & Bonch-Osmolovskaya, E. A. (2021). Microbial degradation of plastics and approaches to make it more efficient. *Microbiology*, 90, 671–701.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? *Science of The Total Environment*, 714, 136823.
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140.
- Liu, H., Grist, E. P., Xu, X., Lo, H., Wong, A., & Cheung, S. (2023). Microplastics pollution in the rivers of a metropolitan city and its estimated dependency on surrounding developed land. *Science of the Total Environment*, 880, 163268.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status. *Food Chemistry*, 397, 133771.
- Milne, M. H., De Frond, H., Rochman, C. M., Mallos, N. J., Leonard, G. H., & Baechler, B. R. (2024). Exposure of U.S. adults to microplastics from commonly consumed proteins. *Environmental Pollution*, 343, 123233.
- Mohammadi, M., Dargahi, A., Almasi, A., Mousavi, S. A., & Mohammadi, P. (2025). Occurrence of microplastic, antibiotics, hormones, and heavy metals in livestock and poultry manure in west Iran. *Scientific Reports*, 15, 27228.
- Monclús, L., McCann Smith, E., Ciesielski, T. M., Wagner, M., & Jaspers, V. L. B. (2022). Microplastic ingestion induces size-specific effects in Japanese quail. *Environmental Science & Technology*, 56(24), 15902–15911.
- Mondal, S., Das, P., Mondal, A., Paul, S., Pandey, J. K., & Das, T. K. (Eds.). (2024). *Remediation of plastic and microplastic waste*. CRC Press.
- Naz, S., Chatha, A. M. M., Khan, N. A., Ullah, Q., Zaman, F., Qadeer, A., Khan, I. M., Danabas, D., Kiran, A., & Skalickova, S. (2024). Unraveling the ecotoxicological effects of micro and nano-plastics on aquatic organisms and human health. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1390510.

- Olmo, L., & Holman, B. W. B. (2025). The sources and impact of microplastic intake on livestock and poultry performance and meat products: A review. *Animal Production Science*, 65, AN25022.
- Oyedun, A. O., & Lawal, L. O. (2023). Microplastics as a threat to meat consumption, review. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(4), 712–718.
- Parfitt, J., Stanley, C., & Thompson, A. (2016). *Guidance for food and drink manufacturers and retailers on the use of food surplus as animal feed (Version 1.0)*. WRAP.
- Peixoto, D., Pinheiro, C., Amorim, J., Oliva-Teles, L., Guilhermino, L., & Vieira, M. N. (2019). Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 161–168.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Pirsaheb, M., Nouri, M., Massahi, T., Makhdoumi, P., Baban, N. A., & Hossini, H. (2024). Microplastics contamination in the most popular brands of Iranian sausages and evaluation of its human exposure. *Heliyon*, 10(14).
- Pourebrahimi, S., & Pirooz, M. (2023). Microplastic pollution in the marine environment: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100327.
- Qin, Z. H., Mou, J. H., Chao, C. Y. H., Chopra, S. S., Daoud, W., Leu, S. Y., & Lin, C. S. K. (2021). Biotechnology of plastic waste degradation, recycling, and valorization: Current advances and future perspectives. *ChemSusChem*, 14, 4103–4114.
- Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., Belloni, A., Gioacchini, G., Blondeel, C., Zucchelli, E., De Luca, C., D'Avino, S., Gulotta, A., Carnevali, O., & Giorgini, E. (2022). Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk. *Polymers*, 14(13), 2700.
- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2022). Evaluation of microplastic presence in yogurt production process. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 28(5), 633–641.

- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2024). Microplastics in raw milk samples from the Marmara region in Turkey. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 19(2), 175–186.
- Rodríguez-Seijo, A., & Pereira, R. (2019). Microplastics in agricultural soils: Are they a real environmental hazard? In J. C. Sanchez-Hernandez (Ed.), *Bioremediation of agricultural soils* (pp. 45–60). CRC Press.
- Santonicola, S., Volgare, M., Cocca, M., & Colavita, G. (2025). Study of fibrous microplastic and natural microfiber levels in branded milk samples from Italy. *Italian Journal of Food Safety*, 14(2), 13523.
- Sharma, P., & Vidyarthi, V. K. (2024). Impact of microplastic intake via poultry products: Environmental toxicity and human health. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 14, 100426.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of The Total Environment*, 909, 168512.
- Siddiqui, S. A., Singh, S., Bahmid, N. A., Shyu, D. J. H., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2023). Polystyrene microplastic particles in the food chain: Characteristics and toxicity – A review. *Science of the Total Environment*, 892, 164531.
- Simmons, C. W., Duan, F., Pitesky, M. E., Liu, Y., & Tobar, Z. (2023). Incorporation of recovered food and food scraps into poultry feed: A systematic review. *CABI Reviews*, 18, 1.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386.
- Toto, B., Refosco, A., Dierkes, J., & Kögel, T. (2023). Efficient extraction of small microplastic particles from rat feed and feces for quantification. *Heliyon*, 9, e12811.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study (Report EH22-01)*. Vrije Universiteit Amsterdam.

- Visentin, E., Niero, G., Benetti, F., O'Donnell, C., & De Marchi, M. (2025). Assessing microplastic contamination in milk and dairy products. *NPJ Science of Food*, 9(1), 135.
- Whitton, C., Bogueva, D., Marinova, D., & Phillips, C. J. C. (2021). Are we approaching peak meat consumption? Analysis of meat consumption from 2000 to 2019 in 35 countries and its relationship to gross domestic product. *Animals*, 11(12), 3466.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Xu, X., Zhang, L., Li, Y., Lu, Y., & Li, W. (2020). Microplastics in aquatic products and the potential risks to human health. *Science of the Total Environment*, 703, 134681.
- Zhang, Q., Liu, L., Jiang, Y., Zhang, Y., Fan, Y., Rao, W., & Qian, X. (2023). Microplastics in infant milk powder. *Environmental Pollution*, 323, 121225.
- Ziajahromi, S., Slynkova, N., Dwyer, J., Griffith, M., Fernandes, M., Jaeger, J. E., & Leusch, F. D. L. (2024). Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*, 250, 121071.

BÖLÜM 12

SORU ve CEVAPLARLA ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİKLER (GÜNCEL BİLGİLER, RİSKLER VE GELECEK PERSPEKTİFİ)

Prof. Dr. Arda YILDIRIM¹
Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048993>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootehni Bölümü, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID:0000-0002-5876-4228, E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

² Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Ankara/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-3333-1490, E-posta: emevliyaogullari@baskent.edu.tr

GİRİŞ

Plastik kirliliği, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve halk sağlığı boyutları olan karmaşık bir “Tek Sağlık” meselesi olarak ele alınmaktadır. Küresel plastik üretiminin 430 milyon tonu aştığı ve bunun yaklaşık üçte ikisinin kısa ömürlü ürünler olduğu, dolayısıyla hızla atığa dönüştüğü bildirilmektedir (Naz ve ark., 2024). Bu atıkların önemli bir kısmı, yetersiz atık yönetimi, geri dönüşümdeki sınırlılıklar ve tek kullanımlık ürünlere bağımlılık nedeniyle çevreye kontrolsüz biçimde yayılmakta; makroplastikler zamanla parçalanarak mikroplastik (MP) ve nanoplastik boyutuna inmektedir (Al Nahian ve ark., 2023; Pourebrahimi ve Pirooz, 2023; Sharma ve Vidyarthi, 2024). Mikroplastikler, genel olarak 0.1 µm ile 5 mm arasındaki plastik partiküller olarak tanımlanmakta; polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), poliamid (PA), polietilen tereftalat (PET) ve polikarbonat (PC) gibi yaygın polimerlerden oluşabilmektedir (Kadaczapska ve ark., 2022; Olmo ve Holman, 2025). Bu partiküller üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinin hemen her aşamasında çevreye sızmakta; sucul ortamlar, toprak, atmosfer ve nihayetinde bitkisel ve hayvansal gıdalara kadar ulaşmaktadır (Solayman ve ark., 2026). Başlangıçta araştırmalar daha çok deniz ekosistemleri ve su ürünleri üzerine yoğunlaşmışken, son yıllarda karasal gıda hayvanlarında da anlamlı mikroplastik maruziyeti olduğu gösterilmiştir (Toussaint ve ark., 2019; Yıldırım ve Buhan, 2025a). Süt, kırmızı et, tavuk eti ve yumurta gibi temel hayvansal ürünlerde mikroplastik varlığı rapor edilmiş; bu bulgular çiftlik hayvanlarının yem, su, hava ve tarımsal plastikler üzerinden nasıl ve ne düzeyde maruz kaldığının sistematik olarak değerlendirilmesini zorunlu hâle getirmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Kedzierski ve ark., 2020; van der Veen ve ark., 2022; Liu ve ark., 2022; Yıldırım ve Buhan, 2025b). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), 150 µm’den büyük plastik partiküllerinin çoğunun dışkıyla atıldığını; buna karşılık daha küçük partiküllerin bağırsak bariyerini aşarak doku ve organlara taşınabileceğini bildirmiştir (EFSA, 2016). Nitekim doğal maruziyet koşullarında, sığır dışkısında 74–50.583 parçacık/kg, tavuk dışkısında 667–129.800 parçacık/kg ve domuz dışkısında 0–112.000 parçacık/kg düzeylerinde mikroplastik rapor edilmiştir (Wu ve ark., 2021; Huerta Lwanga ve ark., 2017; Beriot ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu dışkısal atılımın

yalnızca bir “çıktı göstergesi” olduğu; gerçek sistemik maruziyetin değerlendirilmesi için dokulardaki birikim düzeylerinin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Etlik piliçlerde jejunum, karaciğer, but ve göğüs kasında 2.2–1751.4 mg/kg aralığında mikroplastik yükü bildirildiği; perakende kırmızı et örneklerinde ise 53–7700 mg/kg düzeylerine ulaşılabildiği belirtilmektedir (Chen ve ark., 2023; van der Veen ve ark., 2022; Olmo ve Holman, 2025; Yıldırım ve Buhan, 2025b). Çalışmaların bir kısmı mg/kg, bir kısmı partikül/kg birimi kullanmaktadır; doğrudan karşılaştırma zordur. Çiftlik hayvanlarının maruziyet yolları incelendiğinde, tarımsal peyzajın hemen her bileşeninin mikroplastik açısından potansiyel bir kaynak olduğu görülmektedir. Sera ve silaj örtüleri, plastik malçlar, atık çamuru ve kanalizasyon çamuru gibi organik gübreler, geri kazanılmış atık suyla sulama, plastik boru ve vanalar, yem üretim zincirinde kullanılan paketleme materyalleri ve genel çiftlik ekipmanları başlıca giriş kapıları olarak tanımlanmaktadır (Rodríguez-Seijo ve Pereira, 2019; Beriot ve ark., 2021; Wu ve ark., 2021; Ziajahromi ve ark., 2024; Olmo ve Holman, 2025). UV ışınları, mekanik aşınma ve sıcaklık–nem dalgalanmaları gibi faktörler bu materyallerin parçalanma hızını artırarak mikroplastik yükünü daha da yükseltmektedir (Siddiqui ve ark., 2023; Solayman ve ark., 2026). Mikroplastiklerin çiftlik hayvanlarındaki biyolojik etkileri hem partikülün fiziksel varlığı hem de taşıdığı kimyasal yük üzerinden iki boyutlu bir risk tablosu oluşturmaktadır. Polimer yüzeyleri; kalıcı organik kirleticiler (PCB, DDT türevleri, PBDE), pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar ve ağır metaller gibi toksik maddeleri adsorbe ederek bunların sindirim sistemi üzerinden organizmaya taşınmasına aracılık edebilmektedir (Campanale ve ark., 2020; Wu ve ark., 2021; Adeleye ve ark., 2024). Deneysel çalışmalarda, özellikle polistiren ve polietilen bazlı mikro/nanoplastiklerin bağırsak bariyer bütünlüğünün bozulması, oksidatif stres belirteçlerinde artış, inflamatuvar yanıtın uyarılması, mikrobiyotada dengesizlik ve çeşitli organlarda apoptoz ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Blackburn ve Green, 2022; El Gazzar ve ark., 2023; Djouina ve ark., 2024). Kanatlılarda yürütülen güncel çalışmalar, bu etkilerin yalnızca teorik bir risk olmadığını ortaya koymaktadır. Abd El-Hack ve ark. (2025), mikroplastiklerin bağırsak fonksiyonu, bağışıklık sistemi ve üretim performansı üzerindeki olası olumsuz etkilerini detaylı biçimde tartışmakta; orta Doğu’da satışa sunulan tavuk etlerinde gram başına 0.03–

1.19 partikül düzeylerinde mikroplastik tespit edildiğini bildirmektedir. Japon bildiricilerinde yapılan deneysel bir çalışmada ise mikroplastik maruziyetinin dalak dokusunda mikroyapısal hasar, hücresel düzensizlik, oksidatif stres ve inflamasyonla ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2024; Abd El-Hack ve ark., 2025). Öte yandan, insan sağlığı açısından bakıldığında, mikroplastiklerin gıdalar, içme suyu ve solunum yoluyla vücuda girdiği; gastrointestinal sistemin temel giriş yolu olduğu kabul edilmektedir (Kadacz-Czapska ve ark., 2022). Tavuk eti, kırmızı et, süt ürünleri, balık, kabuklu deniz ürünleri, sofr tuzu, şeker, bal, meyve ve sebzeler gibi çok sayıda gıda grubunda farklı polimerlere ait mikroplastiklerin varlığı gösterilmiş; bu parçacıkların boyutu küçüldükçe toksik potansiyellerinin arttığı vurgulanmıştır (Obmann ve ark., 2019; Schymanski ve ark., 2018). Politika ve düzenlemeler düzeyinde bakıldığında, plastik üretimi ve atık oluşumunun geldiği nokta, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda jeopolitik ve ekonomik bir sorun olarak da değerlendirilmektedir. Avrupa Parlamentosu ve ulusal bilimsel ofisler, plastiklerin sağlık etkilerine ilişkin bilimsel kanıtları derleyerek müzakere süreçlerine girdi sağlamaya çalışmakta; örneğin Fransız Parlamentosu Bilimsel Seçenekler Ofisi (OPECST), mikro- ve nanoplastiklerin insan vücudunda ve hücre düzeyinde birikimine karşın, hâlâ standart bir biyomonitoring metodunun bulunmadığına dikkat çekmektedir (OPECST, 2024). Benzer şekilde İsviçre’de yayımlanan bir sağlık-çevre derlemesi, plastik katkı maddelerinin (yumuşatıcılar, stabilizatörler vb.) ve mikro/nanoplastiklerin tıbbi uygulamalar dâhil pek çok alanda görünmez ama sürekli bir maruziyet kaynağı hâline geldiğini vurgulamaktadır (Wiesinger, 2024).

Bu kitapta yer alan “Çiftlik Hayvanlarında Mikroplastik Kaynakları ve Maruziyet Yolları” ve “Hayvansal Ürünlerde Mikroplastikler” başlıklı bölümlerde, çiftlik düzeyindeki maruziyet yolları ile ürün bazlı kontaminasyon desenleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır (Yıldırım ve Buhan, 2025a; 2025b). Bu üçüncü bölümde ise, aynı konuyu “Soru ve Cevaplarla” ele alarak; okuyucuların mikroplastik-hayvan-insan ilişkisini hem mekanistik düzeyde hem de pratik hayvancılık uygulamaları bağlamında daha iyi kavrayabilmeleri amaçlanmaktadır.

Sorular, üç temel konu etrafında yapılandırılmıştır. İlk olarak, mikroplastiklerle ilgili güncel bilgiler ele alınmaktadır. Bu bölümde

mikroplastiklerin ne olduğu, nasıl sınıflandırıldığı, çevrede nasıl hareket ettiği ve çiftlik hayvanlarının bu parçacıklara hangi yollarla maruz kaldığı açıklanmaktadır. Ayrıca mikroplastiklerin hayvan vücudunda hangi dokularda birikebildiği üzerinde durulmaktadır. İkinci odak noktası, mikroplastiklerin yaratabileceği risklerdir. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı, büyüme ve verim performansı, et-süt-yumurta gibi hayvansal ürünlerin kalitesi ve tüketici güveni üzerindeki olası etkileri, ayrıca Tek Sağlık (One Health) yaklaşımıyla insan sağlığına yansıyan sonuçları değerlendirilmektedir. Üçüncü odak noktası ise geleceğe yöneliktir. Bu bölümde mevcut çalışmaların yöntemsel eksikleri, literatürdeki bilgi boşlukları, mikroplastiklere ilişkin düzenleme ve mevzuattaki belirsizlikler ile hayvan besleme açısından maruziyeti azaltmaya yönelik stratejiler ve gelecekte öne çıkması beklenen araştırma alanları ele alınmaktadır. Bu bölümün amacı, mevcut literatürü bilimsel bir çerçevede özetlerken aynı zamanda konuyla ilgilenen okurları özellikle öğrencileri ve genç araştırmacıları mikroplastiklerin hayvansal üretim ve gıda güvenliği bağlamındaki çok katmanlı etkilerini eleştirel ve analitik bir bakış açısıyla değerlendirmeye yönlendirmektir. Böylece bölüm hem bilgi aktarımı hem de düşünsel farkındalık kazandırma işlevini birlikte yerine getirmeyi hedeflemektedir.

1. SORU VE CEVAPLARLA ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİKLER

1. Mikroplastik nedir? Hangi özellikleri onları hayvansal üretim açısından riskli hâle getirir?

Cevap: Mikroplastikler, boyutu 1 µm–5 mm arasında değişen ve çevrede büyük plastiklerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçlerle parçalanması sonucu oluşan plastik partiküllerdir (Liu ve ark., 2022). Birincil mikroplastikler doğrudan küçük üretilirken, ikincil mikroplastikler UV ışığı, sıcaklık ve mekanik aşınma sonucu çevrede oluşur (Geyer ve ark., 2017). Hayvansal üretim açısından risk oluşturmalarının temel nedenleri; (i) tarımsal plastik kullanımının yoğunluğu (silaj örtüleri, sulama boruları, ambalaj materyalleri), (ii) yem tedarik zincirinin plastikle sürekli temas hâlinde olması, (iii) bu parçacıkların sindirim sisteminde fiziksel tahriş, mikrobiyota değişimi ve oksidatif stres gibi biyolojik etkiler oluşturabilmesidir (Abd El-

Hack ve ark., 2025). Ayrıca mikroplastiklerin yüzeyleri, PAH'lar, pestisitler ve ağır metaller gibi toksik maddeleri adsorbe edebildiği için hayvanda “taşıyıcı kirletici” işlevi görebilir (Campanale ve ark., 2020). Bu nedenle mikroplastikler hem yem güvenliği hem hayvan sağlığı hem de insan tüketimi açısından önem taşır.

2. Küresel plastik üretimindeki artış ile mikroplastik kirliliği arasındaki ilişki nedir? Hayvan besleme açısından ne ifade eder?

Cevap: Plastik üretimi 1950'den bu yana 200 kat artmış ve günümüzde yıllık 430 milyon tonu aşmıştır (Naz ve ark., 2024). Geri dönüşüm oranı dünya genelinde yalnızca %9 civarındadır; geri kalanı yakılmakta, depolanmakta veya doğrudan çevreye yayılmaktadır (Al Nahian ve ark., 2023). Çevreye yayılan bu plastikler zamanla mikro- ve nanoplastiklere parçalanmakta, toprak, su ve hava yoluyla tarımsal sistemin her aşamasına girmektedir. Hayvan besleme açısından bu durum iki kritik sonuca yol açar: (i) Yem hammaddelerinde, özellikle tahıllarda, yağlı tohum küspelerinde ve balık ununda giderek artan bir mikroplastik arka plan seviyesi oluşur; (ii) Çiftlik hayvanlarının doğal maruziyeti kronik ve düşük dozlu bir yapıya dönüşür. Dolayısıyla plastik üretimindeki kontrolsüz artış, yem güvenliğini etkileyen “görünmez ama sürekli” bir riskin giderek büyümesi anlamına gelir ve bu risk Tek Sağlık (One Health) çerçevesinde değerlendirilmelidir.

3. Çiftlik hayvanlarında mikroplastik maruziyetinin başlıca kaynakları nelerdir?

Cevap: Mikroplastik maruziyeti üç ana yolla gerçekleşir: oral, inhalasyon ve mukozal temas. Oral alım en önemli yoldur; çünkü mikroplastikler yem hammaddelerinde, hazır yemlerde, plastik big-bag çuvalarda, yem nakil sistemlerinde ve içme suyu hatlarında tespit edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Merada otlayan ruminantlar ayrıca toprakla birlikte anlamlı miktarda mikroplastik yutabilmektedir (Beriot ve ark., 2021). İnhalasyon yoluyla maruziyet, özellikle kümes havasındaki plastik lifler, sentetik tekstil parçacıkları ve aşınmış ekipman tozlarıyla ilişkilidir (Wu ve ark., 2021). Üçüncü yol olan mukozal temas, özellikle göz ve burun aracılığıyla alınan partiküllerin tekrar yutulması şeklinde dolaylı bir maruziyet oluşturur. En riskli kaynaklar plastik silaj örtüleri, aşınmış PVC sulama sistemleri, plastik yem çuvaları, big-bag'ler, tarımsal malçlar ve ambalaj

materyalleridir.

4. Yemlerde ve yem hammaddelerinde mikroplastik kontaminasyonu nasıl oluşur? Hangi yemler daha yüksek risk taşır?

Cevap: Yemlerdeki mikroplastik kontaminasyonu üç ana mekanizma ile oluşur: (i) Hammaddenin yetiştirilme ortamındaki çevresel kirlilik (örneğin plastik malç ve kanalizasyon çamuru kullanılan tarlalarda), (ii) İşleme–taşıma–ambalajlama süreçlerinde plastik aşınması, (iii) Depolama sırasında yırtık, aşınmış veya UV’ye maruz kalmış ambalajlardan mikroplastik dökülmesi. Literatürde en yüksek risk grupları; balık unu ve deniz kökenli yemler, yoğun plastik ambalaj kullanılan ticari yemler, kurak ve rüzgârlı bölgelerde toz-toprakla temas eden açık depolanan tahıllar olarak bildirilmiştir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Ayrıca silaj örtülerinin aşınması ruminant yemlerinde önemli bir kaynak olabilir. Yem zinciri boyunca plastik kullanımının azaltılması, en kritik önleyici adımlardan biridir.

5. Mikroplastikler sindirim kanalında nasıl davranır? Hangi koşullarda emilir veya dışkıyla atılır?

Cevap: Sindirim kanalındaki davranış büyük ölçüde partikül boyutu, şekli, polimer türü ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Büyük partiküller (>100–150 µm) genellikle emilmez ve bağırsak boyunca transit geçerek dışkıyla atılır (EFSA, 2016). Ancak bu süreçte mukozada irritasyon, yüzey zedelenmesi ve hafif inflamasyon görülebilir. Küçük mikroplastikler (<20–30 µm) ve özellikle nanoplastikler, M-hücreleri veya endositoz mekanizmaları üzerinden sınırlı da olsa kana geçebilir ve karaciğer, böbrek ve dalak gibi dokulara taşınabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Deneysel araştırmalarda bağırsak mikrobiyotasında değişimler, oksidatif stres artışı ve sıkı bağlantı proteinlerinin zayıflaması gibi etkiler bildirilmiştir. Bununla birlikte mevcut çalışmaların çoğu yüksek dozlu maruziyet modellerine dayanmaktadır; bu nedenle çevresel düzeydeki kronik maruziyetin gerçek biyolojik etkileri hâlen tam olarak net değildir.

6. Mikroplastiklerin boyutu, şekli ve polimer yapısı hayvan vücudundaki biyolojik etkileri nasıl belirler?

Cevap: Mikroplastiklerin biyolojik etkilerinde boyut, şekil ve polimer türü belirleyici üç temel parametredir. Boyut küçüldükçe emilme ve dokuya geçme olasılığı artar; özellikle <20 µm partiküllerin bağırsak bariyerini

aşabildiği, nanoplastiklerin ise hücresel ve subhücresele yapılar ulaşabildiği gösterilmiştir (EFSA, 2016). Şekil de önemlidir; lifsi yapıdaki plastikler (örneğin tekstil kaynaklı mikro-lifler) mukozada daha fazla mekanik tahriş yaratabilirken, düzensiz parçacıklar yüzey alanı fazla olduğu için toksik maddeleri daha çok adsorbe edebilir (Olmo ve Holman, 2025). Polimer türü ise kimyasal yükü belirler: PVC ve PS daha yüksek katkı maddesi ve NIAS bileşik içerirken, PE ve PP çevrede adsorbe ettiği kirleticilerle toksisitesini artırabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bu nedenle mikroplastiklerin toksik etkisi sadece “parçacık sayısı” ile değil, parçacığın fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

7. Mikroplastikler sadece fiziksel tahriş mi yapar, yoksa biyolojik süreçleri de etkiler mi?

Cevap: Güncel çalışmalar mikroplastiklerin yalnızca mekanik partiküller olmadığını, çok yönlü biyolojik etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Hayvan modellerinde bağırsak epitel bütünlüğünün bozulması, sıkı bağlantı proteinlerinin azalması ve “sızdıran bağırsak” benzeri durumlar bildirilmiştir (Abd El-Hack ve ark., 2025; Saijo ve ark., 2025). Mikrobiyotada faydalı bakterilerin azalması ve potansiyel patojenlerin artması şeklinde disbiyozis oluşabilir (Wu ve ark., 2021). Mikroplastikler aynı zamanda inflamasyon, oksidatif stres ve hücresele hasarı tetikleyebilir; lipid peroksidasyonu ve antioksidan enzimlerde artış bu etkinin göstergeleridir (Blackburn ve Green, 2022). Yüksek doz kullanılan deneylerde büyüme performansında düşüş, yemden yararlanmanın bozulması ve dokularda histopatolojik hasar gözlenmiştir. Bu nedenle mikroplastikler hem fiziksel hem immünolojik hem de metabolik süreçlerde etkili olan “aktif biyolojik stresörler” olarak değerlendirilmelidir.

8. Mikroplastiklerin taşıdığı katkı maddeleri ve adsorbe ettiği çevresel kirleticiler neden önemlidir?

Cevap: Plastik maddeler sadece polimerden oluşmaz; üretim sırasında plastifiyanlar, UV stabilizatörleri, antioksidanlar, boya ve alev geciktiriciler gibi yüzlerce katkı maddesi eklenir (Campanale ve ark., 2020). Ayrıca üretim sürecinde oluşan istenmeyen NIAS bileşikler de toksisiteye katkıda bulunabilir. Mikroplastiklerin hidrofobik yüzeyleri çevredeki PAH’lar, PCB’ler, pestisitler ve ağır metal komplekslerini kolayca adsorbe eder.

Böylece mikroplastikler bir “taşıyıcı platform” gibi davranarak adsorbe ettiği toksinleri hayvan dokularına taşıyabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bu durum hem kimyasal yükün artmasına hem de toksisitenin sinerjik şekilde güçlenmesine yol açar. Ayrıca bağırsak epitel bütünlüğünün bozulması diğer kirleticilerin emilimini artırabilir. Dolayısıyla mikroplastiklerin etkisi, yalnızca polimer yapısına değil, üzerlerine bağlı karmaşık kimyasal kokteyle de bağlıdır.

9. Çiftlik hayvanlarının dokularında mikroplastik birikimi hangi koşullarda ortaya çıkar?

Cevap: Doku birikimi, genellikle küçük partiküllerin (<20–30 µm) bağırsak bariyerini aşarak dolaşıma geçmesiyle ilişkilidir (EFSA, 2016). Jejunumdan portal dolaşıma geçen partiküller başta karaciğer olmak üzere dalak, böbrek ve lenfoid dokulara taşınabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Kas dokusunda tespit edilen mikroplastiklerin bir kısmı sistemik dolaşımla gelen gerçek birikim olabilir; bir kısmı ise kesim ve işleme sırasında oluşan eksojen kontaminasyona bağlıdır (Yıldırım ve Buhan, 2025b). Ruminantlarda işkembede plastik lif birikimi olasılığı tartışılrsa da doğrulayan veri sınırlıdır. Doku birikimini artıran risk faktörleri arasında kronik maruziyet, yüksek yüzey alanlı partiküller, lifsi yapıdaki plastikler, oksidatif stres koşulları ve bağırsak bariyer bütünlüğünü bozacak diğer stresörler (mikotoksinler, sıcaklık stresi) yer alır. Ancak doğal saha düzeyinde birikimin tam boyutu hâlâ belirsizdir.

10. Et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerde tespit edilen mikroplastiklerin kaynağı nedir? Endojen geçiş mi, eksojen kontaminasyon mu?

Cevap: Her iki mekanizma da mümkündür ve çoğu zaman birlikte görülür. Endojen geçiş, hayvanın yem, su ve çevreden aldığı küçük boyutlu mikroplastiklerin bağırsak bariyerini aşarak dokulara taşınmasıyla oluşur; özellikle karaciğer, bağırsak ve kas dokusunda bu durum daha net rapor edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Eksojen kontaminasyon ise kesim, işleme, ekipman, su püskürtme sistemleri, plastik kasalar, ambalaj materyalleri ve depolama aşamalarında oluşur (Yıldırım ve Buhan, 2025b). Et ürünlerinde tespit edilen mikroplastiklerin önemli bir kısmının ambalaj kaynaklı olabileceği gösterilmiştir. Süt ve yumurtada ise kabuk/dış ortam

kontaminasyonu ile gerçek sistemik geçişin ayrımı halen zordur. Bu nedenle hayvansal ürünlerde bulunan mikroplastikleri değerlendirirken hem hayvanın biyolojik maruziyeti hem de post-harvest süreçlerin hijyeni birlikte incelenmelidir.

11. Mikroplastiklerin diğer yem kirleticileri (mikotoksinler, ağır metaller, pestisitler) ile birleştiğinde oluşturduğu “kokteyl etkisi” hangi bilimsel soruları gündeme getirir?

Cevap: Mikroplastikler, hem bağırsak epitelinde fiziksel hasar oluşturabilmeleri hem de kimyasal kirleticileri adsorbe ederek taşıyabilmeleri nedeniyle çoklu kirleticilerle etkileşime açık bileşik bir risk tablosu yaratır. Mikotoksinler (AFB1, DON), ağır metaller (Pb, Cd), pestisit kalıntıları ve veteriner ilaçları ile birlikte alındığında iki temel mekanizma önem kazanır: (i) Mikroplastiklerin bağırsak bariyerini zayıflatması, diğer toksinlerin emilimini artırabilir; (ii) Mikroplastik yüzeylerine adsorbe olan kirleticiler, partikül vücut dokularına geçtiğinde bu toksinleri de beraberinde taşıyabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bilimsel açıdan yanıtı açık olmayan sorular arasında; bu kirleticilerin sinerjik mi yoksa antagonistik mi etkileştiği, hangi kirletici kombinasyonlarının daha tehlikeli olduğu ve kronik düşük doz maruziyetin uzun dönem fizyolojik etkilerinin ne olduğu yer alır. Bu nedenle gelecekte mikroplastikler tek başına değil, “çoklu kirletici–bileşik etki modelleri” içinde değerlendirilmelidir.

12. Mikroplastik maruziyeti hayvan performansını (büyüme, yemden yararlanma, süt verimi, yumurta verimi) nasıl etkileyebilir?

Cevap: Hayvan performansı üzerindeki etkiler, çoğunlukla bağırsak sağlığında meydana gelen bozulmalara bağlıdır. Mikroplastikler bağırsak epitelinin bütünlüğünü azaltarak sindirim–emilim kapasitesini düşürebilir; sıkı bağlantı proteinlerini zayıflatarak “sızdıran bağırsak” sendromuna benzer bir durum yaratabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Mikrobiyotadaki dengesizlikler fermentasyon ürünlerini (örneğin kısa zincirli yağ asitleri) etkileyebilir ve yemden yararlanmayı düşürebilir. Yüksek doz kullanılan deneysel çalışmalarda canlı ağırlık artışında azalma, yemden yararlanma oranında bozulma, yumurta kabuk kalitesinde düşüş ve bazı durumlarda karaciğer ağırlığında artış rapor edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Ancak çevresel gerçekliğe daha yakın düşük doz–uzun süreli çalışmalarda sonuçlar

sınırlı ve heterojendir. Bu nedenle performans etkilerini kesinleştirmek için kronik saha düzeyini simüle eden deneyler gereklidir.

13. Mikroplastikler üreme sistemi, embriyonik gelişim ve transgenerasyonel etkiler açısından risk oluşturur mu?

Cevap: Bu alandaki veriler sınırlı olmakla birlikte, özellikle küçük partiküllerin ($<10 \mu\text{m}$) ve nanoplastiklerin biyolojik bariyerleri aşabilmesi nedeniyle potansiyel risk söz konusudur. İnsan tıbbında plasenta ve testis dokusunda mikroplastik tespiti (Ragusa ve ark., 2021; Braun ve ark., 2021; Hu ve ark., 2024) bu riskin hayvanlarda da araştırılması gerektiğini göstermektedir. Kanatlılarda yapılan bazı deneysel çalışmalarda mikroplastik maruziyetinin sperm kalitesi, endokrin yanıt ve ovaryum dokusunda stres göstergeleri üzerinden etkili olabileceğine dair bulgular vardır (Abd El-Hack ve ark., 2025). Embriyonik gelişim konusunda ise nano boyutlu plastiklerin teori olarak yumurta içi ortama geçebileceği öne sürülmektedir, ancak kanıt henüz sınırlıdır. Transgenerasyonel etkiler (epigenetik değişiklikler, yavru performansı, bağışıklık duyarlılığı) günümüzde neredeyse tamamen çalışılmamış bir konudur ve gelecekte yüksek öncelikli araştırma alanlarından biri olacaktır.

14. Mikroplastiklerin halk sağlığı boyutu nedir? Hayvansal ürünler bu riskin insanlara taşınmasında nasıl bir rol oynar?

Cevap: Mikroplastiklerin insanlarda bağırsak, akciğer, damar plakları ve plasenta gibi dokularda bulunması (OPECST, 2024) maruziyetin yaygın ve çok katmanlı olduğunu göstermektedir. Hayvansal ürünler bu risk zincirinde iki şekilde rol oynar: (i) Hayvanın sistemik dolaşımına geçen küçük partiküller kas, karaciğer ve süt gibi ürünlere endojen olarak geçebilir; (ii) Kesim, işleme ve ambalajlama sırasında dış kaynaklı kontaminasyon oluşabilir (Yıldırım ve Buhan, 2025b). İnsan bağışıklık sistemi üzerindeki etkiler, inflamasyon, endotelial stres ve olası metabolik bozukluklar bilimsel değerlendirme gerektirir. Henüz insan sağlık riskleri için net bir doz-yanıt ilişkisi belirlenememiş olsa da mikroplastiklerin endokrin bozucu kimyasalları ve ağır metalleri taşıyabilmesi, halk sağlığı açısından dikkatli bir yaklaşımı gerektirir. Bu nedenle hayvansal ürünlerde mikroplastik izleme programlarının başlatılması önemlidir.

15. Mikroplastik tespitinde kullanılan analitik yöntemlerin (FTIR, Raman, Pyrolysis-GC/MS) sınırlılıkları nelerdir? Neden standardizasyon gereklidir?

Cevap: Analitik yöntemler mikroplastik araştırmalarının en kritik zayıflık noktalarından biridir. FTIR ve Raman spektroskopisi, polimer türünü belirlemede etkilidir ancak genellikle $>20\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ partikülleri tespit edebilir; daha küçük partiküllerde hassasiyet azalır (Olmo ve Holman, 2025). Pyrolysis-GC/MS kimyasal bileşimi tanımlayabilir ancak parçacık sayısı hakkında bilgi vermez. Numune hazırlama aşamalarında (doku sindirimi, filtrasyon, kontaminasyon kontrolü) hata payı oldukça yüksektir ve laboratuvarlar arasında yöntem farklılığı sonuçların karşılaştırılmasını güçleştirir. Bu nedenle EFSA ve uluslararası kuruluşlar, mikroplastik analizlerinde birlikte çalışabilir, tekrarlanabilir ve hassasiyet sınırları açıkça tanımlı standartların geliştirilmesini önermektedir. Standardizasyon sağlanmadıkça risk değerlendirmeleri, mevzuat hazırlıkları ve gıda güvenliği yönetimi sağlıklı yürütülemez.

16. Mevcut literatüre göre, ruminantlarda (sığır-koyun) mikroplastik maruziyeti nasıl gerçekleşir ve diğer türlere göre hangi yönleriyle daha kritiktir?

Cevap: Ruminantlarda maruziyet çoğunlukla mera, toprak ve tarımsal plastik kalıntıları üzerinden oluşur. Özellikle plastik malç kullanılan tarlalarda otlatılan koyunlarda dışkıda yüksek MP seviyeleri rapor edilmiştir; örneğin Beriot ve ark. (2021), İspanya'daki sebze tarlalarında $500\text{--}1000$ parçacık/kg seviyelerini bildirmiştir. İşkembe fizyolojisi nedeniyle ruminantların sürekli geviş getirmesi, toprağı ve bitki üzerinde biriken plastik lifleri daha fazla yutmalarına neden olur. Silaj örtülerinin UV altında aşınması da önemli bir kaynaktır. Ruminantlar açısından kritik olan nokta şudur: işkembe, plastik liflerin mekanik olarak parçalanabileceğı bir ortamdır; bu nedenle mikroplastiklerin daha küçük formlara dönüşmesi ve nanoplastiklerin oluşma potansiyeli teorik olarak daha yüksektir. Ayrıca rumen mikrobiyotasındaki değişiklikler fermentasyon süreçlerini etkileyebilir. Ancak ruminantlarda doku birikimi ve metabolik etkiler konusunda veri hâlâ çok sınırlıdır.

17. Kanatlı hayvanlar (etlik piliç, yumurtacı tavuk, hindi, ördek) mikroplastiklere karşı daha hassas olabilir mi?

Cevap: Kanatlı hayvanların mikroplastiklere duyarlılığı hem sindirim fizyolojileri hem de üretim sistemlerinin özellikleri nedeniyle bazı açılardan ruminant ve monogastrik türlere kıyasla daha yüksek olabilir. Kanatlılarda bağırsak yüzeyi oldukça geniştir ve epitel geçirgenliği genç büyüme döneminde daha fazladır; bu durum küçük partiküllerin (özellikle <20 µm ve nanoplastikler) sınırlı da olsa emilme ihtimalini artırır (Shelver ve ark., 2024). Deneysel çalışmalarda polistiren mikroplastiklere maruz bırakılan etlik piliçlerde villus bütünlüğünde azalma, oksidatif stres artışı ve karaciğerde metabolik değişiklikler bildirilmiştir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Kanatlılarda inhalasyon yoluyla maruziyet de önemlidir; kümes içinde hava yoluyla taşınabilen tekstil lifleri ve plastik tozlar solunum yoluna girebilir. Kanatlı üretiminde yem tüketimi canlı ağırlığa oranla oldukça yüksek olduğu için, maruziyet birim kg vücut ağırlığı açısından diğer türlerden daha fazla olabilir. Yumurta özelinde, güncel bulgular mikroplastiklerin yalnızca dış yüzeyde değil, yumurta akı ve sarısında da düşük düzeyde endojen geçiş gösterebildiğini ortaya koymuştur. Liu ve ark. (2022), pazardan alınan yumurtalarda özellikle sarı fraksiyonunda belirgin mikroplastik varlığı bildirmiştir. En güçlü mekanizma kanıtı ise Shelver ve ark. (2024) tarafından sunulmuş olup, kontrollü koşullarda verilen işaretli mikroplastiklerin çok küçük bir kısmının kana geçtiği, 2–4 gün içinde ovaryuma ulaştığı ve gelişen yumurta sarısına taşındığı gösterilmiştir. Bu geçiş düzeyi düşük olsa da tamamen sıfır değildir ve kanatlıların gastrointestinal maruziyetinin yumurta içi mikroplastik yükünün temel belirleyicisi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla kanatlı hayvanlar, yüksek yem tüketimi, bağırsak geçirgenliğinin dönemsel artışı, kümes havasındaki liflere inhalasyon yoluyla maruziyet, lipofilik yumurta sarısının partikülleri tutma eğilimi gibi nedenlerle mikroplastiklere karşı belirli yönlerden daha duyarlı kabul edilebilir. Ancak bu duyarlılık, yüksek doku birikimi anlamına gelmemekte; çoğu partikülün hızla dışkıyla atıldığı ve endojen geçişin miktar olarak düşük olduğu mevcut verilerle uyumludur (Shelver ve ark., 2024).

18. Su ürünlerinde (balık, midye, karides) tespit edilen mikroplastikler çiftlik hayvanlarına nasıl taşınabilir?

Cevap: Deniz ürünleri, özellikle balık unu ve balık yağı üretim zinciri üzerinden çiftlik hayvanlarının yemine doğrudan geçiş sağlayabilir. Olmo ve Holman (2025) deniz kökenli yem hammaddelerinin karasal yemlere oranla daha yüksek mikroplastik içerebildiğini, özellikle lif ve fragment formunun yaygın olduğunu rapor etmektedir. Bu nedenle balık unu içeren kanatlı ve domuz yemlerinde maruziyet riski artar. Ayrıca su ürünleri işleme tesislerinde kullanılan plastik ekipmanlar da kontaminasyon kaynağı olabilir. Midye ve karides gibi filtreleyici türler, çevredeki mikroplastikleri yoğun şekilde biriktirdiği için “yüksek MP biyobirikim potansiyeline sahip hammaddeler” olarak değerlendirilmelidir. Su ürünleri kaynaklı mikroplastikler, polimer türü açısından da çeşitlilik sunar; bu durum hayvan metabolizmasında farklı biyolojik yanıtların ortaya çıkmasına neden olabilir.

19. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamada hangi önemli bilgi eksikleri vardır?

Cevap: Bilimsel çalışmalar incelendiğinde, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkilerini tam olarak değerlendirmemizi zorlaştıran dört temel bilgi boşluğu öne çıkmaktadır:

Gerçekçi doz ve uzun süreli çalışma eksikliği: Mevcut araştırmaların çoğu, hayvanlara çok yüksek miktarda mikroplastik verilen kısa süreli denemelere dayanmaktadır. Bu durum, çiftliklerde hayvanların gerçek yaşamda maruz kaldığı düşük ama sürekli mikroplastik dozlarını tam olarak yansıtmamaktadır (Yıldırım ve Buhan, 2025a).

Nanoplastiklerin belirsizliği: 1000 nanometrenin altındaki çok küçük plastik parçacıkları (nanoplastikler) hücre içine girebilecek kadar küçüktür. Ancak günümüzde bunları tespit etmek ve etkilerini ölçmek için kullanılan yöntemler yeterince gelişmiş değildir.

Birden fazla kirleticinin birlikte etkisi: Mikroplastiklerin mikotoksinler, ağır metaller veya pestisitler gibi diğer kirleticilerle birlikte yarattığı “kokteyl etkisi” henüz iyi anlaşılmamıştır. Bu maddeler birlikte daha güçlü bir toksik etki oluşturabilir.

Türler arası farklılıkların net olmayışı: Kanatlılar, ruminantlar ve domuzlar gibi farklı hayvan türlerinin sindirim sistemleri birbirinden çok

farklıdır. Bu nedenle bir türde elde edilen sonuçları diğer türlere doğrudan uyarlamak mümkün değildir.

Bu bilgi eksikleri giderilmeden, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki gerçek riskini tam olarak değerlendirmek mümkün olmayacaktır.

20. Mikroplastiklerin Tek Sağlık (One Health) perspektifi açısından değerlendirilmesi neden zorunludur?

Cevap: Mikroplastikler sadece tek bir ekosistemi değil, çevre–hayvan–insan üçgeninin tamamını etkileyen yaygın ve mobil partiküllerdir. Çevrede bozulmadan kalabilir, suda yüzer, toprakta birikir ve havaya karışabilir; böylece tüm canlı sistemlerini aynı anda etkileyen bir yayılım dinamiği oluşturur. Çiftlik hayvanları üzerindeki etkiler, nihayetinde insanlara et, süt, yumurta ve su ürünleri yoluyla taşınabilir (Naz ve ark., 2024). Ayrıca mikroplastikler, çevresel kirleticileri taşıyarak kimyasal risklerin de geçişini kolaylaştırır. Plastikler aynı zamanda biyoçeşitlilik üzerinde etkili olup toprak solucanları, polinatörler ve mikrobiyal döngüleri bozabilir. Bu nedenle mikroplastiklerin yönetimi yalnızca gıda güvenliği değil, ekosistem sağlığı, hayvan refahı, halk sağlığı ve çevre koruma politikalarının bütünleşik olarak yürütülmesini gerektirir. One Health yaklaşımı, bu karmaşık etkileşimleri tek bir çatı altında değerlendirmek için zorunlu bir çerçeve sağlar.

2. SONUÇ

Mikroplastikler, çiftlik hayvancılığı ve hayvan besleme bilimi açısından artık soyut bir çevre sorunu değil; yemden suya, barınak havasından çiftlik ekipmanlarına kadar üretim sürecinin tüm aşamalarına temas eden yeni ve çok boyutlu bir risk alanı hâline gelmiştir. Son yıllarda yapılan deneysel çalışmalar, mikroplastiklerin hayvanların sindirim kanalına, dolaşım sistemine ve bazı dokularına sınırlı da olsa geçebildiğini göstermiş; saha gözlemleri ise özellikle kanatlı ve serbest dolaşan türlerde çevresel maruziyetin sürekli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, mikroplastiklerin artık çiftlik hayvanı biyolojisinin bir parçası hâline geldiğini kabul etmeyi gerektirmektedir.

Hayvan besleme biliminde mikroplastiklerin etkilerini değerlendirirken konuyu yalnızca tek bir boyutta ele almak yeterli değildir. Gerçekçi ve bütüncül bir bakış açısı, bu partiküllerin oluşturduğu riskleri üç temel eksen-

incelemeyi gerektirir. İlk olarak, hayvan sağlığı üzerinde ortaya çıkabilecek etkiler dikkate alınmalıdır; çünkü mikroplastikler sindirim sistemi bütünlüğü, bağırsak mikrobiyotası, oksidatif denge ve bağışıklık fonksiyonları üzerinde doğrudan değişikliklere yol açabilmektedir. İkinci eksen, ürün kalitesi ve gıda güvenliği ile ilişkilidir. Hayvanların maruz kaldığı mikroplastiklerin et, süt ve yumurta gibi nihai ürünlerde iz bırakma potansiyeli hem güvenilir gıda üretimi hem de tüketici sağlığı açısından kritik bir konudur. Üçüncü ve daha geniş çerçeveyi oluşturan eksen ise Tek Sağlık yaklaşımı ve sürdürülebilir üretimdir. Mikroplastiklerin çevre–hayvan–insan döngüsündeki hareketliliği, bu partiküllerin yalnızca çiftlik hayvanlarını değil tüm ekosistemi ilgilendiren bir sorun olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla mikroplastik maruziyetinin azaltılması, sürdürülebilir hayvansal üretim sistemlerinin oluşturulması ve uzun vadeli çevresel risklerin yönetilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bugün için eldeki veriler, mikroplastiklerin büyük çoğunluğunun bağırsak sistemi içinden hızla atıldığını, fakat küçük bir fraksiyonun fizyolojik süreçler ile sınırlı düzeyde temas kurabildiğini göstermektedir. Bu temasın kronik ve düşük dozda uzun vadeli sonuçları ise henüz tam olarak tanımlanmamıştır. Bağırsak bariyerinde ince ama anlamlı değişiklikler, oksidatif stres, mikrobiyota dengesinde kaymalar ve bazı türlerde antioksidan yanıtın artması gibi bulgular, gelecekte daha hassas deneylerle derinlemesine anlaşılması gereken işaretlerdir. Bugünün bilgisiyle mikroplastikleri “akut toksin” olarak nitelendirmek doğru değildir; ancak hayvan sağlığı açısından düşük dozlu, uzun dönemli ve çok faktörlü bir stres faktörü olma potansiyeli ciddiye alınmalıdır.

Ürün kalitesi açısından bakıldığında, et, süt ve yumurtada tespit edilen mikroplastik seviyeleri genellikle düşüktür; fakat bu düşük düzey bile tüketici algısı açısından büyük önem taşır. Mikroplastik içeren bir ürünün biyolojik olarak zararlı sayılması için yüksek konsantrasyonlara ulaşması gerekmeseydi tüketici gözünde güven kaybının ortaya çıkması için yalnızca birkaç parçacığın varlığı yeterlidir. Bu nedenle mikroplastikler hem biyolojik hem de sosyo-ekonomik bir risk parametresidir. Üretici işletmeler için güvenli üretim, artık yalnızca besin maddelerinin optimizasyonu değil; aynı zamanda plastik kaynaklı kirliliğin kaynağında azaltılması anlamına gelmektedir. Yemlerin taşındığı torbalar, big-bag astarları, öğütme ve karıştırma hatlarındaki plastik ekipmanlar, suluk hatları, havalandırma kanallarındaki toz–lif birikimi ile

plastik tabanlı yer kaplamaları; tümü mikroplastik kaynağı olabilir. Bu nedenle, mikroplastik maruziyetini azaltmak için üretim zincirinin tüm basamaklarında bütüncül önlemler alınması gerekmektedir. İlk olarak, yem kaynaklı risklerin azaltılması büyük önem taşır. Yemlerin taşınması ve depolanmasında kullanılan plastik torba ve astarların daha dayanıklı veya alternatif malzemelerle değiştirilmesi, üretim hattındaki sert plastik parçaların aşınmasını önlemek amacıyla düzenli bakım yapılması, toz tutucu filtre sistemlerinin aktif biçimde kullanılması ve balya ipi, naylon örtü, yemlik kenarları gibi mikro-aşınma potansiyeli taşıyan bileşenlerin periyodik olarak kontrol edilmesi, yemden kaynaklı partikül yükünü ciddi ölçüde azaltabilir. İkinci olarak, su ve barınak yönetimi mikroplastik girişlerinin sınırlandırılmasında kritik bir role sahiptir. PVC ve plastik su hatlarının belirli aralıklarla yenilenmesi, su sistemlerinde sediment ve partikül tutucu filtrelerin kullanılması ve kümes havasındaki lif ve toz birikimini azaltacak etkin havalandırma ile toz yönetimi protokollerinin uygulanması hem hayvan sağlığını korur hem de mikroplastik yükünü azaltır. Üçüncü düzey olan atık ve hijyen yönetimi ise çiftlik ortamındaki plastik parçalanmasını ve çevresel mikroplastik yayılımını sınırlamak açısından önemlidir. Temizlik işlemlerinde aşınma oluşturan plastik bazlı fırçalar yerine daha dayanıklı kompozit materyallerin tercih edilmesi, plastik ambalaj atıklarının kapalı ve kontrollü sistemlerde toplanması ve çiftlik içinde uygun geri dönüşüm noktalarının oluşturulması bu süreci destekler. Bu üç düzeyin birlikte uygulanması hem hayvanların mikroplastik maruziyetini azaltır hem de sürdürülebilir üretim sistemlerine geçişi güçlendirir.

Güncel düzenlemelerde mikroplastikler çoğunlukla ambalaj migrasyonu, plastik katkı maddeleri, yemlerde plastik kalıntıları ve çevre kirliliği başlıkları altında dolaylı olarak ele alınmaktadır. Mikroplastikler için tür-boyut-limit bazlı spesifik “maksimum kalıntı seviyeleri” henüz tanımlanmamıştır. Mevcut bilimsel veriler ve uluslararası kurumların gündemine aldığı konular değerlendirildiğinde, gelecek yıllarda mikroplastiklere ilişkin daha net ve bağlayıcı düzenlemelerin ortaya çıkacağı öngörülebilmektedir. Bu kapsamda özellikle dört alanda belirgin bir düzenleyici eğilim dikkat çekmektedir. İlk olarak, yemlerde plastik parçacıkları için maksimum tolerans seviyelerinin belirlenmesi, hayvan besleme zincirinin standardizasyonu açısından önem kazanmaktadır. İkinci

olarak, kuluçkahane, kesimhane ve yumurta işleme aşamalarında ikincil plastik kontaminasyonunun sınırlandırılmasına yönelik hijyen ve proses kriterlerinin daha detaylı hale getirilmesi beklenmektedir. Buna paralel olarak, çevresel yükü azaltmayı amaçlayan biyobozunur polimerler için kalite ve güvenlik sertifikasyonlarının zorunlu hâle gelmesi, üreticilerin malzeme seçimini doğrudan etkileyecektir. Ayrıca, biyolojik bariyerleri aşma potansiyeli yüksek olan nano boyuttaki partiküller için ayrı ve daha hassas değerlendirme kriterlerinin oluşturulması kaçınılmaz görünmektedir. Tüm bunlara ek olarak, mikroplastiklerin çevre-hayvan-insan döngüsündeki hareketliliğini dikkate alan Tek Sağlık yaklaşımıyla entegre çevresel risk değerlendirmesi, ulusal ve uluslararası düzenlemelerde daha merkezi bir konuma yerleşecektir. Bu eğilimler, önümüzdeki dönemde mikroplastik yönetiminin daha sistematik, ölçülebilir ve bilim temelli bir çerçevede ele alınacağını göstermektedir. Bu sürecin temel itici gücü, tüketici hassasiyeti ve gıda güvenliği otoritelerinin bilimsel belirsizlikleri azaltma isteğidir. Hayvan besleme uzmanlarının bu düzenlemelere proaktif uyum sağlaması, gelecekteki üretim standartlarının belirlenmesinde stratejik avantaj yaratacaktır.

Mikroplastik araştırmalarının odak noktası, önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde değişerek daha ileri, bütüncül ve çözüm odaklı bir yapıya dönüşecektir. Bu dönüşümün temel eksenleri şimdiden belirginleşmektedir. İlk olarak, gelişmiş analitik metotlar araştırmaların yönünü şekillendirecektir. Nano-ölçekli partikülleri tespit edebilen yüksek çözünürlüklü spektroskopi ve görüntüleme tekniklerinin yaygınlaşması, mikroplastiklerin gerçek biyolojik davranışlarının daha doğru anlaşılmasını sağlayacaktır. Buna ek olarak, hızlı, düşük maliyetli ve sahada uygulanabilir test kitlerinin geliştirilmesi, çiftlik koşullarında rutin izleme süreçlerini kolaylaştıracaktır. İkinci olarak, biyobozunur ve düşük aşınma eğilimli yeni polimerlerin hayvancılık sistemlerine entegrasyonu öne çıkacaktır. Yem torbaları, su hatları, barınak malzemeleri ve diğer çiftlik ekipmanlarında plastik bağımlılığını azaltmayı hedefleyen yenilikçi materyaller, tarımsal plastik kullanımını minimize eden ekolojik çözümlerle birleşerek üretim zincirinin çevresel yükünü azaltma potansiyeli taşımaktadır. Üçüncü olarak, probiyotik ve mikrobiyal biyogiderim yaklaşımları, mikroplastiklerin biyolojik ortamda daha hızlı uzaklaştırılmasına yönelik umut verici bir alan olarak görülmektedir. Bağırsak mikrobiyotasını hedefleyen stratejiler, partiküllerin sindirim sisteminden

atılımını destekleyebilir; aynı şekilde çiftlik atıklarında bakteriyel veya enzimatik süreçlerle plastik parçalanmasının hızlandırılması, çevresel birikimi azaltmaya katkı sağlayacaktır. Dördüncü gelişme alanı ise Tek Sağlık modelleri ve yapay zekâ destekli risk analizidir. Hayvan–çevre–insan etkileşimini kapsayan mikroplastik akış modelleri, maruziyetin ekosistem içindeki dinamiklerini daha iyi açıklayacaktır. Büyük veri analitiği ve yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri ise farklı üretim sistemleri için risk haritaları oluşturarak gelecekteki düzenlemelere ve kontrol stratejilerine yön verecektir. Tüm bu gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, mikroplastiklerin hayvancılık ve gıda zinciri üzerindeki risklerinin yönetimi günümüzden çok daha sistematik, ölçülebilir ve öngörülebilir bir yapıya kavuşacaktır.

Tüm bulgular bir arada değerlendirildiğinde mikroplastikler, hayvan besleme ve çiftlik hayvancılığı için “yüksek dozda akut bir tehlike” olmaktan ziyade, “düşük dozda ancak kesintisiz maruziyetle işleyen uzun vadeli bir stres faktörü” olarak görülmelidir. Bu nedenle abartılı alarmcı yaklaşımlar kadar, riski küçümseyen “yok sayıcı” yaklaşımlar da bilimsel açıdan doğru değildir. En uygun yaklaşım, temkinli–kanıta dayalı ve çok disiplinli bir değerlendirme modelidir.

Bu kitap bölümünde sunulan Soru–Cevap yapısı, okurların özellikle lisans ve lisansüstü öğrencilerin karmaşık bir konuyu adım adım anlamasına yardımcı olmayı hedeflemiştir. Amaç yalnızca mevcut bilgiyi aktarmak değil, aynı zamanda hangi soruların hâlen yanıtsız olduğunu, gelecekteki tez ve araştırmalarda hangi boşlukların doldurulabileceğini fark ettirmektir. Sonuç olarak mikroplastikler, çiftlik hayvancılığı için artık yok sayılamayacak bir parametredir. Hayvan besleme uzmanları, araştırmacılar ve düzenleyici otoriteler; yem güvenliğini, çiftlik yönetimini ve hayvansal ürün kalitesini bu yeni gerçekliğe göre yeniden değerlendirmek durumundadır. Bu süreçte başarı, bilimsel titizlik, çok disiplinli iş birliği ve genç araştırmacıların konuya eleştirel–sorgulayıcı bir zihinle yönelmesi ile mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, 104, 104456.
- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., Fang, C., & Rahman, M. M. (2024). The unseen threat of the synergistic effects of microplastics and heavy metals in aquatic environments: A critical review. *Current Pollution Reports*, 10(3), 478–497.
- Al Nahian, S., Rakib, M. R. J., Kumar, R., Haider, S. M. B., Sharma, P., & Idris, A. M. (2023). Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 855, 158892.
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., & Huerta Lwanga, E. (2021). Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, 755, 142653.
- Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51, 518–530.
- Braun, T., König, M., Reuter, S., & Fegert, J. M. (2021). Detection of Microplastic in Human Placenta and Meconium in a Clinical Setting. *Pharmaceutics*, 13(7), 921.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, 882, 163305.
- Djouina, M., Loison, S., & Body-Malapel, M. (2024). Recent progress in

- intestinal toxicity of microplastics and nanoplastics: Systematic review of preclinical evidence. *Microplastics*, 3(2), 217–233.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6), e04501.
- El Gazzar, W. B., Sliem, R. E., Bayoumi, H., Elsayed Nasr, H., Shabanah, M., Elalfy, A., Radwaan, S. E., Gebba, M. A., Mansour, H. M., Badr, A. M., Amer, M. F., Ashour, S. S., Morsi, H., Aboelkomsan, S. A. F., Baioumy, B., Hamid Sayed, A. E., & Farag, A. A. (2023). Melatonin alleviates intestinal barrier damaging effects induced by polyethylene microplastics in albino rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13619.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782.
- Hu, C. J., Garcia, M. A., Nihart, A., Liu, R., Yin, L., Adolph, N., Gallego, D. F., Kang, H., Campen, M. J., & Yu, X. (2024). Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis. *Toxicological Sciences*, 200(2), 235–240.
- Huerta Lwanga, E., Mendoza-Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Segura, G. E., Gertsens, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7, 14071.
- Kadac-Czapska, K., Knez, E., & Grembecka, M. (2022). Food and human safety: The impact of microplastics. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Advance online publication.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks—Are they immune from microplastics contamination? *Science of the Total Environment*, 714, 136823.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status.

- Food Chemistry*, 397, 133771.
- Naz, S., Chatha, A. M. M., Khan, N. A., Ullah, Q., Zaman, F., Qadeer, A., Khan, I. M., Danabas, D., Kiran, A., & Skalickova, S. (2024). Unraveling the ecotoxicological effects of micro and nano-plastics on aquatic organisms and human health. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1390510.
- Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST). (2024). *Les impacts des plastiques sur la santé humaine* (Rapport n° XXX, XVIIe législature / Sénat n° XXX, 2024-2025). Assemblée nationale & Sénat. <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/17/organes/delegations-comites-offices/opepst>
- Olmo, L., & Holman, B. W. B. (2025). The sources and impact of microplastic intake on livestock and poultry performance and meat products: A review. *Animal Production Science*, 65, AN25022.
- Oßmann, B., Schymanski, D., Ivleva, N. P., Fischer, D., Fischer, F., Dallmann, G., & Welle, F. (2019). Comment on “Exposure to microplastics (<10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study by Zuccarello et al. [Water Research 157 (2019) 365–371]”. *Water Research*, 162, 516–517.
- Pourebrahimi, S., & Pirooz, M. (2023). Microplastic pollution in the marine environment: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100327.
- Ragusa, A., Svelato, G., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274.
- Rodríguez-Seijo, A., & Pereira, R. (2019). Microplastics in agricultural soils: Are they a real environmental hazard? In J. C. Sanchez-Hernandez (Ed.), *Bioremediation of agricultural soils* (pp. 45–60). CRC Press.
- Saijo, Y., Hasegawa, Y., Okamura, T., Ono, Y., Ichikawa, T., Nakanishi, N., Tsuchimura, Y., Morioka, T., Tanaka, S., Takano, H., Hamaguchi, M., & Fukui, M. (2025). Negative impact of oral exposure to polystyrene microplastics on glucose tolerance and intestinal environment in mice is independent of particle size. *Environmental Sciences Europe*, 37(125),

1–16.

- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162.
- Sharma, P., & Vidyarthi, V. K. (2024). Impact of microplastic intake via poultry products: Environmental toxicity and human health. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 14, 100426.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of the Total Environment*, 909, 168512.
- Siddiqui, S. A., Singh, S., Bahmid, N. A., Shyu, D. J. H., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2023). Polystyrene microplastic particles in the food chain: Characteristics and toxicity – A review. *Science of the Total Environment*, 892, 164531.
- Solayman, H. M., Robby, M. D. A., Satriaji, F. V., Hossain, M. K., Kang, K., Abd Aziz, A., Shiu, R.-F., & Jiang, J.-J. (2026). *Mapping global microplastic pollution: Integrating advanced detection and monitoring in aquatic ecosystems*. *Marine Pollution Bulletin*, 222, 118685.
- Toussaint, B., Raffael, B., Angers, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio Echevarria, I. M., & Van den Eede, G. (2019). Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain. Joint Research Centre (European Commission). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(5), 639–673.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study* (Report EH22-01). Vrije Universiteit Amsterdam.
- Wiesinger, H. (2024). *Produits chimiques du plastique – un problème en médecine?* Écoscope, 2024, 12–14.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Yıldırım, A., & Buhan, E. (2025a). Çiftlik hayvanlarında mikroplastik

- kaynakları ve maruziyet yolları. In H. Erdem, A. Yıldırım, N. Yeşilayer, & C. Ç. Gence (Eds.), *Tarım Ekosistemlerinde Mikroplastik* (in press).
- Yıldırım, A., & Buhan, E. (2025b). Hayvansal ürünlerde mikroplastikler. In H. Erdem, A. Yıldırım, N. Yeşilayer, & C. Ç. Gence (Eds.), *Tarım Ekosistemlerinde Mikroplastik* (in press).
- Zhang, Q., Zhang, Y., Jing, L., & Zhao, H. (2024). *Microplastics induced inflammation in the spleen of developmental Japanese quail (Coturnix japonica) via ROS-mediated p38 MAPK and TNF signaling pathway activation*. *Environmental Pollution*, 341, 122891.
- Ziajahromi, S., Slynkova, N., Dwyer, J., Griffith, M., Fernandes, M., Jaeger, J. E., & Leusch, F. D. L. (2024). Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*, 250, 121071.

BÖLÜM 13

ÇEVRESEL KOMPONENTLER, BİTKİSEL VE HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Prof. Dr. Yakup BUDAK¹

Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ²

Dr. Öğr. Üyesi. Elif AKTÜRK BOZDEMİR³

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18049054>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, Türkiye. yakup.budak@gop.edu.tr, Orcid ID:0000-0001-7108-5548

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, Türkiye. ozgurdogan.uluoğlu@gop.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-2357-9604

³ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu · Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Tokat, Türkiye, elif.akturkbozdemir@gop.edu.tr , Orcid ID: 0009-0008-4226-7834

1. GİRİŞ VE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

1.1. Mikro plastikler: Tanım ve Sınıflandırma

Mikro plastikler (MP), 5 milimetreden (mm) küçük boyuttaki sentetik polimer parçacıkları olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından uluslararası düzeyde kabul görmüştür (WHO, 2019; FAO, 2021). Mikro plastiklerin alt boyut sınırı ise genellikle 1 mikrometre (μm) olarak belirlenmiş olup, bu değerin altındaki partiküller "nanoplastik" kategorisinde değerlendirilmektedir (Gigault vd., 2018; Marsden vd., 2019).

Plastik malzemeler, 20. yüzyılın ortalarından itibaren endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve günümüzde küresel plastik üretimi yıllık 400 milyon tonu aşmıştır. Bu yoğun kullanım, çevresel plastik kirliliğinin artmasına ve mikro plastiklerin ekosistemler üzerindeki potansiyel etkilerinin araştırılmasına yol açmıştır.

1.1.1. Boyut Sınıflandırması

Mikro plastikler boyutlarına göre farklı kategorilere ayrılabilir. Cole ve diğerleri (2011) tarafından önerilen sınıflandırma sistemi yaygın olarak kabul görmektedir:

- Makroplastikler: >25 mm
- Mezoplastikler: 5-25 mm
- Büyük mikro plastikler: 1-5 mm
- Küçük mikro plastikler: <1 mm
- Nanoplastikler: <1 μm (bazı kaynaklarda <100 nm)

Gigault ve diğerleri (2018), nanoplastiklerin üst boyut sınırını 1 μm olarak tanımlarken, bazı araştırmacılar bu sınırı 100 nm olarak belirlemektedir. Bu terminolojik farklılıklar, alandaki standardizasyon ihtiyacını vurgulamaktadır.

1.1.2. Polimer Türleri

Tarımsal sistemlerde ve gıda matrislerinde en sık karşılaşılan polimer türleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından farklılık göstermektedir (Horton vd., 2017; Zhang vd., 2020; Lewicka vd., 2024; Guilbert vd., 2005). Tablo 1, başlıca polimer türlerini, fiziksel özelliklerini ve tarımsal kaynaklarını özetlemektedir.

Tablo 1. Başlıca Polimer Türleri, Fiziksel Özellikleri ve Tarımsal Kaynakları

Polimer Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Tarımsal Kaynaklar	Çevresel Davranış
Polietilen (PE)	0.91-0.97	Mulç filmleri, sera örtüleri, sulama boruları	Suda yüzer, toprak yüzeyinde birikir
Polipropilen (PP)	0.90-0.92	Ambalaj malzemeleri, ip ve halatlar	Suda yüzer, hafif yapısı nedeniyle rüzgârla taşınır
Polietilen tereftalat (PET)	1.38-1.40	Şişeler, ambalaj malzemeleri	Suda çöker, sedimentle birikir
Polistiren (PS)	1.04-1.07	Köpük ambalajlar, yalıtım malzemeleri	Kırılgan yapısı nedeniyle hızla parçalanır
Polivinil klorür (PVC)	1.16-1.58	Sulama boruları, sera yapı malzemeleri	Suda çöker, UV'ye dirençli
Poliamid (PA)	1.13-1.15	Balıkçılık ağıları, sentetik lifler	Suda çöker, mekanik dayanıklılığı yüksek

Polimerlerin yoğunluk değerleri, çevresel davranışlarını ve analitik yöntemlerdeki yoğunluk ayırma prosedürlerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, PE ve PP gibi düşük yoğunluklu polimerler suda yüzerken, PET ve PVC gibi yüksek yoğunluklu polimerler çökmektedir (Li vd., 2018).

1.1.3. Morfolojik Sınıflandırma

Mikro plastikler şekillerine göre beş ana kategoriye ayrılır (Cole vd., 2011):

1. Fragmentler: Düzensiz şekilli, keskin kenarlı parçalar; büyük plastik ürünlerin fiziksel ve kimyasal bozulması sonucu oluşur. Fragmentler, genellikle mulç filmlerinin ve plastik ambalajların parçalanması ile ortaya çıkar.
2. Fiberler: İpliksi, uzun yapılar; tekstil ürünlerinin yıkanması, balıkçılık ağılarının aşınması sonucu ortaya çıkar. Fiberler, atmosferik mikro plastik kirliliğinin baskın formudur (Allen vd., 2019).
3. Filmler: İnce, esnek tabakalar; tarımsal mulç filmlerinin parçalanması ile oluşur. Film parçaları, toprak örneklerinde sıklıkla tespit edilmektedir.

4. Pelletler: Küresel veya silindirik granüller; endüstriyel hammadde olarak kullanılan reçine pelletleri. Pelletler, birincil mikroplastik kategorisinde değerlendirilir.
5. Köpükler: Gözenekli yapılar; genişletilmiş polistiren (EPS) ürünlerinin parçalanması ile oluşur.

1.1.4. Kaynak Sınıflandırması

Mikro plastikler, kaynaklarına göre iki ana kategoriye ayrılır:

Birincil Mikro plastikler: Doğrudan mikro boyutta üretilen veya kullanılan plastik partiküller:

- Endüstriyel reçine pelletleri (nurdles)
- Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerindeki mikro boncuklar
- Hava püskürtmeli temizlik malzemelerindeki partiküller

İkincil Mikro plastikler: Daha büyük plastik ürünlerin çevresel bozulması sonucu oluşan partiküller:

- Tarımsal mulç filmlerinin parçalanması
- Plastik ambalajların fotodegradasyonu
- Lastik aşınması sonucu oluşan partiküller

Tarımsal Sistemlerde Mikroplastik Kaynakları

Tarımsal ekosistemler, modern tarım uygulamalarında yaygın plastik kullanımı nedeniyle önemli bir mikro plastik kaynağı ve aynı zamanda alıcı ortam konumundadır (Huang vd., 2020).

1.2. Doğrudan Tarımsal Plastik Kullanımı

Mulç Filmleri: Tarımsal mikro plastik kirliliğinin en önemli kaynağıdır. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) veya doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) filmler, toprak sıcaklığını düzenlemek, nem kaybını önlemek ve yabancı ot kontrolü sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Hasat sonrası bu filmlerin tam olarak toplanamaması sonucu, yıllık 1-2 ton/ha arasında plastik kalıntısının toprakta biriktiği rapor edilmiştir (Steinmetz vd., 2016). Çin'de yapılan bir çalışmada, 30 yıllık mulç film kullanımı sonrası toprak yüzeyinde 400-1200 kg/ha plastik kalıntısı tespit edilmiştir (Liu vd., 2018).

Sera Örtüleri ve Tüneller: Polietilen veya etilen vinil asetat (EVA) kopolimer esaslı sera örtüleri, UV radyasyonu ve mekanik aşınma nedeniyle zamanla parçalanarak mikro plastik salınımına neden olur. Sera örtülerinin ortalama kullanım ömrü 3-5 yıldır ve değişim sırasında önemli miktarda plastik atık oluşur.

Sulama Sistemleri: Damla sulama borularında kullanılan PVC veya PE malzemeler, su basıncı, kimyasal gübreler ve UV etkisi ile bozularak mikro plastik salabilir.

Gübre ve Pestisit Ambalajları: Plastik torba ve bidonlar, uygun bertaraf edilmediğinde tarım arazilerinde birikerek parçalanır.

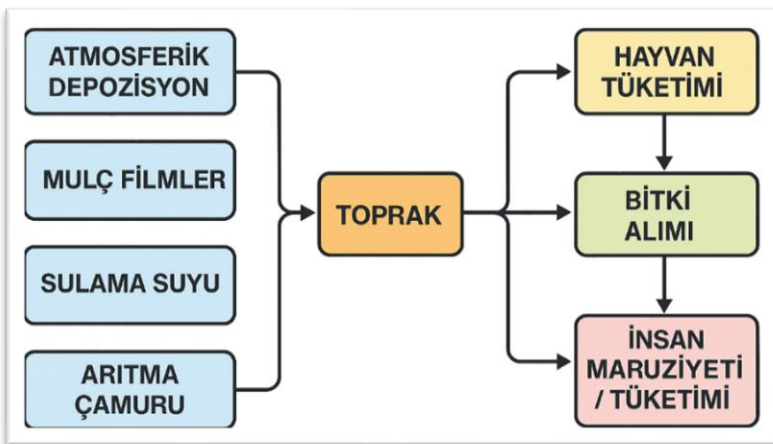
Yavaş Salımlı Gübreler: Polimer kaplı kontrollü salımlı gübreler, besin maddelerini serbest bıraktıktan sonra toprakta polimer kabuk kalıntısı bırakır (Li vd., 2020; Li Juan vd., 2022).

1.2.1. İkincil ve Dolaylı Kaynaklar

Biyokatı Gübreler ve Kompost: Atıksu arıtma tesislerinden elde edilen arıtma çamuru (biyokatı), yüksek besin içeriği nedeniyle tarımda gübre olarak kullanılmaktadır. Ancak bu çamurlar, evsel atıksulardaki mikro plastikleri (özellikle tekstil fiberlerini) yüksek oranda içerir. Bir çalışmada, arıtma çamurunda 1000-24000 parçacık/kg kuru ağırlık arasında mikroplastik tespit edilmiştir (Corradini vd., 2019; Boen ve Haraldsen, 2011). Kompost üretiminde kullanılan organik atıklar da plastik kontaminasyonu içerebilir.

Atmosferik Depozisyon: Mikro plastikler, atmosferde uzun mesafelere taşınabilir ve rüzgar veya yağış yoluyla tarım arazilerine çökebilir. Alp Dağları'nda yapılan bir çalışmada, uzak dağlık bölgelerde bile günlük 365 parçacık/m² atmosferik mikroplastik çökmesi tespit edilmiştir (Allen vd., 2019; Pacyna, 2008).

Sulama Suyu: Yüzey suyu veya arıtılmış atıksu ile sulama yapılan alanlarda, sulama suyu ile birlikte mikro plastikler toprağa taşınır.



Şekil 1. Tarımsal Ekosistemde Mikroplastik Döngüsü

Not: Şematik diyagram, plastik kaynaklarından başlayarak toprak, bitki alımı, hayvan tüketimi, hayvansal ürünler ve nihayetinde insan maruziyetine kadar olan döngüyü göstermektedir.

1.3. Analiz Gerekliliği ve Analitik Zorluklar

1.3.1. Analiz Gerekliliği

Tarımsal sistemlerdeki mikroplastik kirliliğinin çevresel komponentlerde, bitkisel ve hayvansal ürünlerde güvenilir bir şekilde tespit edilmesi ve karakterize edilmesi, birkaç kritik nedenden dolayı zorunludur:

1. Gıda Güvenliği: Mikroplastiklerin topraktan bitkilere, bitkilerden hayvanlara ve nihayetinde insanlara transfer potansiyeli, gıda zinciri güvenliği açısından endişe yaratmaktadır. Nitekim son çalışmalarda marul, buğday ve pirinç gibi tarım ürünlerinde mikroplastik varlığı gösterilmiştir.
2. Çevresel Etki: Topraktaki mikroplastikler, toprak fiziksel özelliklerini (su tutma kapasitesi, havalanma), kimyasal özelliklerini (besin maddesi döngüsü) ve biyolojik özelliklerini (mikrobiyal aktivite, solucan popülasyonları) etkileyebilme potansiyeline sahiptir.
3. İnsan Sağlığı Riski: Mikroplastiklerin potansiyel toksikolojik etkileri (fiziksel hasar, kimyasal toksisite, vektör etkisi) ve özellikle nanoplastiklerin hücresel düzeyde etkileşimleri henüz tam olarak anlaşılamamıştır.

Bu analizler sonucu elde edilen analitik verilerin güvenilirliği, gıda güvenliği ve çevre sağlığı açısından risk değerlendirmesi yapılması, düzenleyici politikaların oluşturulması ve tüketici güvenliğinin sağlanması için temel oluşturmaktadır.

1.3.2. Analitik Zorluklar

Ancak, bu kritik analizler, aşağıda sıralanan önemli metodolojik zorluklarla karşı karşıyadır:

- Matris Karmaşıklığı: Mikroplastiklerin izole edilmeye çalışıldığı toprak, bitki ve hayvan dokuları gibi farklı matrisler, kompleks yapıları nedeniyle izolasyonu ve tespiti zorlaştırmaktadır.

- Toprak: Yüksek organik madde içeriği (%1-10), çeşitli mineral bileşenler (kil, silt, kum) ve bitki kalıntıları, mikroplastiklerin izolasyonunu zorlaştırır.
- Bitki Dokuları: Selüloz, lignin, pektin, proteinler ve lipidler gibi kompleks organik yapılar, analiz sırasında girişim yaratabilir.
- Hayvansal Ürünler: Yüksek protein ve lipid içeriği, mikroplastik ekstraksiyonunu engelleyen emülsiyonlar oluşturur.
- Polimer Çeşitliliği: Farklı polimer tipleri, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olduğundan, tek bir analitik yöntemle tüm polimer tiplerinin tespiti mümkün olmamaktadır.
- Kontaminasyon Riski: Mikroplastiklerin, özellikle sentetik fiberlerin her yerde bulunması (ubiquity), analiz sürecinde kontaminasyon riskini artırmakta ve sonuçların güvenilirliğini etkilemektedir. Kontaminasyon kaynakları arasında laboratuvar havası, plastik laboratuvar malzemeleri (pipet uçları, tüpler), kullanılan reaktifler ve hatta analist giysileri bulunmaktadır . Nitekim bir çalışmada, kontrol önlemleri alınmayan laboratuvarlarda prosedürel blank (boş) örneklerde 0-20 parçacık/örnek arasında kontaminasyon tespit edilmiştir.
- Boyut Aralığı Genişliği (Boyut Heterojenliği): Partiküllerin 5 mm'den 1 μ m'ye (hatta nanometre düzeyine) kadar uzanan geniş boyut aralığı, tek bir analitik teknikle tüm spektrumu kapsamayı imkânsız kılar. Özellikle <10 μ m boyutundaki partiküllerin tespiti ve karakterizasyonu büyük zorluk teşkil eder.
- Standardizasyon Eksikliği: Farklı araştırma grupları farklı örnekleme, ekstraksiyon, tespit ve raporlama protokolleri kullanmaktadır. Bu durum, çalışmalar arası karşılaştırmayı ve meta-analiz yapmayı zorlaştırmaktadır.

Bu nedenlerle, mikroplastik analizlerinde standartlaştırılmış metodolojilerin geliştirilmesi, kalite kontrol ve kalite güvence prosedürlerinin titizlikle uygulanması zorunludur.

2. ÖRNEKLEMENİN TEMEL PRENSİPLERİ

2.1. Örneklemme Stratejileri

Mikroplastik analizlerinde örneklemme stratejisi, çalışmanın amacına, hedef matrise ve araştırma sorusuna bağlı olarak belirlenmektedir. Temel örneklemme yaklaşımları arasında rastgele örneklemme, sistematik örneklemme ve tabakalı örneklemme yer almaktadır (GESAMP, 2019).

Rastgele Örneklemme: Örneklemme noktalarının rastgele seçildiği bu yaklaşım, örneklemme yanlılığını minimize etmekte ve istatistiksel analizler için uygun veri seti sağlamaktadır.

Sistematik Örneklemme: Belirli bir düzen veya ızgara sistemi kullanılarak örneklemme noktalarının seçildiği bu yöntem, alanın homojen bir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır.

Tabakalı Örneklemme: Çalışma alanının farklı özelliklere sahip alt bölgelere (tabaka) ayrılarak her tabakadan örneklemme yapılması, heterojen alanların daha iyi temsil edilmesini sağlamaktadır.

2.2. Örneklemme Ekipmanları ve Kontaminasyon Kontrolü

Mikro plastik örneklemesinde kullanılan ekipmanların seçimi, hedef partikül boyutuna ve matris tipine bağlıdır. Örneklemme ekipmanları, mümkün olduğunca metal veya cam malzemeden olmalı, plastik içeren ekipmanların kullanımından kaçınılmalıdır (Lusher et al., 2017).

Kontaminasyon kontrolü için alınması gereken önlemler:

- Örneklemme sırasında pamuklu laboratuvar önlüğü giyilmeli, sentetik giysilerden kaçınılmalıdır
- Örnekler, hemen kapaklı cam veya metal kaplara alınmalıdır
- Örneklemme alanında rüzgar yönü dikkate alınmalıdır
- Her örneklemme serisinde prosedürel blank (boş) örnekler alınmalıdır (Hermesen et al., 2018)

2.3. Örnek Saklama ve Taşıma

Mikro plastik örneklerinin saklanması ve taşınması sırasında kontaminasyon riskini minimize etmek için örnekler cam veya alüminyum folyo ile kaplanmış kaplarda saklanmalıdır. Örnekler, analiz edilene kadar karanlık ve serin ortamda muhafaza edilmelidir (Lusher et al., 2017). Biyolojik

bozunmayı önlemek için gerekli durumlarda örnekler dondurulabilir veya %70 etanol içinde saklanabilir.

3. ÇEVRESEL MATRİSLERDE MİKROPLASTİK ANALİZİ

3.1. Toprak Örneklerinde Mikroplastik Analizi

Toprak, tarımsal sistemlerde mikro plastiklerin birincil birikim ortamıdır ve analizi en karmaşık matrislerden biridir.

3.1.1. Örneklemeye Stratejileri ve Kontaminasyon Kontrolü

Toprak örneklemesi, araştırma alanının özelliklerine göre dikkatle planlanmalıdır. Tarım arazilerinde mikroplastik dağılımının heterojen olması nedeniyle, temsili örneklemeye kritik öneme sahiptir. Genellikle 0-10 cm derinlikten en az 500 g toprak alınması önerilse de , mikro plastiklerin toprak profilindeki dikey dağılımını anlamak için katmanlı örneklemeye (örn. 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm) yapılması tercih edilmelidir.

Temsili bir örnek elde etmek için yaygın olarak kompozit örneklemeye yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşımda, "W" veya "X" şeklinde bir rota izlenerek 5-10 alt örnek alınır ve bu alt örnekler homojen şekilde karıştırılarak tek bir kompozit örnek oluşturulur.

Kontaminasyon kontrolü, örneklemeye aşamasının en kritik adımıdır. Bu amaçla:

- Mutlaka paslanmaz çelik kürek ve spatula kullanılmalıdır.
- Örnekler, plastik olmayan, temiz cam veya alüminyum folyo kaplı kaplara alınmalıdır.
- Örneklemeye sırasında sentetik giysilerden kaçınılmalıdır.
- Örneklemeye derinliği, koordinatlar, toprak tipi, nem içeriği ve organik madde içeriği gibi saha bilgileri eksiksiz kaydedilmelidir.

3.1.2. Ön İşlem (Kurutma ve Eleme)

Toprak örneklerinin ön işleme aşaması, mikro plastiklerin toprak matrisinden ayrıştırılması ve konsantre edilmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu aşama genellikle şu adımları içerir (Zhang et al., 2018):

- Kurutma: Toprak örnekleri, mikro plastiklerin yapısını bozabilecek yüksek sıcaklıklardan kaçınarak, oda sıcaklığında veya 40°C'nin altında kurutulmalıdır.

- Eleme: Kurutulan toprak örnekleri, genellikle 5 mm ve 1 mm gözenek çaplarına sahip paslanmaz çelik eleklerden geçirilerek boyut fraksiyonlarına ayrılmaktadır.

3.1.3. Yoğunluk Ayrımı Protokolleri

Toprak matrisinden mikro plastiklerin ayrılması için yoğunluk ayrımı yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, mikro plastiklerin toprak partikülleri ve organik maddeden ayrılmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Yüksek yoğunluklu tuz çözeltileri kullanılarak, düşük yoğunluklu mikro plastikler yüzeye çıkarılmaktadır. Bu amaçla kullanılan başlıca çözeltiler şunlardır (Quinn vd., 2017, Coppock vd., 2017):

- Sodyum Klorür (NaCl) Çözeltisi: En yaygın kullanılan çözelti olup, yoğunluğu 1.2 g/cm³'tür. Düşük maliyetli ve çevre dostu olması avantajlarıdır, ancak sadece düşük yoğunluklu polimerleri (PE, PP, PS) ayırabilmektedir.
- Sodyum İyodür (NaI) Çözeltisi: Yoğunluğu 1.6-1.8 g/cm³ olan bu çözelti, daha yüksek yoğunluklu polimerlerin (PET, PVC) de ayrılmasını sağlamaktadır. Ancak maliyeti yüksektir ve ışığa duyarlıdır.
- Çinko Klorür (ZnCl₂) Çözeltisi: Yoğunluğu 1.5-1.7 g/cm³ olan bu çözelti, geniş bir polimer yelpazesini ayırabilmektedir. Ancak toksik olması ve korozif özelliği dezavantajlarıdır.

Yoğunluk ayrımı işlemi genellikle şu adımları içermektedir :

1. Toprak örneği (10-50 g) uygun hacimde tuz çözeltisi ile karıştırılır.
2. Karışım mekanik olarak karıştırılır veya çalkalanır (30 dakika - 24 saat).
3. Karışım dinlenmeye bırakılır (minimum 24 saat).
4. Yüzeydeki süpernatant (plastikleri içeren üst faz) dikkatle toplanır.
5. Geri kazanım verimini artırmak için bu işlem 2-3 kez tekrarlanır.
6. Toplanan süpernatant filtrasyon ile konsantre edilir.

3.1.4. Ön İşlem ve Hazırlık

Kurutma:

- Sıcaklık: 40°C (polimer bozulmasını önlemek için <60°C)
- Süre: 48-72 saat veya sabit ağırlığa ulaşana kadar

- Alternatif: Liyofilizasyon (-50°C, 24 saat) daha hassas polimerlerin korunması için tercih edilebilir

Eleme:

- İlk eleme: 5 mm elek ile taş, kök ve büyük organik kalıntıların uzaklaştırılması
- İkinci eleme: 2 mm elek ile ince toprak fraksiyonunun ayrılması
- Elek malzemesi: Paslanmaz çelik (plastik eleklerden kaçınılmalı)

Homojenizasyon:

- Porselen havan veya paslanmaz çelik karıştırıcı ile toprak agregalarının parçalanması
- Aşırı öğütmeden kaçınılmalı (mikro plastiklerin parçalanma riski)

3.1.5. Organik Madde Giderimi

Topraktaki yüksek organik madde içeriği, hem yoğunluk ayırma verimliliğini düşürür hem de spektroskopik analizde girişim yaratır.

Hidrojen Peroksit (H_2O_2) Oksidasyonu:

- Konsantrasyon: %15-30 H_2O_2
- Sıcaklık: 40-60°C
- Süre: 24-48 saat
- Prosedür: 10 g toprak + 50 mL H_2O_2 , manyetik karıştırıcı üzerinde inkübas
- Avantajlar: Etkili organik madde giderimi, çoğu polimere zarar vermez
- Dezavantajlar: PE ve PP gibi poliolefinlerde yüzey oksidasyonu, uzun işlem süresi

Fenton Reaksiyonu ($H_2O_2 + Fe^{2+}$):

- Reaktifler: 30 mL %30 H_2O_2 + 30 mL 0.05 M $FeSO_4$
- pH: 3-4 (H_2SO_4 ile ayarlanır)
- Sıcaklık: Oda sıcaklığı
- Süre: 30 dakika
- Avantajlar: Hızlı ve etkili, organik madde giderim verimi %95'in üzerinde
- Dezavantajlar: PET, PA ve PVC'de bozunma riski (Hurley vd., 2018)

Enzimatik Sindirim:

- Enzimler: Proteinaz K (protein sindirimi), selüloz (selüloz sindirimi), lipaz (lipid sindirimi)

- Protokol: 10 g toprak + 40 mL tampon + enzim kokteyli, 40°C'de 24 saat
- Avantajlar: Polimerlere zarar vermez, seçici organik madde giderimi
- Dezavantajlar: Yüksek maliyet, uzun işlem süresi, tam organik madde giderimi sağlanamayabilir

Karşılaştırmalı Değerlendirme: Bir çalışmada, farklı sindirim yöntemlerinin PE, PP, PET, PS ve PVC üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve %30 H₂O₂'nin 50°C'de 7 gün uygulamasının en güvenli ve etkili yöntem olduğu belirlenmiştir (Hurley ve Nizzetto, 2018; Cox, 2023).

4. SUDA MİKROPLASTİK ANALİZİ

4.1. Su Örneklemesi

Su örnekleme, su kaynağının tipine (yüzey suyu, yeraltı suyu, sulama suyu) göre farklılık göstermektedir. Örnekleme hacmi, beklenen mikro plastik konsantrasyonuna bağlı olarak belirlenmekte, genellikle 10-1000 L arasında değişmektedir (Koelmans et al., 2019).

Yüzey Suyu Örnekleme: Manta trawl veya plankton ağları kullanılarak yüzey suyundan örnekleme yapılabilir. Bu yöntem, büyük hacimlerde su örneklemesine olanak sağlamakta ancak sadece belirli bir boyutun üzerindeki partikülleri yakalayabilmektedir (333 µm veya 100 µm gözenek çapı) (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Hacimsel Örnekleme: Belirli bir hacimde su örneği alınarak laboratuvarda filtrasyon yapılmaktadır. Bu yöntem, daha küçük boyutlu mikro plastiklerin tespitine olanak sağlamaktadır (Lusher et al., 2017).

4.2. Filtrasyon ve Konsantrasyon

Su örneklerinin filtrasyonu, mikro plastiklerin konsantre edilmesi için kritik bir adımdır. Filtrasyon işleminde kullanılan filtre materyali, genellikle paslanmaz çelik veya cam elyaf olmalıdır. Filtre gözenek çapı, hedef partikül boyutuna göre seçilmekte, genellikle 10-100 µm arasında değişmektedir (Lusher et al., 2017).

Filtrasyon yöntemleri:

- Vakum Filtrasyonu: Laboratuvar ortamında küçük hacimli örnekler için uygundur

- Basınçlı Filtrasyon: Büyük hacimli örnekler için daha hızlı filtrasyon sağlar
- Santrifüj: Çok küçük partiküllerin konsantrasyonu için kullanılabilir

4.3. Su Örneklerinde Organik Madde Giderimi

Su örneklerinde bulunan organik madde (algler, bakteriler, organik detritus), mikroplastik analizini zorlaştırmaktadır. Toprak örneklerinde olduğu gibi, H₂O₂ muamelesi veya enzimatik sindirim yöntemleri uygulanabilmektedir (Lusher et al., 2017).

5. HAVADA MİKROPLASTİK ANALİZİ

5.1. Hava Örneklemesi

Atmosferik mikro plastiklerin örneklenmesi, pasif ve aktif örneklemeye yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır.

Pasif Örnekleme: Çökeltme hunileri veya petri kapları kullanılarak belirli bir süre boyunca (genellikle 1 ay) atmosferik çökeltme toplanmaktadır. Bu yöntem, basit ve düşük maliyetli olup, kuru ve yaş çökelmeyi birlikte toplamaktadır (Allen et al., 2019).

Aktif Örnekleme: Hava pompaları kullanılarak belirli bir hava hacmi filtrelerden geçirilmektedir. Bu yöntem, havada asılı duran mikro plastiklerin örneklenmesine olanak sağlamaktadır. Genellikle cam elyaf veya kuvars filtreler kullanılmaktadır (Dris et al., 2017).

5.2. Hava Örneklerinin İşlenmesi

Hava örneklerinin işlenmesi, kullanılan örneklemeye yöntemine bağlıdır. Pasif örneklemeye ile toplanan materyaller, distile su ile yıkanarak toplanmakta ve filtrasyon ile konsantre edilmektedir. Aktif örneklemeye ile toplanan filtreler ise doğrudan analiz edilebilmekte veya organik madde giderimi işlemine tabi tutulabilmektedir (Dris et al., 2017).

6. BİTKİSEL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİK ANALİZİ

6.1. Bitki Örneklemesi

Bitki örneklemesi, araştırma sorusuna bağlı olarak farklı bitki kısımlarından (kök, gövde, yaprak, meyve) yapılabilir. Örneklemeye sırasında kontaminasyon riskini minimize etmek için metal aletler kullanılmalı ve örnekler hemen alüminyum folyo ile kaplanmış kaplara konulmalıdır (Li et al., 2020).

6.2. Bitki Örneklerinin Ön İşleme

Bitki örneklerinin ön işleme aşaması, yüzey kontaminasyonunun giderilmesi ve bitki dokusunun sindirilmesi adımlarını içermektedir.

Yüzey Yıkama: Bitki örneklerinin yüzeyinde bulunan toprak ve diğer partiküller, distile su ile yıkanarak giderilmektedir. Bu adım, yüzey kontaminasyonunu minimize etmekte ancak bitki dokusuna alınmış mikro plastikleri etkilememektedir (Li et al., 2020).

Doku Sindirim: Bitki dokusunun sindirilmesi için farklı yöntemler kullanılabilmektedir:

- **Asit Sindirim:** Nitrik asit (HNO_3) veya hidroklorik asit (HCl) kullanılarak bitki dokusu parçalanmaktadır. Bu yöntem etkili olmakla birlikte, bazı polimer tiplerini etkileyebilmektedir (Bosker et al., 2019).
- **Alkali Sindirim:** Potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılarak bitki dokusu parçalanmaktadır. %10 KOH çözeltisi, 60°C 'de 24-48 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu yöntem, çoğu polimer tipini korumaktadır (Hurley et al., 2018).
- **Enzimatik Sindirim:** Selüloz, proteaz ve diğer enzimler kullanılarak bitki dokusu parçalanabilmektedir. Bu yöntem, mikro plastiklerin yapısını en iyi koruyan yöntem olmakla birlikte, maliyeti yüksek ve işlem süresi uzundur (Mintenig et al., 2017).

7. HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİK ANALİZİ

7.1. Hayvan Dokusu Örneklemesi

Hayvan dokularında mikro plastik analizi, genellikle sindirim sistemi (mide, bağırsak), karaciğer, kas dokusu ve kan örneklerinde yapılmaktadır. Örneklemesi sırasında kontaminasyon kontrolü kritik öneme sahiptir (Lusher et al., 2017).

7.2. Hayvan Dokularının Sindirilmesi

Hayvan dokularının sindirilmesi için en yaygın kullanılan yöntemler şunlardır:

Alkali Sindirim: %10 KOH çözeltisi, $40-60^\circ\text{C}$ 'de 24-72 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu yöntem, protein ve yağ içeriği yüksek dokuların sindirilmesinde etkilidir (Dehaut et al., 2016).

Asit Sindirim: HNO_3 veya HCl kullanılarak doku sindirilmektedir. Ancak bu yöntem, bazı polimer tiplerini (PA, PC) etkileyebilmektedir (Dehaut et al., 2016).

Enzimatik Sindirim: Proteaz, lipaz ve amilaz gibi enzimler kullanılarak doku sindirilmektedir. Bu yöntem, mikro plastiklerin yapısını en iyi korumakta ancak maliyeti yüksektir (Catarino et al., 2017).

8. GÖRSEL TANIMLAMA VE SAYIM YÖNTEMLERİ

8.1. Stereomikroskopi

Stereomikroskopi, mikro plastiklerin görsel olarak tanımlanması ve sayılması için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, 1-5 mm boyut aralığındaki partiküllerin incelenmesinde etkilidir (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Stereomikroskopi, genellikle 2 ile 5 mm'ye kadar olan partiküllerin incelenmesinde etkilidir.

Stereomikroskopi ile mikroplastik tanımlaması için kullanılan kriterler:

- Homojen renk ve yapı
- Net ve düzgün kenarlar
- Doğal liflerde görülmeyen parlaklık
- Bükülme testinde kırılma veya çatlama olmaması
- Isı uygulamasında erime veya deformasyon (Norén, 2007)

Ancak stereomikroskopi ile yapılan görsel tanımlama, yanlış pozitif sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, görsel tanımlamanın spektroskopik yöntemlerle doğrulanması gerekmektedir (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

8.2. Boyama Teknikleri

Mikro plastiklerin görsel tanımlanmasını kolaylaştırmak için çeşitli boyama teknikleri geliştirilmiştir. Nile Red boyası, lipofilik özelliği nedeniyle plastik partiküllere bağlanmakta ve floresan mikroskopi altında görselleştirilmesini sağlamaktadır (Maes et al., 2017).

Nile Red boyama protokolü:

1. Filtre üzerine Nile Red çözeltisi (1 mg/L asetonla) damlatılır
2. 30 dakika karanlıkta bekletilir
3. Floresan mikroskop altında incelenir (excitation: 450-490 nm, emission: >515 nm)

Bu yöntem, mikro plastiklerin hızlı taranmasına olanak sağlamakta ancak polimer tipinin belirlenmesine izin vermemektedir (Shim et al., 2016).

9. SPEKTROSKOPİK TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

9.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

FTIR spektroskopisi, mikro plastiklerin polimer tipinin belirlenmesinde altın standart olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, moleküllerin kızılötesi ışığı absorbe etmesi prensibine dayanmakta ve her polimer tipinin karakteristik bir spektrum oluşturmaya olanak sağlamaktadır (Käppler et al., 2016).

FTIR Modları:

Attenuated Total Reflectance (ATR-FTIR): Tek partiküllerin analizinde kullanılmaktadır. Partikül, ATR kristali üzerine yerleştirilmekte ve basınç uygulanarak spektrum alınmaktadır. Bu yöntem, 500 μm 'den büyük partiküller için uygundur (Löder & Gerds, 2015).

Mikro-FTIR (μ -FTIR): FTIR spektroskopisinin mikroskop ile entegrasyonu, küçük boyutlu partiküllerin (20-500 μm) analizine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, otomatik haritalama (mapping) özelliği sayesinde filtrelerin tamamının taranması mümkündür (Käppler et al., 2016).

FTIR Analiz Prosedürü:

1. Filtre üzerindeki şüpheli partikül seçilir
2. Partikülün spektrumu alınır (genellikle 4000-400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında)
3. Elde edilen spektrum, referans spektrum kütüphaneleri ile karşılaştırılır
4. Eşleşme kalitesi (match quality) değerlendirilir (genellikle >70% eşleşme kabul edilir)

FTIR spektroskopisinin avantajları:

- Polimer tipinin kesin ve tahribatsız bir şekilde belirlenmesi,
- Referans kütüphaneleri ile otomatik karşılaştırma imkânı sunması,
- FTIR spektroskopisinin yüksek güvenilirliğe sahip temel avantajlarıdır (Käppler et al., 2016).

FTIR spektroskopisinin dezavantajları:

- Küçük boyutlu partiküller (<20 μm) için sınırlı kullanım
- Yüksek ekipman maliyeti
- Zaman alıcı analiz süreci
- Organik madde varlığında spektrum kalitesinin düşmesi (Löder & Gerds, 2015)

9.2. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, moleküllerin ışık saçılımı prensibine dayanmakta ve FTIR'a alternatif veya tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Raman spektroskopisi, özellikle küçük boyutlu partiküllerin (<20 µm) analizinde FTIR'a göre daha avantajlıdır (Araujo et al., 2018).

Raman Spektroskopisinin Avantajları:

- Daha küçük boyutlu partiküllerin analizi (1 µm'ye kadar)
- Su varlığında analiz yapılabilmesi
- Yüksek uzaysal çözünürlük
- Pigment ve katkı maddelerinin tespiti (Araujo et al., 2018)

Raman Spektroskopisinin Dezavantajları:

- Floresan arka plan nedeniyle spektrum kalitesinin düşmesi
- Karbon içeriği yüksek partiküllerde yanma riski
- FTIR'a göre daha uzun analiz süresi
- Daha yüksek ekipman maliyeti (Käppler et al., 2016)

9.3. Spektroskopik Analiz için Kalite Kontrol

Spektroskopik analizlerde kalite kontrolü sağlamak için şu önlemler alınmalıdır:

- Her analiz serisinde bilinen polimer standartları analiz edilmelidir
- Spektrum kütüphaneleri düzenli olarak güncellenmelidir
- Eşleşme kalitesi eşik değeri (threshold) belirlenmeli ve tutarlı bir şekilde uygulanmalıdır
- Şüpheli spektrumlar, uzman kişiler tarafından manuel olarak değerlendirilmelidir
- Prosedürel blank örnekler analiz edilmeli ve kontaminasyon düzeyi raporlanmalıdır (Hermesen et al., 2018)

10. PYROLYSIS-GAS CHROMATOGRAPHY-MASS SPECTROMETRY (PY-GC-MS)

Py-GC-MS, mikro plastiklerin kütle bazlı kantitasyonu için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, örnek yüksek sıcaklıkta (>600°C) pirolize edilmekte ve oluşan piroliz ürünleri gaz kromatografisi ve kütle spektrometresi ile analiz edilmektedir (Dümichen et al., 2017).

Py-GC-MS'nin Avantajları:

- Kütle bazlı kantitasyon (µg/g veya µg/L)

- Karmaşık matrislerde analiz yapılabilmesi
- Çoklu polimer tipinin eş zamanlı analizi
- Yüksek hassasiyet (ng seviyesinde tespit limiti)
- Hızlı analiz süresi (Dümichen et al., 2017)

Py-GC-MS'nin Dezavantajları:

- Tahribatlı analiz
- Partikül sayısı ve boyut bilgisi sağlamaması
- Yüksek ekipman maliyeti
- Uzman personel gerektirmesi
- Matris etkilerinin optimizasyon gerektirmesi (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017)

Py-GC-MS, özellikle düzenleyici amaçlar ve risk değerlendirmesi için kütle bazlı veri gerektiren çalışmalarda tercih edilmektedir. Ancak spektroskopik yöntemlerle kombinasyon halinde kullanılması, hem partikül sayısı hem de kütle bilgisi sağlayarak daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır (Dümichen et al., 2017).

11. KALİTE KONTROL VE KALİTE GÜVENCE

11.1. Kontaminasyon Kontrolü

Mikro plastiklerin her yerde bulunması (ubiquity), analiz sürecinde kontaminasyon riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, tüm analiz aşamalarında sıkı kontaminasyon kontrol önlemleri alınmalıdır (Hermsen et al., 2018).

Laboratuvar Ortamı:

- Mümkünse, mikropplastik analizleri için ayrılmış bir laboratuvar kullanılmalıdır
- Laboratuvar ortamı düzenli olarak temizlenmeli ve HEPA filtreli hava temizleme sistemleri kullanılmalıdır
- Laboratuvarda sentetik giysiler giyilmemeli, %100 pamuklu laboratuvar önlükleri kullanılmalıdır
- Tüm çalışma yüzeyleri alüminyum folyo ile kaplanmalıdır (Hermsen et al., 2018)

Ekipman ve Malzemeler:

- Cam ve metal ekipmanlar tercih edilmelidir

- Plastik ekipman kullanımı kaçınılmazdır, kullanımdan önce distile su ile yıkanmalı ve alüminyum folyo ile kaplanmalıdır
- Tüm çözeltiler cam şişelerde saklanmalıdır
- Filtreler kullanımdan önce incelenmeli ve kontaminasyon varlığı kontrol edilmelidir (Lusher et al., 2017)

11.2. Prosedürel Blank Örnekler

Prosedürel blank (boş) örnekler, analiz sürecinde oluşan kontaminasyonun belirlenmesi için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, her analiz serisinde en az 3 blank örnek hazırlanmalı ve gerçek örneklerle aynı işlemlere tabi tutularak kontaminasyon düzeyi izlenmelidir (Hermesen et al., 2018).

Prosedürel blank örneklerde tespit edilen mikroplastik sayısı, gerçek örneklerdeki kontaminasyon düzeyini göstermektedir. Blank örneklerde tespit edilen ortalama partikül sayısı, gerçek örneklerin sonuçlarından çıkarılmalı veya düzeltme faktörü olarak kullanılmalıdır (Koelmans et al., 2019).

Blank Kontrol Kriterleri:

- Blank örneklerde tespit edilen partikül sayısı, gerçek örneklerin %5'inden az olmalıdır
- Blank örneklerde tespit edilen partikül tipleri ve boyutları raporlanmalıdır
- Yüksek blank değerleri durumunda, kontaminasyon kaynağı araştırılmalı ve önlemler alınmalıdır (Hermesen et al., 2018)

11.3. Spike Recovery Çalışmaları

Spike recovery çalışmaları, analitik metodun geri kazanım verimliliğini belirlemek için yapılmaktadır. Bilinen sayı ve boyutta mikro plastik standartları, matris örneklerine eklenmekte (spike) ve analiz prosedürü uygulanarak geri kazanım yüzdesi hesaplanmaktadır (Löder & Gerds, 2015).

Spike Recovery Prosedürü:

1. Bilinen sayı ve boyutta mikroplastik standartları hazırlanır
2. Standartlar, matris örneklerine eklenir
3. Örnekler, standart analiz prosedürüne tabi tutulur
4. Geri kazanılan partikül sayısı belirlenir
5. Geri kazanım yüzdesi hesaplanır: $(\text{Geri kazanılan sayı} / \text{Eklenen sayı}) \times 100$

Kabul edilebilir geri kazanım aralığı genellikle %70-120 olarak belirlenmektedir. Düşük geri kazanım değerleri, metodun optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Löder & Gerdts, 2015).

11.4. Sertifikalı Referans Materyaller

Mikro plastik analizlerinde standartlaşmayı sağlamak ve laboratuvarlar arası karşılaştırılabilirliği artırmak için sertifikalı referans materyallerin (CRM) geliştirilmesi gerekmektedir. Ancak şu anda mikro plastik analizleri için yaygın olarak kabul görmüş CRM bulunmamaktadır (Koelmans et al., 2019).

Bazı araştırma grupları ve kuruluşlar, mikro plastik CRM'leri geliştirme çalışmaları yürütmektedir. Bu materyaller, bilinen konsantrasyon, boyut dağılımı ve polimer kompozisyonuna sahip mikro plastikler içermekte ve laboratuvarların metod validasyonu için kullanılabilir (Cowger et al., 2020).

11.5. Laboratuvarlar Arası Karşılaştırma Çalışmaları

Laboratuvarlar arası karşılaştırma (interlaboratory comparison) çalışmaları, farklı laboratuvarların aynı örnekleri analiz ederek sonuçlarını karşılaştırdığı çalışmalardır. Bu çalışmalar, metodolojik farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmekte ve standartlaşma ihtiyacını ortaya koymaktadır (Cowger et al., 2020).

Yapılan laboratuvarlar arası karşılaştırma çalışmaları, mikropplastik sayımında ve polimer tanımlamasında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Bu farklılıklar, örnekleme, ön işleme, görsel tanımlama ve spektroskopik analiz aşamalarındaki metodolojik farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Hermsen et al., 2018).

12. VERİ ANALİZİ VE RAPORLAMA

12.1. Veri İfade Birimleri

Mikropplastik verilerinin ifade edilmesinde kullanılan birimler, matris tipine ve analiz amacına bağlı olarak değişmektedir:

Toprak: Partikül sayısı/kg kuru toprak veya partikül sayısı/g kuru toprak

Su: Partikül sayısı/L veya partikül sayısı/m³

Hava: Partikül sayısı/m² gün (pasif örnekleme) veya partikül sayısı/m³ (aktif örnekleme)

Bitki ve Hayvan Dokuları: Partikül sayısı/g yaş ağırlık veya partikül sayısı/g kuru ağırlık

Py-GC-MS gibi kütle bazlı yöntemlerde ise sonuçlar $\mu\text{g/g}$ veya $\mu\text{g/L}$ olarak ifade edilmektedir (Koelmans et al., 2019).

12.2. Boyut Sınıflandırması

Mikro plastikler, boyutlarına göre farklı sınıflara ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan boyut sınıflandırması şu şekildedir:

- Büyük mikro plastikler: 1-5 mm
- Küçük mikro plastikler: 100 μm - 1 mm
- Nanoplastikler: $<1 \mu\text{m}$ (bazı kaynaklarda $<1 \mu\text{m}$) (Gigault et al., 2018)

Boyut dağılımının raporlanması, mikro plastiklerin kaynağı ve potansiyel etkileri hakkında bilgi sağlamaktadır. Genellikle boyut sınıflarına göre partikül sayısı veya yüzdesi raporlanmaktadır.

12.3. Şekil Sınıflandırması

Mikro plastikler, şekillerine göre şu kategorilere ayrılmaktadır:

- Fiber/Lif: Uzun ve ince yapıda, uzunluk/genişlik oranı >3
- Fragment/Parça: Düzensiz şekilli, sert yapıda
- Film: İnce, esnek yapıda
- Köpük: Gözenekli yapıda
- Pellet/Granül: Küresel veya silindirik yapıda (Hidalgo-Ruz et al., 2012)

Şekil dağılımının raporlanması, mikro plastiklerin kaynağı hakkında bilgi sağlamaktadır. Örneğin, yüksek fiber oranı tekstil kaynaklı kirliliği, yüksek pellet oranı ise endüstriyel hammadde kaçacağını işaret edebilmektedir.

12.4. Renk Dağılımı

Mikro plastiklerin renk dağılımı, kaynağın belirlenmesinde ve görsel tanımlamada yardımcı olmaktadır. Genellikle şeffaf, beyaz, mavi, kırmızı, yeşil, siyah ve diğer renkler olarak kategorize edilmektedir (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

12.5. Polimer Kompozisyonu

Spektroskopik analizlerle belirlenen polimer tipleri, yüzde dağılım veya partikül sayısı olarak raporlanmaktadır. Yaygın olarak tespit edilen polimer tipleri şunlardır:

- Polietilen (PE)
- Polipropilen (PP)
- Polistiren (PS)
- Polietilen tereftalat (PET)
- Polivinil klorür (PVC)
- Poliamid (PA)
- Polikarbonat (PC) (Käppler et al., 2016)

12.6. İstatistiksel Analiz

Mikroplastik verilerinin istatistiksel analizi, veri dağılımının özelliklerine göre parametrik veya non-parametrik testler kullanılarak yapılmaktadır.

Tanımlayıcı İstatistikler:

- Ortalama, medyan, standart sapma
- Minimum ve maksimum değerler
- Yüzde dağılımlar (Koelmans et al., 2019)

Karşılaştırma Testleri:

- İki grup karşılaştırması: t-testi (parametrik) veya Mann-Whitney U testi (non-parametrik)
- Çoklu grup karşılaştırması: ANOVA (parametrik) veya Kruskal-Wallis testi (non-parametrik)
- Korelasyon analizi: Pearson (parametrik) veya Spearman (non-parametrik) korelasyon (Koelmans et al., 2019)

Çok Değişkenli Analizler:

- Principal Component Analysis (PCA): Veri setindeki varyasyonun ana bileşenlerini belirleme
- Cluster Analysis: Örneklerin benzerliklerine göre gruplandırılması
- Discriminant Analysis: Gruplar arasındaki farklılıkları belirleyen değişkenlerin tespiti (Koelmans et al., 2019)

12.7. Raporlama Standartları

Mikroplastik çalışmalarının raporlanmasında şeffaflık ve tekrarlanabilirlik sağlamak için aşağıdaki bilgiler detaylı olarak verilmelidir:

Örnekleme Bilgileri:

- Örnekleme tarihi, lokasyonu ve koordinatları
- Örnekleme yöntemi ve ekipmanları
- Örnek sayısı ve hacmi/ağırlığı
- Çevresel parametreler (sıcaklık, pH, nem vb.) (GESAMP, 2019)

Analitik Metod Bilgileri:

- Ön işleme adımları (yoğunluk ayrımı, organik madde giderimi vb.)
- Kullanılan kimyasallar ve konsantrasyonları
- Filtrasyon detayları (filtre tipi, gözenek çapı)
- Tanımlama yöntemi (görsel, spektroskopik)
- Spektroskopik analiz parametreleri (GESAMP, 2019)

Kalite Kontrol Bilgileri:

- Kontaminasyon kontrol önlemleri
- Prosedürel blank sonuçları
- Spike recovery sonuçları
- Tespit limiti ve kantitasyon limiti (Hermesen et al., 2018)

Sonuç Bilgileri:

- Ham veri (blank düzeltilmesi öncesi)
- Düzeltilmiş veri (blank düzeltilmesi sonrası)
- Boyut, şekil, renk ve polimer dağılımları
- İstatistiksel analiz sonuçları (Koelmans et al., 2019)

13. RİSK DEĞERLENDİRMESİ VE YORUMLAMA

13.1. Maruziyet Değerlendirmesi

Mikro plastiklere maruziyet, farklı yollarla gerçekleşebilmektedir:

- İnhalasyon: Atmosferik mikro plastiklerin solunması
- İngestiyon: Gıda ve su tüketimi yoluyla alım
- Dermal Temas: Cilt yoluyla temas (Prata et al., 2020)

Maruziyet değerlendirme için, farklı kaynaklardan alınan günlük mikro plastik miktarının hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama, mikro plastik konsantrasyonu ve tüketim miktarı verilerine dayanmaktadır (Senathirajah et al., 2021).

Günlük Alım Hesaplaması:

$$\text{Günlük alım (partikül/gün)} = \text{Konsantrasyon (partikül/g veya partikül/L)} \\ \times \text{Günlük tüketim (g/gün veya L/gün)}$$

13.2. Tehlike Karakterizasyonu

Mikro plastiklerin potansiyel sağlık etkileri, boyut, şekil, polimer tipi ve katkı maddelerine bağlı olarak değişmektedir. Küçük boyutlu mikro plastikler, hücresel düzeyde alınabilmekte ve potansiyel toksik etkiler gösterebilmektedir (Prata et al., 2020).

Potansiyel Sağlık Etkileri:

- Fiziksel hasar (özellikle keskin kenarlı fragmentler)
- İnflamasyon ve oksidatif stres
- Endokrin bozucu etki (katkı maddeleri nedeniyle)
- Mikrobiyal taşıyıcılık (patojenlerin taşınması)
- Kimyasal kirleticilerin taşınması (Prata et al., 2020)

13.3. Risk Karakterizasyonu

Risk karakterizasyonu, maruziyet ve tehlike verilerinin entegrasyonu ile yapılmaktadır. Ancak mikro plastikler için henüz kabul görmüş güvenli maruziyet limitleri (tolerable daily intake - TDI) belirlenmemiştir (Senathirajah et al., 2021).

Risk karakterizasyonu için kullanılabilecek yaklaşımlar:

- Karşılaştırmalı Değerlendirme: Farklı kaynaklar veya bölgeler arasında mikro plastik konsantrasyonlarının karşılaştırılması
- Trend Analizi: Zamansal değişimlerin değerlendirilmesi
- Kaynak Atribüsyonu: Mikroplastik kirliliğinin kaynaklarının belirlenmesi (Koelmans et al., 2019)

14. STANDARTLAŞMA VE HARMONİZASYON

14.1. Mevcut Standartlaşma Çalışmaları

Mikroplastik analizlerinde standartlaşma, laboratuvarlar arası karşılaştırılabilirliği artırmak ve veri kalitesini güvence altına almak için kritik öneme sahiptir. Çeşitli uluslararası kuruluşlar, mikroplastik analiz metodlarının standartlaştırılması için çalışmalar yürütmektedir (Cowger et al., 2020).

ISO (International Organization for Standardization): ISO, mikroplastik analizleri için çeşitli standartlar geliştirmektedir. ISO/TR 21960:2020, suda mikroplastik örnekleme ve analizi için rehberlik sağlamaktadır (ISO, 2020).

GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): GESAMP, deniz ortamında mikroplastik izleme için rehberler yayınlamıştır. Bu rehberler, örnekleme, analiz ve raporlama için öneriler içermektedir (GESAMP, 2019).

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development): OECD, mikro plastiklerin çevresel ve sağlık etkilerinin değerlendirilmesi için test rehberleri geliştirmektedir (OECD, 2021).

14.2. Harmonizasyon İhtiyacı

Mevcut mikroplastik çalışmalarında kullanılan metodolojilerin büyük çeşitlilik göstermesi, sonuçların karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Harmonizasyon ihtiyacı olan başlıca alanlar şunlardır:

- Terminoloji: Mikroplastik tanımı, boyut sınırları ve sınıflandırma kriterlerinin standartlaştırılması
- Örnekleme Protokolleri: Örnekleme stratejileri, ekipmanları ve örnek hacimlerinin standartlaştırılması
- Ön İşleme Metodları: Yoğunluk ayrımı ve organik madde giderimi protokollerinin harmonizasyonu
- Tanımlama Kriterleri: Görsel ve spektroskopik tanımlama için minimum kabul kriterleri
- Kalite Kontrol: Blank kontrol, spike recovery ve raporlama standartlarının belirlenmesi (Cowger et al., 2020)

14.3. Gelecek Perspektifler

Mikroplastik analiz metodolojilerinin geliştirilmesi için öncelikli alanlar:

- Otomatizasyon: Görsel tanımlama ve spektroskopik analizde yapay zeka ve makine öğrenmesi uygulamalarının geliştirilmesi
- Küçük Boyutlu Partiküller: Nanoplastiklerin (<1 µm) tespiti için yeni metodolojilerin geliştirilmesi
- Hızlı Tarama Yöntemleri: Yüksek verimli tarama sistemlerinin geliştirilmesi

- Sertifikalı Referans Materyaller: Farklı matrisler için CRM'lerin geliştirilmesi
- Kütle Bazlı Yöntemler: Py-GC-MS ve diğer kütle bazlı yöntemlerin standardizasyonu (Cowger et al., 2020)

15. ÖZEL UYGULAMALAR VE VAKA ÇALIŞMALARI

15.1. Tarımsal Topraklarda Mikroplastik İzleme

Tarımsal topraklarda mikro plastik kirliliğinin izlenmesi, gıda güvenliği ve toprak sağlığı açısından önem taşımaktadır. Plastik malç kullanımının yaygın olduğu bölgelerde yapılan çalışmalar, toprakta yüksek mikro plastik konsantrasyonları tespit etmiştir (Huang et al., 2020).

Vaka Çalışması - Çin: Çin'de plastik malç kullanımının yaygın olduğu tarım alanlarında yapılan bir çalışmada, toprakta 7000-42000 partikül/kg aralığında mikro plastik tespit edilmiştir. Dominant polimer tipi LDPE olarak belirlenmiş ve bu durum plastik malç kullanımı ile ilişkilendirilmiştir (Huang et al., 2020).

15.2. Sulama Suyunda Mikroplastik Analizi

Sulama suyunda mikro plastik varlığı, tarımsal ürünlere mikro plastik transferi açısından önemli bir kaynaktır. Atık su ile sulanan tarım alanlarında, mikro plastik konsantrasyonlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Corradini et al., 2019).

Vaka Çalışması - İspanya: İspanya'da atık su ile sulanan tarım alanlarında yapılan bir çalışmada, sulama suyunda 0.5-4.5 partikül/L aralığında mikro plastik tespit edilmiştir. Dominant polimer tipleri PE, PP ve PET olarak belirlenmiştir (Corradini et al., 2019).

15.3. Bitkisel Ürünlerde Mikroplastik Tespiti

Bitkisel ürünlerde mikro plastik tespiti, gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar, çeşitli meyve ve sebzelerde mikro plastik varlığını göstermiştir (Li et al., 2020).

Vaka Çalışması - İtalya: İtalya'da yerel pazarlardan toplanan meyve ve sebzelerde yapılan bir çalışmada, örneklerin %80'inde mikro plastik tespit edilmiştir. Ortalama yoğunlaşma 1.5-2.5 partikül/g aralığında bulunmuştur. Dominant polimer tipleri PE ve PP olarak belirlenmiştir (Conti et al., 2020).

15.4. Hayvansal Ürünlerde Mikroplastik Analizi

Hayvansal ürünlerde mikro plastik varlığı, gıda zinciri yoluyla insan maruziyetinin önemli bir kaynağıdır. Özellikle deniz ürünlerinde yüksek mikro plastik konsantrasyonları tespit edilmiştir (Barboza et al., 2018).

Vaka Çalışması - Belçika: Belçika'da tüketilen midyelerde yapılan bir çalışmada, ortalama 90 partikül/100 g mikro plastik tespit edilmiştir. Bu durum, midye tüketen bir kişinin yılda yaklaşık 11000 mikro plastik partikülüne maruz kaldığını göstermektedir (Van Cauwenberghe & Janssen, 2014).

15.5. Atmosferik Çökeltme Çalışmaları

Atmosferik mikro plastiklerin tarım alanlarına çökmesi, önemli bir kirlilik kaynağı oluşturmaktadır. Özellikle kentsel ve endüstriyel bölgelere yakın tarım alanlarında yüksek çökeltme oranları gözlemlenmektedir (Allen et al., 2019).

Vaka Çalışması - Fransa: Fransa'da Paris yakınlarında yapılan bir çalışmada, atmosferik çökeltme yoluyla 3-10 partikül/m²/gün aralığında mikro plastik çökmesi tespit edilmiştir. Dominant şekil fiber olarak belirlenmiş ve bu durum tekstil kaynaklı kirlilik ile ilişkilendirilmiştir (Dris et al., 2016).

16. GELECEK ARAŞTIRMA İHTİYAÇLARI

16.1. Metodolojik Gelişmeler

Mikro plastik analiz metodolojilerinin geliştirilmesi için öncelikli araştırma ihtiyaçları:

Nanoplastik Analizi: 1 µm'den küçük nanoplastiklerin tespiti ve karakterizasyonu için yeni metodolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Mevcut spektroskopik yöntemler, bu boyut aralığında sınırlı kalmaktadır. Elektron mikroskobu, dinamik ışık saçılımı ve nanopartikül izleme analizi gibi yöntemlerin mikro plastik analizine adaptasyonu üzerine çalışmalar devam etmektedir (Gigault et al., 2018).

Yüksek Verimli Tarama Sistemleri: Büyük örnek sayılarının hızlı bir şekilde analiz edilebilmesi için otomatize sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarının, görsel tanımlama ve spektroskopik analiz süreçlerine entegrasyonu, analiz süresini önemli ölçüde kısaltabilmektedir (Cowger et al., 2020).

In Situ Analiz Yöntemleri: Laboratuvar dışında, sahada doğrudan mikro plastik tespiti yapabilen portatif cihazların geliştirilmesi, izleme programlarının

etkinliğini artırabilmektedir. Portatif Raman spektrometreleri ve hiperspektral görüntüleme sistemleri bu alanda umut vaat etmektedir (Primpke et al., 2020).

16.2. Biyolojik Alım ve Translokasyon

Mikro plastiklerin bitkiler ve hayvanlar tarafından alımı ve dokulara translokasyonu mekanizmalarının anlaşılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Özellikle şu konular öncelikli araştırma alanlarıdır:

- Farklı boyut ve şekillerdeki mikro plastiklerin bitki kökleri tarafından alım mekanizmaları
- Mikro plastiklerin bitki vasküler sisteminde taşınması ve birikimi
- Hayvanların sindirim sisteminde mikro plastiklerin davranışı ve doku translokasyonu
- Mikro plastiklerin kan-beyin bariyerini ve plasenta bariyerini geçme potansiyeli (Prata et al., 2020)

16.3. Toksikite ve Sağlık Etkileri

Mikro plastiklerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerinin anlaşılması için kapsamlı toksikolojik çalışmalara ihtiyaç vardır:

- Farklı polimer tiplerinin ve boyutlarının sitotoksikite ve genotoksikite etkileri
- Mikro plastiklerin endokrin bozucu etkileri
- Katkı maddelerinin (plastikleştiriciler, alev geciktiriciler vb.) salınımı ve toksik etkileri
- Mikro plastiklerin taşıdığı kimyasal kirlleticilerin ve mikroorganizmaların sağlık etkileri
- Kronik maruziyet etkilerinin değerlendirilmesi (Prata et al., 2020)

16.4. Çevresel Davranış ve Kader

Mikro plastiklerin çevresel sistemlerdeki davranışı ve kaderi hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır:

- Mikro plastiklerin toprak-bitki-atmosfer sistemindeki döngüsü
- Mikro plastiklerin biyolojik ve abiyotik parçalanma süreçleri
- Mikro plastiklerin toprak fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkileri
- Mikro plastiklerin toprak mikrobiyal topluluklarına etkileri
- İklim değişikliği ve mikroplastik kirliliği arasındaki etkileşimler (Rillig et al., 2019)

16.5. Risk Değerlendirmesi ve Düzenleyici Çerçeve

Mikro plastikler için kapsamlı risk değerlendirmesi ve düzenleyici çerçevelerin oluşturulması gerekmektedir:

- Güvenli maruziyet limitlerinin (TDI) belirlenmesi
- Farklı kaynaklar için emisyon standartlarının geliştirilmesi
- Gıda güvenliği açısından maksimum kalıntı limitlerinin belirlenmesi
- Çevresel kalite standartlarının geliştirilmesi
- Ekonomik analiz ve maliyet-fayda değerlendirmeleri (Senathirajah et al., 2021)

17. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikroplastik kirliliği, tarımsal sistemler ve gıda güvenliği açısından giderek artan bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Çevresel komponentlerde (toprak, su, hava) ve gıda ürünlerinde (bitkisel ve hayvansal) mikro plastiklerin güvenilir bir şekilde tespit edilmesi ve karakterize edilmesi, risk değerlendirmesi ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için temel oluşturmaktadır.

17.1. Temel Bulgular

Bu bölümde sunulan bilgiler ışığında, mikroplastik analizlerinde şu temel noktalar öne çıkmaktadır:

Metodolojik Çeşitlilik: Mikro plastik analizleri için çok sayıda metod bulunmakta, ancak bu metodlar arasında önemli farklılıklar vardır. Örnekleme stratejileri, ön işleme protokolleri, tanımlama yöntemleri ve raporlama standartları açısından harmonizasyon ihtiyacı bulunmaktadır (Cowger et al., 2020).

Kalite Kontrol Önemi: Mikro plastiklerin her yerde bulunması (ubiquity), analiz sürecinde kontaminasyon riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Sıkı kontaminasyon kontrol önlemleri, prosedürel blank örnekler ve spike recovery çalışmaları, veri güvenilirliği için zorunludur (Hermsen et al., 2018).

Spektroskopik Doğrulama: Görsel tanımlama, yüksek oranda yanlış pozitif sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, mikro plastiklerin polimer tipinin spektroskopik yöntemlerle (FTIR, Raman) doğrulanması gerekmektedir (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Matris Spesifik Yaklaşımlar: Farklı matrisler (toprak, su, hava, bitki, hayvan dokuları), farklı analitik yaklaşımlar gerektirmektedir. Her matris için

optimize edilmiş protokollerin geliştirilmesi ve validasyonu önemlidir (Lusher et al., 2017).

17.2. Öneriler

Mikroplastik analizlerinin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırmak için şu öneriler sunulmaktadır:

Araştırmacılar İçin:

- Standartlaştırılmış protokollerin kullanılması ve metodolojik detayların tam olarak raporlanması
- Kalite kontrol ve kalite güvence prosedürlerinin titizlikle uygulanması
- Prosedürel blank sonuçlarının ve spike recovery verilerinin raporlanması
- Spektroskopik doğrulamanın yapılması ve eşleşme kalitesi kriterlerinin belirtilmesi
- Ham verilerin (blank düzeltilmesi öncesi) paylaşılması (GESAMP, 2019)

Laboratuvarlar İçin:

- Mikroplastik analizleri için ayrılmış laboratuvar alanlarının oluşturulması
- Personel eğitimi ve yetkinlik testlerinin düzenli olarak yapılması
- Laboratuvarlar arası karşılaştırma çalışmalarına katılım
- Sertifikalı referans materyallerin kullanımı (mevcut olduğunda)
- Metod validasyonu ve dokümantasyonu (Hermesen et al., 2018)

Politika Yapıcılar İçin:

- Mikroplastik izleme programlarının oluşturulması ve desteklenmesi
- Standartlaşma çalışmalarının teşvik edilmesi ve finansmanı
- Düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesi (emisyon standartları, kalıntı limitleri)
- Kaynak azaltma stratejilerinin geliştirilmesi (plastik malç alternatifleri, atık su arıtma iyileştirmeleri)
- Farkındalık artırma ve eğitim programlarının desteklenmesi (Cowger et al., 2020)

Endüstri İçin:

- Çevre dostu alternatif materyallerin geliştirilmesi
- Biyobozunur plastiklerin araştırılması ve geliştirilmesi

- Plastik atık yönetimi sistemlerinin iyileştirilmesi
- Ürün yaşam döngüsü analizlerinde mikroplastik emisyonlarının değerlendirilmesi
- Gönüllü azaltma ve raporlama programlarının uygulanması (Rillig et al., 2019)

17.3. Sonuç

Mikro plastik kirliliği, kompleks ve çok boyutlu bir çevre ve sağlık sorunudur. Tarımsal sistemlerde mikro plastik kirliliğinin kapsamının anlaşılması, güvenilir analitik metodolojilere bağlıdır. Bu bölümde sunulan analiz yöntemleri, mevcut en iyi uygulamaları temsil etmekte, ancak sürekli gelişim ve iyileştirme ihtiyacı bulunmaktadır.

Standartlaştırılmış metodolojilerin geliştirilmesi, kalite kontrol prosedürlerinin uygulanması ve laboratuvarlar arası işbirliğinin artırılması, mikroplastik verilerinin güvenilirliğini ve karşılaştırmalı bilirliliğini artıracaktır. Bu sayede, mikro plastik kirliliğinin gerçek kapsamı anlaşılabilir, risk değerlendirmesi yapılabilir ve etkili yönetim stratejileri geliştirilebilecektir.

Gelecekte, nanoplastiklerin tespiti, otomatize analiz sistemlerinin geliştirilmesi, biyolojik alım mekanizmalarının anlaşılması ve sağlık etkilerinin değerlendirilmesi öncelikli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır. Bu alanlarda yapılacak çalışmalar, mikro plastik kirliliği ile mücadelede önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, mikro plastik analizleri, disiplinler arası işbirliği, metodolojik titizlik ve sürekli iyileştirme gerektiren dinamik bir alandır. Bu bölümde sunulan bilgiler, araştırmacılar, laboratuvarlar ve politika yapıcılar için rehberlik sağlamayı amaçlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5), 339-344.
- Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M., & Ribeiro-Claro, P. J. (2018). Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research*, 142, 426-440.
- Barboza, L. G. A., Dick Vethaak, A., Lavorante, B. R., Lundebye, A. K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348.
- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P., & Vijver, M. G. (2019). Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere*, 226, 774-781.
- Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., & Henry, T. B. (2017). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675-684.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597.
- Conti, G. O., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., Fiore, M., & Zuccarello, P. (2020). Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research*, 187, 109677.
- Coppock, R. L., Cole, M., Lindeque, P. K., Queirós, A. M., & Galloway, T. S. (2017). A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *Environmental Pollution*, 230, 829-837.
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411-420.

- Cowger, W., Steinmetz, Z., Gray, A., Munno, K., Lynch, J., Hapich, H., Primpke, S., De Frond, H., Rochman, C., & Herodotou, O. (2020). Microplastic spectral classification needs an open source community: Open specy to the rescue! *Analytical Methods*, 13(7), 753-758.
- Dehaut, A., Cassone, A. L., Frère, L., Hermabessiere, L., Himber, C., Rinnert, E., Rivièrè, G., Lambert, C., Soudant, P., Huvet, A., Duflos, G., & Paul-Pont, I. (2016). Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. *Environmental Pollution*, 215, 223-233.
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453-458.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1-2), 290-293.
- FAO. (2021). *Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dümichen, E., Eisentraut, P., Bannick, C. G., Barthel, A. K., Senz, R., & Braun, U. (2017). Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method. *Chemosphere*, 174, 572-584.
- Fischer, M., & Scholz-Böttcher, B. M. (2017). Simultaneous trace identification and quantification of common types of microplastics in environmental samples by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 51(9), 5052-5060.
- GESAMP. (2019). *Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter in the ocean* (Kershaw, P. J., Turra, A., & Galgani, F., eds.). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Rep. Stud. GESAMP No. 99, 130p.
- Gigault, J., ter Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P. Y., Gauffre, F., Phi, T. L., El Hadri, H., Grassl, B., & Reynaud, S. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution*, 235, 1030-1034.

- Hermesen, E., Mintenig, S. M., Besseling, E., & Koelmans, A. A. (2018). Quality criteria for the analysis of microplastic in biota samples: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 52(18), 10230-10240.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060-3075.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 586, 127-141.
- Hurley, R. R., Woodward, J. C., & Rothwell, J. J. (2018). Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding. *Nature Geoscience*, 11(4), 251-257.
- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K. J., & Voit, B. (2016). Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(29), 8377-8391.
- Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155, 410-422.
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J., Yin, N., Yang, J., Tu, C., & Zhang, Y. (2020). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 3(11), 929-937.
- Liu, Y. F. Zhang, G. S., (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20.
- Löder, M. G., & Gerdt, G. (2015). Methodology used for the detection and identification of microplastics—A critical appraisal. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter* (pp. 201-227). Springer.

- Lusher, A. L., Welden, N. A., Sobral, P., & Cole, M. (2017). Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Analytical Methods*, 9(9), 1346-1360.
- Maes, T., Jessop, R., Wellner, N., Haupt, K., & Mayes, A. G. (2017). A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports*, 7(1), 44501.
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G., Primpke, S., & Gerdt, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365-372.
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777-10779.
- Norén, F. (2007). *Small plastic particles in Coastal Swedish waters*. KIMO Sweden.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.
- Prata, J. C., Silva, A. L., da Costa, J. P., Mouneyrac, C., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Solutions and integrated strategies for the control and mitigation of plastic and microplastic pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13), 2411.
- Quinn, B., Murphy, F., & Ewins, C. (2017). Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment. *Analytical Methods*, 9(9), 1491-1498.
- Rillig, M. C., Ziersch, L., & Hempel, S. (2017). Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 7(1), 1362.
- Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, 223(3), 1066-1070.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124004.

- Shim, W. J., Song, Y. K., Hong, S. H., & Jang, M. (2016). Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2), 469-476.
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., Muñoz, K., Frör, O., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690-705.
- WHO. (2019). *Microplastics in drinking-water*. Geneva: World Health Organization.
- Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, 4(4), eaap8060.

BÖLÜM 14

PLASTİK VE MİKROPLASTİK EKONOMİSİ: TARIM, ÇEVRE VE TÜRKİYE PAZARI

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL¹

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18049235>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Ekonomisi Bölümü, Tokat, Türkiye.
hayriyesibel.gulsebal@gop.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-7298-1416

GİRİŞ

Bu çalışmada plastiğin tarımsal üretimde kullanım durumu, gelişimi ve çevresel etkisinden bahsedilmiştir. 100 önce plastik ürünler ve çevreye zararı yoktu. Ancak plastiğin cam, ahşap ve metal araç-gereçlere göre daha kolay ve ucuz temini en gelişmişinden en basit kullanımına kadar üretimin her alanında kullanılmaya başlanmış ve bugün çevresel birikimi ve çevre üzerinde ciddi baskı yaratmaya başlamıştır. Karbon salınımından sonra en önemli kirletici konumundadır. Tarımsal üretimde plastik kullanımında çok çeşitli alanlarda hatırı sayılır bir kullanıma ve çevresel etkiye sahiptir.

Bu çalışmanın amacı tarımda plastik atıkların kullanım durumu çevreye olan zararları anlatmak ve özellikle çevre koruma konulara geç kalan ülkelerden olan Türkiye için konuyu değerlendirmek ve açıklamaya çalışmaktır. Veri bulmanın özellikle zor olduğu bu konuda daha önce bu alanda yapılmış olan bilimsel araştırma ve çalışmalar ile bu alandaki literatür verilerinden yararlanılmıştır.

Tüm alanlarda olduğu gibi tarımsal üretimde de plastiklerin yaygınlaşması, tarımsal ürün kalitesi, korunması, verimi ve sürdürülebilirliğinin artmasında ve gıda sektörüne de birçok fayda sağlamıştır. Bu çalışma, tarımda kullanılan plastiklerin özelliklerinin, kullanımının ve Ömrünün Sonu (EoL) uygulamalarının topraktaki mikro ve nano plastiklerin (MNP) bozunmasını, üretimle ilişkisini, büyüyen pazarı ve riskleri tartışılmıştır.

Çağdaş, konvansiyonel ve biyolojik olarak parçalanabilir tarımsal plastiklerin kategorileri, işlevleri ve pazar dinamikleri kısaca sunulmuştur. Tarımsal plastiklerin çevre kirliliğindeki potansiyel rolü ve olası mikro ve nano plastik üretimi için risk ve koşullar analiz edilmektedir. Her tarımsal plastik kategorisinde riskleri ortadan kaldırmak için alternatif sürdürülebilir çözümler gereklidir. Seçilmiş literatürde bildirilen tarımda kullanılan plastikler tarafından üretilen MNP tarafından oluşan kirliliğinin tahminleri sunulmaktadır. Bu durumun analiz edilmesi uygun risk azaltma stratejileri ve politikalarının tasarlanıp uygulanmasına olanak sunabilecektir.

1. MİKRO PLASTİĞİN TANIMI VE ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Tarımsal plastikler, MNP “*Mikro-, Nano-plastikler*” kaynaklı toprak kirliliğinin temel yapı taşı olarak kabul edilmektedir (FAO, 2021). MNP Uzunluğu ≤ 5 mm olan üretilmiş veya döküntü plastik parçacıklar olan MP “*Mikroplastikler*” ile uzunluğu 1 nm ile 1 μ m aralığında olan parçacıklar NP “*Nanoplastikler*” olarak tanımlanmaktadır (Lai ve diğerleri, 2022).

5 mm’den daha küçük plastik parçacıklar, lifler veya parçalar mikro plastikler olarak adlandırılmaktadır (Courtney vd., 2009). Mikro plastikler arasında, boyutu daha küçük olan ve genellikle 1 nm ile 100 nm arasında değişim gösteren parçacıklar ise nanoplastikler olarak sınıflandırılır (Halle ve Ghiglione, 2021) bazı araştırmalara göre 1 μ m’ye kadar olan parçacıkları kapsar (Gigault vd., 2018). Daha büyük plastikler ise boyutlarına göre mezoplastikler (yaklaşık 5 mm) ve makro plastikler (>5 mm) olarak sınıflandırılmaktadır (Hartmann vd., 2019). Ayrıca, Deniz Koruma Bilimsel Yönleri (GESAMP) farklı bir sınıflandırma kullanır: mezoplastikler 5–25 mm, makroplastikler 25–1000 mm ve megaplastikler 1 metreden daha büyük parçalar olarak tanımlanmıştır (GESAMP, 2019).

Biyolojik olarak parçalanabilen plastiklerin çözünmesi, bakteri ve mantarlar tarafından salgılanan enzimler sayesinde gerçekleşmektedir. Biyobozunma süreci, plastiklerin biyoasimilasyon ve mineralizasyon ile tamamen çözünmesiyle tamamlanır. Toprakta bulunan biyolojik olarak parçalanabilen orta ve büyük boyutlu plastikler (mezo ve makroplastikler), genellikle abiyotik faktörlerle birlikte etkilenecek zamanla küçük mikro ve nano parçacıklara ayrılmaktadır. Bu mikro boyutlu biyolojik olarak parçalanabilen plastiklerin boyutu sürekli olarak küçülür ve birkaç ay içerisinde tamamen kaybolur. Bu nedenle, bu tür plastiklerin “mikroplastik” olarak sınıflandırılması, onların çevrede uzun süre kalıcılık gösterdiği anlamına gelen “çevrede uzun vadeli kalıcılık” tanımıyla tam olarak uyumlu değildir (ECHA, 2019).

2. TARIMSAL ÜRETİMDE MİKRO PLASTİKLER

Mevcut küresel plastik üretim, tüketim ve kullanım modelleri incelendiğinde, 2050 yılına kadar yaklaşık 12 milyon kiloton plastik atığın toprakla veya çöple karışması beklenmektedir (Geyer vd., 2017). MP’ler su

akıntıları ve rüzgarla taşınabildiğinden hem kara hem de deniz ortamlarının kirliliğinde rol oynar. Çevreye salınan mikro plastik miktarının yılda yaklaşık 3,2 milyon ton olduğu tahmin edilmekte olup, bunların %48'i deniz çöpü olarak okyanuslara ulaşmaktadır (FAO, 2021). Topraktaki MP kirliliğinin ise deniz ortamına göre 4–32 kat daha fazla olduğu belirtilmektedir (Gionfra, 2018).

Tarımsal sistemlere giren MNP miktarları Avrupa'da yıllık 63–430 kt, Kuzey Amerika'da 44–300 kt olarak tahmin edilmektedir (Ng vd., 2018). Okyanuslara giren miktar ise 93–236 kt civarında olduğu hesaplanmıştır. Karışık belediye atıklarından üretilen kompostlarda PE lifleri ve PS köpüğünün (420 µm–25 mm) %5'e kadar bulunabileceği öngörülmektedir (Brinton, 2005). Ayrıca, atmosfer yoluyla salınan MP'lerin yaklaşık %5'inin tarım arazilerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Brahney vd., 2021).

Tarımsal plastik kullanımının en görünür alanlarından biri örtü altı yetiştiricilik uygulamalarıdır (Tüzel ve ark, 2005). Polietilen esaslı sera ve tünel örtüleri, yüksek ışık geçirgenliği ve ısı tutma kapasitesi sayesinde kontrollü üretim sistemlerinin temelini oluşturmakta ve özellikle iklimsel dalgalanmaların yoğun olduğu bölgelerde üretim risklerini azaltmaktadır. FAO verileri, sera film kullanımının yıllık 3,5 milyon ton düzeyinde olduğunu ve özellikle Asya-Pasifik bölgesinde bu kullanımın hızla arttığını göstermektedir (Le Moine, 2018). Farklı kalınlık, UV katkısı, ışık difüzyonu gibi özelliklerle çeşitlendirilebilen bu örtüler hem erkenciliği artırmakta hem de üretim dönemini uzatarak verimliliği yükseltmektedir. Cam gibi geleneksel örtü materyallerine göre daha ekonomik ve hafif olmaları ise küçük ve orta ölçekli işletmeler için bu malzemeleri daha cazip kılmaktadır

Sera ve yüksek tünel filmlerinde kullanılan mikro plastiklerin risklerine bakıldığında; sera ve yüksek tünel filmleri ortalama 3-5 yıllık ortalama ömür tasarlanmış olup yüksek sıcaklık ve uv radyasyonuna fazlasıyla maruz kalmaktadır. Plastik kirliliği, karasal ekosistemler üzerinde önemli bir odak noktası olmuştur (Alimi vd., 2018; Qi vd., 2020). Mikro plastik kirliliğinin, ekosistemlerin işleyişi ve sürdürülebilirliği için ciddi bir tehdit oluşturduğuna dair kanıtların giderek arttığı saptanmıştır (Huang vd., 2020a; Li vd., 2020; Zhou vd., 2021b). Toprağa karışan mikro plastiklerin, toprağın temas açısını ve doymuş hidrolik iletkenliğini artırabileceği düşünülmektedir; buna karşılık hacim yoğunluğunun ve su tutma kapasitesinin azalabileceği (Yu vd., 2023) ve bakteri topluluklarının yapısının değişebileceği düşünülmektedir (Li vd., 2023;

Zhou vd., 2021a). Mikro plastikler besin zinciri aracılığıyla insan gıdalarına işlenebileceği değerlendirilmiştir (Li vd., 2020; Okeke vd., 2022). İnsan sağlığı üzerindeki etkileri henüz tam olarak bilinmemekle birlikte, riskler oluşturulabileceği tartışma konusu olmaktadır (Kannan ve Vimalkumar, 2021; Udovicki vd., 2022).

Toprakla kısmen temas eden tarımsal filmler arasında alçak tünel filmleri, doğrudan örtüler, dokusuz koruma tekstilleri ve gölgelik örtüler yer alır. İnce yapıları ve toprağa gömülen kenarları sebebiyle tek mevsimlik alçak tünel filmleri ve dokusuz kumaşlar kolayca bozulması ve kirlenmesi sebebiyle geri dönüşümlerinin zor olduğu incelenmiştir. Gölgelik örtüler ise birkaç sezon tekrar kullanılabilse de, kullanım ömürleri dolduğunda geri dönüşüme yatkınlıkları, malzeme yapısı, yönetim ve bozulma koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Toprak yüzeyine serilen plastik malçlar, yabancı ot gelişimini baskılayarak herbisit kullanımını azaltmakta; nem kaybını önleyerek sulama verimliliğini artırmakta ve toprak sıcaklığını yükselterek bitkilerde erkenciliği desteklemektedir. Plastik malç, günümüzde küresel malç pazarında yaklaşık olarak 5 milyar ABD doları değerinde olan önemli bir tarımsal plastik ürünü olmuştur. Siyah, şeffaf, gümüş ve UV katkılı malçlar farklı üretim koşullarına uyarlanabilirken, çevresel kaygıların artmasıyla biyolojik olarak parçalanabilir malç film pazarında da hızlı bir büyüme yaşanmaktadır.

Toprakta biriken plastik artıklar, ürün büyümesini olumsuz etkileyebileceği öngörülmektedir. Wang ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, topraktaki malç filmi kalıntısı $37,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ seviyesine ulaştığında, buğday, mısır ve diğer mahsullerin kök sistemleri üzerinde belirgin bir inhibisyon etkisi olduğu incelenmiş ve bu durum mahsul kalitesi ve verimini olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmüştür. Buradan yola çıkarak, biyolojik olarak parçalanabilir malçlar, toprak sağlığı ve mahsul büyümesi ile kalitesi üzerinde olumlu etkiler sağladıkları için geleneksel plastik malçlara kıyasla umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Biyolojik olarak parçalanabilen malç tamamen çözünmeden önce çevrede küçük plastik, oligomer ve monomer parçaları bulunabilmektedir. Zhao vd. PLA ve LDPE filmlerini iki yıl boyunca mısır tarlalarına gömdüklerinde, LDPE ile kullanılmış olan araziler ile malç kullanılmayan araziler arasında MP miktarının çokluğu açısından önemli bir fark olmadığı

gözlemlenmiştir. Buna karşılık, biyolojik olarak parçalanabilir malç kullanılan arazilerdeki MP bolluğu %35,3 - %229,5 oralarında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Biyolojik olarak parçalanabilir malçlar birkaç yıl içinde çözünmek üzere tasarlandığından, PE'ye kıyasla daha fazla mikroplastik üretmeleri mümkün görülmektedir. Bu durumun ise toprak sağlığı açısından riskler taşıdığı öngörülmektedir.

Zemin örtüsü kumaşları ile solarizasyon ve fümigasyon filmleri, tarımsal ürün üretiminde yaygın olarak kullanılan önemli plastik malzemeler olup, kullanım süreç boyunca çevre üzerinde birçok riski beraberinde getirmektedir. Zemin örtüsü kumaşlarının 3–5 yıl süresince tarım arazilerinde bırakılması, bu materyallerin yoğun bir şekilde toprak, kum ve organik madde ile kirlenmesine sebep olup bu durum hem geri dönüşümü zorlaştırmakta hem de ekonomik olarak geri dönüşümü mümkün kılmamaktadır (Guerrini et al., 2017). Kullanım sonrası tarım arazisinde bırakılan kumaşlar zamanla aşınıp parçalara ayrılarak mikroplastiklere dönüşmekte ve bu parçacıklar toprak mikrobiyal faaliyetlerini, su geçirgenliğini ve genel toprak sağlığını olumsuz yönde etkilediği değerlendirilmiştir.

Benzer şekilde, solarizasyon ve fümigasyon filmleri çoğu zaman ince yapıları nedeniyle hızlı bir şekilde bozunum göstermekte olup, aşırı derecede kirlenmekte ve kimyasal kalıntılar içerebilmektedir. Fümigasyon filmleri özellikle pestisit ve fumigant kalıntıları taşıdığından toprak ve yeraltı suyu için ciddi riskler oluşturmaktadır (Steinmetz et al., 2016). Bu filmlerin geri dönüşüm potansiyelleri düşük olduğu gibi, yanlış yönetildiklerinde malç filmleriyle benzer biçimde çevrede mikro plastik birikimine neden oldukları tespit edilmiştir. Her iki materyalin yarattığı bu çevresel etki, biyolojik olarak parçalanabilir veya kompostlanabilir alternatiflerin önemini ön plana çıkarmakta ve sürdürülebilir tarımsal plastik kullanımının önemini ön plana çıkarmaktadır (Brodhagen et al., 2017).

Plastik materyallerin tarımda en önemli kullanımlarından olan sulama sistemleri, modern tarımda su yönetimini güçlendiren en kritik unsurlardan biridir. Damla sulama ve mikro-sulama sistemlerinde kullanılan plastik borular ve bağlantı elemanları hafif, dayanıklı ve korozyona karşı dirençli yapıları sayesinde hem kurulum hem işletme kolaylığı sağlamaktadır (Rambabu ve ark, 2023). Ancak damla sulama sistemlerinde kullanılan polietilen borular mikro plastikler açısından ön plana çıkan malzemelerdir ve güneş ışığı, sıcaklık ve

mekanik aşınma nedeniyle zamanla aşınımına uğrayarak toprağa mikro plastik salılabilmektedir. Sistemin sökülme işlemleri esnasında oluşan plastik kırıkları ve sahada bırakılan atıklar da bu birikime katkıda bulunmaktadır (FAO, 2021). Araştırmalar, tarımsal sulama altyapısındaki plastik materyallerin, özellikle sıcak ve kurak bölgelerde mikro plastik oluşumunda önemli rol oynadığını kanıtlamaktadır (Qi et al., 2020). Eski ve düşük kaliteli boruların bozuluma uğrama nedeniyle daha sık değiştirilmesi ise plastik atık değerinde artışlara sebep olarak toprak sağlığı açısından ekstra risklere neden olduğu belirtilmektedir (Huang et al., 2020).

Tarım arazilerinin etkin yönetimi kapsamında plastik bileşenler toprak ve su yönetiminde kritik bir altyapı materyali olarak kullanılmaktadır (Akça, 2021). Gölet ve sulama kanallarının jeomembranlarla kaplanması su sızdırmazlığını artırmakta, drenaj sistemlerinde kullanılan plastik borular ise su birikimi, taban suyu ve tuzluluk gibi sorunların giderilmesine yardımcı olmaktadır (Samir ve ark, 2023). Bu tür altyapı çözümlerinin dayanıklı yapıları, bakım-onarım maliyetlerini azaltmakta ve özellikle büyük ölçekli modern sulama projelerinde tercih edilmektedir.

Bitkileri kuşlardan, böceklerden veya aşırı güneşten korumak amacıyla kullanılan Tarımsal koruma ağları da genellikle plastikten yapılmakta olup zamanla güneş ışığı, rüzgâr ve mekanik etkilerle parçalara ayrılmaktadır. Parçalanmış ağlar toprakta mikro plastik birikimine yol açabilmekte ve mikroorganizmaların yaşam alanını etkileyerek toprağın doğal işleyişini bozarak uzun zamanlı süreçlerde risk oluşturacağı düşünülmektedir (Huang et al., 2020).

Tarımsal üretimde yem depolama ve silaj hazırlama süreçleri de plastik malzemelere önemli ölçüde bağımlıdır. Silaj filmleri, stretch filmler ve balya ağları yem bitkilerinin oksijensiz ortamda fermente edilerek uzun süre besin değerini korumasını sağlamaktadır (Regan, 1997). FAO verileri, küresel silaj filmi tüketiminin yıllık 1,4 milyon ton olduğunu ve Avrupa'nın hem üretim hem tüketimde lider konumda bulunduğunu ortaya koymaktadır (FAO, 2021). Yüksek oksijen bariyeri sağlayan çok katmanlı plastik filmler, silajın bozulmasını azaltarak işletmelerde yem maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Fide ve fidan yetiştiriciliğinde kullanılan plastik materyaller, üretim sürecinin standardizasyonunu ve kaliteyi artıran araçlardır. Fide tepsileri, viyoller ve

polietilen torbalar kök gelişimini düzenleyerek uniform ve sağlıklı fide oluşumunu desteklemektedir. Küresel fide tepsisi ve saksı pazarının 2025 yılına kadar 2,5 milyar dolar seviyesine ulaşması beklenmektedir (Grand View Research, 2019). Plastik materyallerin hafifliği ve yeniden kullanılabilirliği, hem maliyetleri düşürmekte hem de nakliye süreçlerinde ürün kayıplarını azaltmaktadır.

Fidan ve fide dikiminde kullanılan plastik sicimler, klipsler ve küçük koruyucular her ne kadar kısa süreli kullanım için tasarlanmış olsa da, tarım arazisine bırakıldığında parçalanarak toprakta mikro plastik birikimine sebep olur. Bu durum uzun vadede kök gelişimi ve toprak mikroflorası üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Qi et al., 2020).

Fide ve saksı tepsilerinin üretiminde ise çoğunlukla polipropilen veya polistiren maddeleri kullanılarak yapılır. Bu tarz ürünler kullanım sonrası tarım arazisinde kalan veya geri alınamayan tepsilerin zamanla parçalanarak mikro plastik haline geldiği, toprağın su tutma kapasitesini ve besin döngüsünü olumsuz etkileyerek problemlere yol açtığı belirtilmektedir (Brodhagen et al., 2017).

Hasat sonrası süreçlerde plastik ambalaj materyalleri ürün kalitesinin korunmasında kritik rol üstlenmektedir. Plastik kasalar, paketleme filmleri ve depolama kapları hafif, dayanıklı ve hijyeniktir; bu özellikleri sayesinde meyve-sebze gibi hassas ürünlerin taşınmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. AB’de ambalaj sektörü toplam plastik talebinin %40’ından fazlasını oluşturmaktadır (FAO, 2021). Plastik ambalaj kullanımı, ürünlerdeki mekanik zararları azaltmakta, raf ömrünü uzatmakta ve lojistik süreçlerinin daha verimli yürütülmesini sağlamaktadır.

PE ve PP torbalar, çuvallar ve kasalar, tarımda ürünlerin taşınması ve depolanması için sıkça tercih edilen ürünlerdir. Ancak açık alanlarda uzun süre bırakıldıklarında, güneş ışığı ve mekanik aşınma nedeniyle parçalanmalar meydana gelmektedir. Bu plastik parçalar toprağa karışarak mikro plastik kirliliğine neden olur ve zamanla suyollarına taşınması söz konusu olmaktadır (FAO, 2021).

Gübre, tohum ve bazı kimyasal katkı maddeleri, kontrollü salınım ve korunma amacıyla polimer kaplamalar yapılmaktadır. Bu kaplamalar, toprakta çözünürken mikro plastik ve küçük polimer parçacıkları bırakması mümkün olmakla birlikte özellikle eski veya düşük kaliteli kaplamalar, toprakta kalarak

toprağın mikroorganizma dengesini bozup uzun vadede toprak sağlığını olumsuz etkilemesi söz konusu olmaktadır (Huang et al., 2020; Qi et al., 2020). Bu parçacıklar, toprak yapısını değiştirerek su ve hava dolaşımını kısıtlayabilir ve bitki köklerinin gelişimini etkileyebilir. Uzun süreli kullanım ve tekrar eden uygulamalar, bu etkileri daha da güçlendirerek tarımsal ekosistemlerde kalıcı değişikliklere yol açabilir.

Toprak düzenleyiciler ve iyileştiricilerin de mikro plastik oluşumu açısından risk faktörleri incelenmiştir. Hidroponik yetiştiricilikte yaygın olarak kullanılan PUF (Poliüretan Köpük) tıkaçlar ve taş yünü destekleri, parçalanmaya karşı direnç gösteren malzemeler olup özellikle küçük fideler için toksik etkiler sergileyebildiği belirlemiştir (Wheeler et al., 1985). Toprak iyileştirici olarak kullanılan genişletilmiş polistiren (PS) pulları veya boncukları ise yüksek sıcaklıklar ve bazı kimyasal dezenfektanlara maruz kaldığında ayrışmaları söz konusu olabilir (Aggie Horticulture, 2022). Bu malzemelerin son kullanımı, ömrünün sonu (EoL) aşamasında uygun, çevre dostu ve ekonomik bertaraf seçeneklerinin kısıtlı olması sebebiyle, hidroponik sistemlerde önemli bir zayıflık olduğu görülmektedir. Genelde bu atıklar çöplüklere gönderilmekte veya yakılmaktadır; yakma işlemi hem maliyetli hem de toksik emisyonlar açısından çevresel risk taşır (Diara et al., 2012; Wright, 2020). Mekanik veya kimyasal geri dönüşüm yöntemleri (ör. saf PUF'un karışımlarda kullanımı, glikoliz) alternatif olarak önerilse de substrat temizliği ve dezenfeksiyona ihtiyaç duydukları için maliyet artışına neden olmaktadır (Serrano et al., 2020). Bununla birlikte, saksılarda ve hidroponik sistemlerde kullanılan PUF ve PS pulları, kötü yönetim koşullarına dikkat edildiğinde, mikro plastik kirliliği açısından tarım arazilerinde ciddi risklere neden olmadığı düşünülmektedir.

Toprak düzenleyicilerden poliakrilamid (PAM) gibi ürünler ise fiziksel olarak parçalanarak mikro plastik birikimine neden olabilirler. PAM toprakta biyolojik olarak parçalanmaz; ancak kalıntı monomeri akrilamid insanlar için nörotoksik etkiler oluşturabilir (Seybold, 1994). Benzer şekilde, inşaat ve tarımda kullanılan diğer polimerik toprak düzenleyiciler de MNP oluşumunun artışında katkıda bulunabilir. Bu nedenle, PAM ve benzeri malzemeler toprak düzenleyicilerin AP (aktif plastik) kategorisi altında değerlendirilmemelidir.

Boş pestisit kapları, tehlikeli atık sınıfında olmasına rağmen birçok bölgede doğru şekilde kullanımına önem verilmemektedir. Sıkça tarlalara

dökülmekte, yakılmakta veya çöplüklere atılmaktadır. Bu tür dikkatsizlikler hem insan sağlığı hem de çevre için ciddi kalıcı riskler taşır (FAO/WHO, 2008; FAO/WHO, 2014). Sert plastik pestisit kapları, Avrupa Bitki Koruma Birliği (ECPA, 2015) ve FAO/WHO tarafından önerilen üçlü durulama adımları uygulanarak dekontamine edildikten sonra geri dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. 2019 yılıyla birlikte boş tarımsal kimyasal kaplarının küresel toplama oranı yaklaşık %30 olup, topladıklarının %83'ü geri dönüştürülmüştür (FAO, 2021; Croplife International, 2022). Bölgesel olarak en yüksek toplama oranları Avrupa'da (%61) ve Güney Amerika'da (%58) gözlenirken, Kuzey Amerika ve Okyanusya'da %40, Afrika'da %21 ve Asya'da yalnızca %3 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Buna karşın, esnek, çok katmanlı ve alüminize poşetler kolayca dekontamine edilemez ve geri dönüştürülmesi mümkün değildir. Genellikle tarlalarda plastik çöp olarak son bulurlar ve bu durum, mikro plastik oluşumunda en büyük katkı olarak görülmektedir. Bu tür ürünlerin çevreye zarar vermemesi için daha sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir alternatiflere ihtiyaç duyulmaktadır (FAO, 2021; Croplife International, 2022).

Hayvancılık alanında kullanım açısından ön plana çıkan tarımsal plastikler, özellikle silaj filmleri, balya ipleri ve ağları, yem çuvaları ve kulak küpeleri, kullanımına dikkat edilmediğinde toprak ve çevre üzerinde önemli mikro plastik riskleri oluşturmaları söz konusu olmaktadır. Silaj filmleri, teknik olarak geri dönüştürülebilmesi mümkün gibi görünse de iç yüzeyleri yemle temas ettiği ve dış yüzeyleri toprak ve çevresel koşullara maruz kaldığı için çoğunlukla organik maddelerle kirlenir ve geri dönüşüm maliyetlerinde artışa neden olmaktadır (Benoit et al., 2021). İnce silaj filmleri, azot oksitler veya tarımsal kimyasallarla temas halinde hızlandırılmış bozulmaya uğrayabilir ve hayvanlar ile makineler tarafından hasar görebilir. Kompostlanabilir silaj filmleri için gerekli çözümler üretilebiliyor olsa bile uzun süre açık havaya maruz kalan balyalar için yeterli çözüm henüz bulunamamıştır.

Balya çözümleri, ağlar ve sicimler, yapısal ve üretiminde kullanılan malzemelerin türüne bağlı olarak geri dönüştürülebilirlik açısından farklılık gösterebilmektedir. İnce streç filmler veya çok katmanlı malzemeler genellikle geri dönüştürülemiyor ve tarım arazisinde bırakıldığında MNP oluşumuna sebebiyet verebiliyor (FAO, 2021). Yaklaşık olarak 3-4 yıl dayanıklı, toksik madde içermeyen sicimler ise geri dönüştürülebilmesi mümkün olarak

görülmektedir. Geliştirilen fikirler içerisinde ise, balya ağlarının ve filmlerinin uyumlu geri dönüştürülebilir malzemeden üretilmesi, ağların filmle değiştirilmesi veya silaj makinelerinin yeniden tasarlanması yer alır. Biyolojik olarak ayrıştırılabilir balya filmleri ve UV ışınlarına dayanıklı sicimler geliştirilmekte olup, doğal olarak parçalanabilen sisal sicimler de ticari olarak mevcut bulunmaktadır.

Hayvan yemi çuvalları, çoğunlukla PP dokuma kumaştan üretilmekte olup kirlenmemiş veya bozunuma uğramadığı takdirde geri dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. Ancak çiftçiler tarafından başka alanlarda yeniden kullanım için tekrar edilen veya tarım arazilerinde terk edilen bozunuma uğramış olan çuvalar, toprak kirliliği ve MNP oluşumunun potansiyel kaynaklarındandır. Bu sorunu azaltmak için biyolojik olarak ayrıştırılabilen yem çuvalları geliştirilmiştir.

Hayvan kimliklendirmesinde kullanılan kulak küpeleri, kırıldığında, kaybolduğunda veya aşındığında küçük plastik parçacıklara ayrılarak toprak ve suyollarında MNP oluşumuna sebebiyet verebilmektedir. Alternatif olarak, kırık veya toplama programları ile geri elde edilen kulak küpeleri, biyometrik veya elektronik tanımlama sistemleri ve toprakta biyolojik olarak parçalanabilen kulak küpeleri geliştirme çalışmaları yürütülmektedir (FAO, 2021).

Bu kapsamda, hayvancılık alanında kullanılan plastik ürünlerin doğru EoL yönetimi ile geri dönüşümü mümkün ve biyolojik olarak ayrıştırılabilen malzemelerle üretimin yapılması hem çevresel hem de tarımsal sürdürülebilirlik açısından değer görmektedir.

Sonuç olarak plastik malzemeler, tarımsal üretimin hemen her aşamasında işlevsel bir araç olarak kullanılmakta ve modern tarımın verimliliğini, sürekliliğini ve rekabet gücünü artırmaktadır. Ancak plastik kullanımının artması, atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik konularını zorunlu olarak gündeme getirmektedir. Tarımsal plastiklerin geri dönüşüm oranlarının dünya genelinde %34 gibi düşük seviyelerde olması, büyük miktarda plastiğin çevreye karışarak toprak ve su ekosistemlerinde mikroplastik kirliliğine yol açtığını göstermektedir (Plastics Europe, 2022b). Bu nedenle plastik materyallerin doğru biçimde yönetilmesi, geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi ve biyolojik olarak parçalanabilir alternatiflerin yaygınlaştırılması hem tarımsal üretimin geleceği hem de ekosistem sağlığı için kritik önem taşımaktadır.

Tarımsal plastiklerin kullanımının artması, özellikle malç filmleri, zemin örtüsü kumaşları, sulama sistemleri, gübre ve tohum kaplamaları, hayvancılıkta silaj filmleri, balya ipleri, yem çuvaları, kulak küpeleri gibi ürünlerde, toprak ve çevrede mikro plastik (MNP) birikiminin oluşmasına ciddi ölçüde sebebiyet vermektedir. Bu birikim, toprağın fiziksel ve kimyasal yapısında bozulmalar meydana getirerek su tutma kapasitesini, havalanmasını ve mikroorganizma topluluklarının olumsuz yönde etkilenmesine neden olabilir; dolayısıyla bitki ve hayvan sağlığı ile ekosistem işleyişinde risk faktörlerinin oluşmasına sebepler oluşturabilir. Mevcut geri dönüşüm yöntemleri çoğu zaman yetersiz kalabilmekte, özellikle kirlenmiş, ince veya çok katmanlı malzemeler ve biyolojik olarak parçalanabilir ürünlerde MNP üretimi artış göstermektedir. Bu durum, sürdürülebilir tarım ve hayvancılık uygulamaları açısından ciddi risklerin oluşmasında rol oynamaktadır.

Bu çerçevede, tarımsal plastik kullanımında; biyolojik olarak parçalanabilir veya kompostlanabilir malzemelerin tercih edilmesi, EoL yönetiminin iyileştirilmesi, geri dönüşüm süreçlerinin etkinleştirilmesi ve plastiklerin çevreye bırakılmaması kritik öneme sahiptir. Ayrıca, ürünlerin üretim aşamasında malzemelerin dayanıklılığı, geri dönüşüme olan yakınlığı ve toksik madde içermemesi gibi etkenler göz önünde bulundurulması ciddi öneme sahiptir. Böylece hem toprak ve su kaynakları korunabilir hem de tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliği güvence altına alınabilir.

3. EKONOMİ PERSPEKTİFİNDEN MİKROPLASTİKLER

Küresel plastik üretimi, 1950 yılında 1,5 milyon ton iken, 2020 itibarıyla 367 milyon tona yükselmiştir (Tiseo, 2022). Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) verilerine göre, yüz yıllık bir dönemde (1950-2050) küresel birikimli plastik üretiminin 34 milyar ton gibi devasa bir seviyeye ulaşması beklendiği belirtilmektedir (UNEP, 2021). Bu üretim artışına paralel olarak, plastik malzemelerin çok yönlü çeşitliliğinin ve piyasa değerinin yıllık bazda artmaya devam edeceği öngörülmektedir.

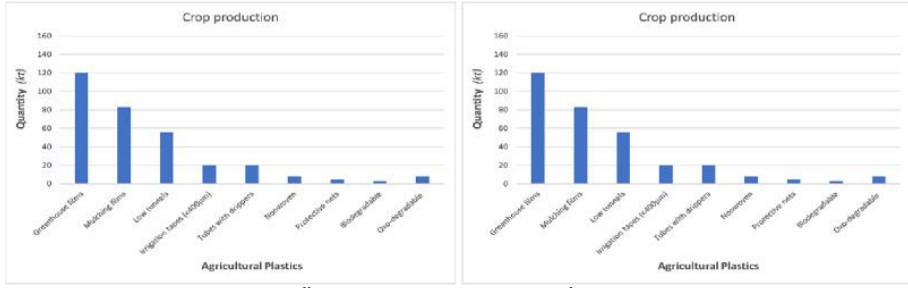
Dünya plastik üretimi (geri dönüştürülmüş plastikler hariç), 2016'da 335 milyon ton ve 2019'da 368 milyon ton seviyelerine istikrarlı bir şekilde yükseldikten sonra, 2020 yılında 367 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Plastics Europe, 2022a). Buna karşılık, Avrupa'daki plastik üretimi, 2016'da 60 milyon ton ve 2017'de 64,4 milyon ton seviyelerinden istikrarlı bir düşüşle

2020'de 55 milyon tona gerilemiştir. AB27+3 ülkelerindeki dönüştürücülerin plastik talebi incelendiğinde, ambalaj sektörünün %40,5'lik payla en büyük nihai kullanım pazarını temsil ettiği görülmektedir.

AB 27+3 ülkelerinde 2020 yılında toplanan plastik atık miktarı 29 milyon tonu aşmıştır. Toplanan bu atığın %34,4'ü hem AB27+3 içinde hem de dışında geri dönüştürülmüş, %40'luk daha büyük bir kısmı enerji geri kazanımına gönderilmiş, %23'ü çöp sahalarına depolanmış ve %2'si ihraç edilmiştir. Toplanan plastiklerin önemli bir bölümü (%65) döngüsel ekonomide kullanılmamıştır. Geri dönüştürülmüş tüketici sonrası plastik ambalajların payı, toplam geri dönüştürülmüş plastiklerin %43'ünü oluşturmuştur. Kaynağında ayrı toplanan plastiklerdeki geri dönüşüm oranı, karışık atıklardan elde edilen orana kıyasla 13 kat daha yüksek bulunmuştur (Plastics Europe, 2022b).

Farklı bölgelerde kullanılan tarımsal plastiklerin miktarlarına ilişkin küresel istatistiksel veriler, güvenilir olmamakla (eksik, güncel olmayan veya sınırlı, iyi tanımlanmamış veriler) nitelendirilmektedir (FAO, 2021). 2020 yılı için küresel tarımsal plastik kullanımının 11,7 milyon ton ve dünya plastik üretiminin %3,2'si olduğu tahmin edilmektedir (Plastics Europe, 2022a). Tarımsal filmler içinde seralar %47, malçlama %34, silaj %19 olmak üzere toplam tarımsal plastiklerin yaklaşık %60'ını temsil etmektedir. Bu kullanımın %70 ine sahip olan Asya, 2018 yılı itibarıyla tarımsal filmlerin en büyük tüketicisi konumundadır ve 2030 yılına kadar bu kullanımın %54 artışla 7,0 milyon tona çıkması beklenmektedir (FAO, 2021).

Avrupa'daki tarımsal plastik pazarının 2015 yılında 674 kiloton (kt) olduğu tahmin edilirken, 2019'da %5,3'lük bir büyümeyle 710 kt'ye ulaşmıştır (APE, 2022). İklimle ilgili yetiştiricilik ihtiyaçları da dikkate alındığında, Avrupa'daki tarımsal üretimde kullanılan plastiklerin tüketiminin artış göstermekle birlikte, kalite özellikleri, çeşitliliği ve işlevselliği önemli ölçüde iyileştirildiği belirtilmektedir. Güney Avrupa'da, özellikle bahçecilikte yaygın olan bitkisel üretim için kullanılan plastikler 2019 yılında Avrupa AP pazarının %45'ini oluşturmuştur. Tarım filmlerinin bu kullanımın %80,3'ünü oluşturduğu bunda da, seralarda kullanılan plastiklerin %37,2, malçlama plastiklerinin %25,7, alçak tünel plastiklerinin de %17,4 payının olduğu tespit edilmiştir.



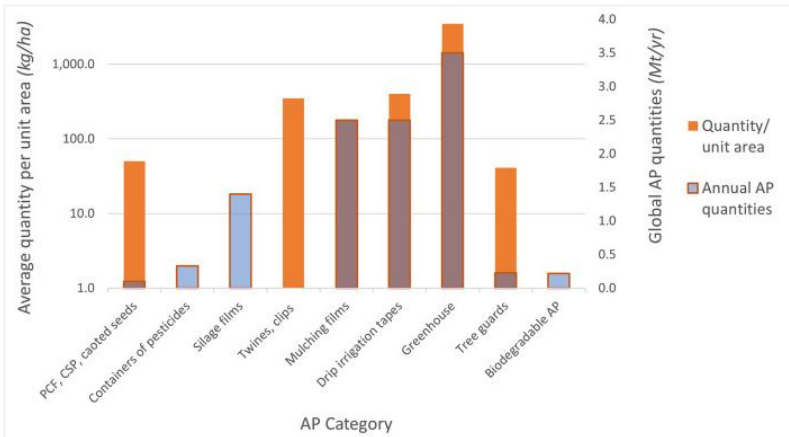
Grafik 1. AB'de Bitkisel Üretim ve Hayvancılık İçin Pazarlanan Tarımsal Plastik Miktarları (APE, 2022).

Kalan kısmında %12,4 ünü sulama sistemleri, %2,5 ini dokusuz örtüler, %1,5 ini koruyucu ağlar, %2,5 ini okso-bozunur, %1ini biyolojik olarak parçalanabilir tarımsal plastiklerin oluşturduğu belirtilmektedir. Kuzey Avrupa'da ise hayvancılıkta kullanılan tarımsal plastikler 2019'da %55'lik daha büyük bir paya sahip olmuştur bunlarda da balya ambalajları %36,8, silaj filmleri %30,5, sicimler %20,2, ağlar %12,6 paya sahiptir (APE, 2022).

4. TARIMSAL PLASTİK PAZARI

4.1. Bitkisel Üretim ve Tarımsal Plastik Pazarları

2021 yılında 11,5 milyar ABD Doları olarak tahmin edilen küresel tarım filmleri pazarının, 2026 yılına kadar %6,5'lik bileşik yıllık büyüme oranı ile 15,7 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir (Markets and Markets, 2020a). Bu tahmin, artan nüfusun tarım ve hayvancılık ürünlerine olan talebini karşılamak için sera, malçlama ve silaj filmlerine olan ihtiyacın artmasına dayandırılmaktadır.



Grafik 2: AB'de Birim Alanda Tarımsal Plastik Kategorileri (APE, 2022).

Asya-Pasifik bölgesindeki gelişmekte olan ekonomiler, tarımsal filmlerin küresel pazar değeri ve hacminde başı çekmekte; onları Avrupa ve Kuzey Amerika takip etmektedir.

4.1.1. Sera ve Yüksek Tünel Filmleri Pazarı

Küresel sera filmi kullanımının 2018 yılında yıllık 3,5 milyon ton olduğu ve ortalama tüketimin $3,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ olduğu tahmin edilmektedir (Le Moine, 2018). Küresel sera filmi pazarının, 2021'de 5,9 milyar dolardan, %7,6'lık bir artışla 2026'da 8,6 milyar dolara yükseleceği öngörülmektedir (Markets and Markets, 2020b). Bu yüksek büyüme, benzer sera yetiştiricilik alanlarındaki artışla bağlantılı olarak bahçe ürünlerine olan yüksek talebe bağlanmaktadır. En yüksek CAGR'nin geleneksel 150-200 μm kalınlığındaki filmler için olması beklenmektedir. Seraların çoğu Asya'da (%80), ardından Akdeniz bölgesinde (%15) bulunmaktadır (FAO, 2021). Özellikle Çin'in yer aldığı APAC bölgesi, en hızlı büyümeyi göstermektedir.

4.1.2. Malçlama Filmleri Pazarı

Küresel malçlama filmi kullanımının 2018'de yıllık 2,5 milyon ton olduğu ve ortalama tüketimin $0,18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ olduğu tahmin edilmektedir (Le Moine, 2018). Küresel malçlama filmi pazarının, 2020'de 3,5 milyar ABD Dolarından, %5,3'lük bir büyüme ile 2026'da 4,8 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir (Report Linker, 2022). Siyah malçlama filmi pazarın büyük kısmını domine etmekte olup, 2026'da 1,7 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir. 2026 yılında pazarın coğrafi olarak en büyük paylarının Çin (1,0 milyar ABD Doları) ve ABD'de (0,71 milyar ABD Doları) olacağı öngörülmektedir. Bildirilen en yüksek yıllık büyümeler Çin (%7), Kanada (%4,6), Almanya (%3,9) ve Japonya (%3,7) içindir. ABD ve Avrupa'daki yüksek malçlama filmi talebi, biyolojik olarak parçalanabilir malçlama filmlerine olan talep ve Avrupa'da korumalı tarımın önemi gibi teknolojik gelişmeler tarafından yönlendirilmektedir. Şeffaf malçlama filmleri için ABD, Kanada, Japonya, Çin ve Avrupa'da %6'lık, Latin Amerika'da ise %7,3'lük bir yıllık büyüme öngörülmektedir (ReportLinker, 2022).

4.1.3. Sulama Sistemleri Pazarı

Sulama boruları, ağlar ve sicimlerin yıllık küresel kullanımının 2017-2019 döneminde 2,5 milyon ton ve ortalama tüketimin $0,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ olduğu tahmin edilmektedir (FAO, 2021). Küresel damla sulama sistemleri pazarında 2022-2027 döneminde %10,3'lük bir yıllık büyüme beklenmektedir. En büyük pazar payına boru segmenti sahip olup, onu yayıcılar takip etmektedir. Küresel damla sulama boruları pazarının, 2020'de 1,2 milyar dolardan , %6,7'lik bir yıllık büyüme ile 2027'de 1,9 milyar dolara yükseleceği tahmin edilmektedir (Market Research, 2021). Tarla bitkileri ana pazar segmentini temsil ederken, bahçe bitkileri sulamasında en yüksek büyüme öngörülmektedir. Asya-Pasifik bölgesinin damla sulama pazarına hakim olması beklenmektedir.

4.1.4. Tarımsal Ağ Pazarı

Küresel tarım ağları pazarının, 2020'de 1,0 milyar ABD Dolarından, %5'lik bir yıllık büyüme ile 2030'da 1,5 milyar ABD Dolarına çıkması beklenmektedir (Future Market Insights, Inc, 2020). Bu tahmini büyüme, bitkilerle temas edebilen toksik olmayan malzemelerden yapılan ağlara olan talebin artmasına, tarımsal tekstil endüstrisinin gelişimine (örneğin, böcek geçirmez ağlar) ve tarım ağlarının tarım dışı uygulamalarda kullanımına bağlanmaktadır. Gıda öz yeterliliği önemli bir faktör olduğundan, Asya Pasifik Bölgesi'nin tarım ağları pazarına hakim olması beklenmektedir.

4.1.5. Gübre Torbaları ve Çuvalları Pazarı

Gübre torba ve çuvalları pazarı, küresel özel gübre pazarı büyümesini takip etmekte olup, 2021'de 38,7 milyar dolardan, %11,2'lik bir yıllık artışla ile 2027'de 73,1 milyar ABD Dolarına yükselmesi beklenmektedir (Research and Markets, 2021). Gübre torbaları pazarına Asya-Pasifik bölgesi hakim olup, en yüksek büyümenin Hindistan ve Çin'de olması beklenmektedir.

4.1.6. Sicim Pazarı

2019 yılında AB'deki sicim pazarının, AB'nin toplam tarımsal plastik talebinin %11'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (APE, 2022). Domates desteği için plastik sicimlerin ortalama tüketimi $350 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ve bitki başına 25 klips olarak tahmin edilmektedir.

4.1.7. Ağaç Koruyucuları Pazarı

Küresel ağaç koruyucuları pazarının 23 kt (2017–2019) olduğu ve ortalama tüketimin $41 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ olduğu tahmin edilmektedir (FAO, 2021).

4.1.8. Saksı Pazarı

Küresel bitki (bahçe) saksıları pazar büyüklüğünün, 2019'daki 2,36 milyar ABD Doları seviyesinden, %5,6'lık bir CAGR ile 2025'te 2,5 milyar ABD Dolarına ulaşması beklenmektedir (Grand View Research, 2019).

4.1.9. Pestisit Kapları Pazarı

Tarımsal kimyasal ambalajların küresel pazarının 0,33 milyon ton (2017-2019) olduğu tahmin edilmiş olup, Asya %46 ve Latin Amerika %29'luk paylarla başı çekmektedir (plastik olmayan ambalajlar dahil, 2021 verisi) (FAO, 2021). 2021-2026 döneminde %4,3'lük bir CAGR ile büyümesi öngörülmektedir (Mordor Intelligence, 2021).

4.2. Hayvancılıkta AP'nin Uluslararası Pazarları

Hayvancılık sektörü için seçilmiş AP kategorilerinin uluslararası pazar dinamikleri Şekil 2'de gösterilmektedir.

4.2.1. Silaj Filmleri Pazarı

Küresel silaj filmi kullanımının 2017-2019 döneminde yıllık 1,4 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (FAO, 2021). Küresel silaj filmi pazarının, 2021'de 1,3 milyar dolardan, 2021-2027 döneminde %3'lük bir artışla ile 1,5 milyar dolara çıkması beklenmektedir (Maximize Market Research Pvt Ltd, 2022). 2021 yılında, silaj filmi üretim pazarına %56,7'lik pay ile Avrupa liderlik ederken, onu %22,3 ile Kuzey Amerika takip etmiştir. Avrupa %54'lük pay ile silaj filmi tüketim pazarında hakim durumdadır. Asya-Pasifik, Kuzey ve Latin Amerika bölgeleri hızla değişen bu pazara dinamik bir şekilde girerken, Orta Doğu ve Afrika'nın da önemli bir pazar payı elde etmesi beklenmektedir. Çok katmanlı silaj filmlerinin payı biraz daha büyüktür. Malzeme segmentinde, PE-LLD %84,5'lik payla hakim konumda olup, PE-HD film segmentinin daha yüksek bir yıllık büyüme göstereceği beklenmektedir.

4.2.2. Balya Sarma Pazarı

Küresel balya ambalaj pazarının, 2020'de 0,47 milyar dolardan, 2021-2027 döneminde %3,8'lik bir yıllık büyüme ile 0,61 milyar dolara (2027) yükseleceği öngörülmektedir (Maximize Market Research Pvt Ltd, 2021). Avrupa, bu pazarda yaklaşık üçte birlik payla hem küresel üretim hem de tüketimde hakim durumdadır (Transparency Market Research, 2022). Kuzey Amerika onu yakından takip ederken, Çin ve Hindistan'ın balya ambalajlarının başlıca tüketicileri olması beklenmektedir. Brezilya, Meksika, Rusya ve ABD için yüksek büyüme oranları öngörülmektedir.

4.2.3. Hayvan Yemi için Torbalar ve Çuvallar Pazarı

Küresel hayvan yemi ambalaj pazarının 2021'de 12,9 milyar dolar olduğu ve tüm malzemeler dikkate alındığında %5,50'lik bir yıllık artışla 2029'da 19,8 milyar dolara ulaşmasının beklenmektedir (Data Bridge, 2021). Plastik ambalaj segmenti, 2021'de 4,3 milyar dolar (%31,3 pay) ile pazara hakim olmuş ve %5,50'lik bir büyüme ile 2029'da 6,6 milyar dolara yükseleceği öngörülmüştür. Bu büyüme, hayvan yemi üretimi ve tüketimindeki artışa ve yem raf ömrünün uzatılması ihtiyacına bağlanmaktadır.

4.2.4. Kulak Küpesi Pazarı

Kulak küpelerinde kullanılan plastiklerin küresel ortalama tüketiminin 2018 yılında 1 kg·ha⁻¹ olduğu tahmin edilmektedir (FAO, 2021).

4.3. Biyolojik Olarak Parçalanabilir AP'nin Uluslararası Pazarları

European Bioplastics (2021) verilerine göre, 2021 yılında biyobazlı ve biyolojik olarak parçalanabilir plastiklerin küresel üretim kapasitesi 1,55 milyon ton (toplamin %64,2'si) olarak gerçekleşmiştir. 2026 yılı için öngörülen üretim kapasitesinin %241 artışla 5,29 milyon tona (2026'da toplamin %69,6'sı) ulaşması beklenmektedir. Tarım sektörü, 2021'de %14,1 (0,22 milyon ton) ve 2026'da %21,4 (1,13 milyon ton) pay ile, ambalaj sektöründen sonra biyobazlı ve biyolojik olarak parçalanabilir plastiklerin küresel üretim kapasitesinde ikinci en yüksek paya sahiptir.

4.3.1. Toprakta Biyolojik Olarak Parçalanabilir Malçlama Filmleri

Küresel biyolojik olarak parçalanabilir malçlama filmleri pazarının 2021-2026 döneminde %8,5'lik bir artışla ile büyümesi beklenmektedir (Mordorintelligence, 2020). Bu artışın başlıca nedenleri arasında, Kuzey Amerika ve Avrupa'da çevresel kaygılarla geleneksel plastik kullanımını caydıran politikalar yer almasıdır. En yüksek artışın özellikle Çin ve Hindistan olmak üzere Asya Pasifik ülkelerinde öngörüldüğü belirtilirken, Kuzey Amerika en büyük pazar konumundadır. Zorluklar arasında yüksek piyasa fiyatı ve olası zararlı katkı maddelerinin kullanımına ilişkin endişeler bulunmaktadır. İtici faktörler ise sıfır atık yönetimi maliyeti, parçalanmayan fosil bazlı plastik parçalarının neden olduğu toprak kirliliğinin ortadan kalkması ve destekleyici düzenlemelerdir (örneğin, standart özellikler (CEN, 2018d)).

4.3.2. Saksılar

Toprakta biyolojik olarak parçalanabilen veya kompostlanabilen bitki (bahçe) saksıları, fide tepsileri, fide saksı tepsileri ve çiçek soğanı ambalajları halihazırda piyasada mevcut olup, dinamik bir pazar segmentini temsil etmektedir. Çin, Hindistan ve Brezilya gibi gelişmekte olan ülkeler de dahil olmak üzere, yeni biyolojik olarak parçalanabilir bitki saksılarının geliştirilmesine yönelik yatırımlar artmaktadır (Grand View Research, Inc, 2019).

4.3.3. Toprakta Doğrudan Biyolojik Olarak Parçalanabilen Örtüler

Bitkilerle temas eden, toksik olmayan doğrudan (yüzer) örtülere olan talebin artması, toprakta biyolojik olarak parçalanabilen doğrudan örtülere olan talebi de artırmıştır (Domagała-Świątkiewicz & Siwek, 2013).

5. TÜRKİYE PLASTİK SEKTÖRÜ

Plastik sektörü, Türkiye ekonomisinin en önemli aktörlerinden birisidir. 2024 Yılında 10 milyon ton düzeyinde gerçekleşen toplam üretim hacmi ve 45 milyar dolara yaklaşan cirosu, doğrudan ve dolaylı toplam 15 milyar dolarlık ihracat performansı ve son 10 yılda GSMH büyümesini aşan yıllık büyümesi

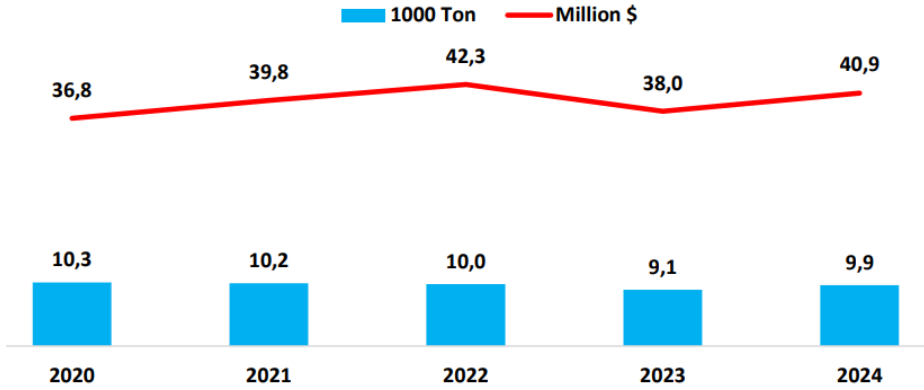
ile ülke ekonomisine önemli katkı sağlamakta ve sağladığı katkı giderek artmaktadır.

Tablo 1: Türkiye Plastik Mamul Üretimi

	2023	2024	Değişim 2024/2023 (%)	CAGR (%) 2020-2024
Milyon Ton	9,1	9,9	8	-1
Milyar \$	38,0	40,9	8	2

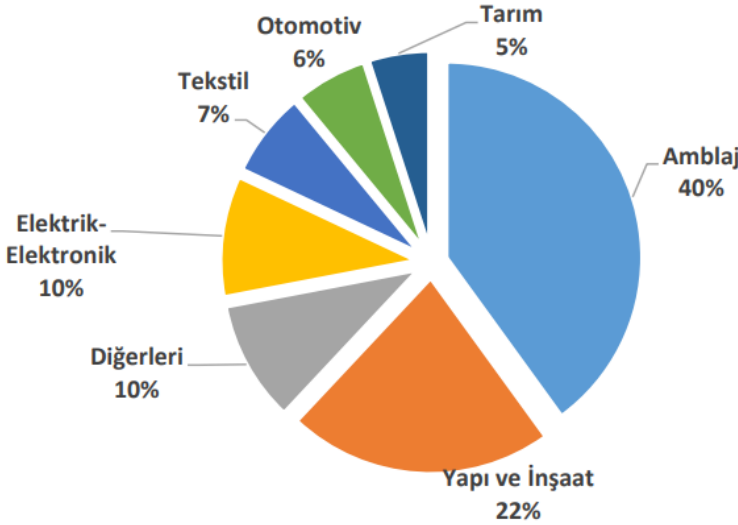
(Kaynak: PAGEV-2024)

Son 5 yıl içinde yılda Türkiye plastik mamul üretimi ortalama miktar bazında %1 gerilerken değer bazında %8 artış göstermiştir. Türkiye plastik mamul üretimi 2024 yılında 9,9 milyon ton ve 40,9 milyar dolar gerçekleşmiştir. Bu üretim Tablo 1 ve Grafik 3'te verilmiştir.



Grafik 3: Türkiye Plastik Mamul Üretimi (Kaynak: PAGEV-2024)

Grafik 4'te Türkiye'nin alt sektörler bazında plastik mamul üretimi verilmiştir. 2024 yılında 9,9 milyon tonluk toplam plastik mamul üretimi içinde yaklaşık 3,96 milyon ton ile plastik ambalaj malzemelerinin başı çektiği, plastik inşaat malzemeleri üretiminin ise 2,2 milyon ton ile plastik ambalaj malzemelerini takip ettiği görülmektedir.



Grafik 4: Türkiye'nin Alt Sektörler Bazında Plastik Mamul Üretimi -1000 Ton (Kaynak: PAGEV-2024)

Türkiye plastik mamul sektörü 2024 yılı ihracatının üretimine içindeki payı %27, ithalatının yurtiçi tüketim içindeki payı da %9'a düşmüştür.

Tablo 2. Plastik Mamul Madde Arz ve Talep Dengesi (1000 Ton)

	2023	2024	CAGR (%) 2020-2024(%)	Değişim 2024/2023(%)
Üretim	9.133	9.868	-1	8
İthalat	762	739	6	-3
İhracat	2.613	2.700	3	3
Yurtiçi Tüketim	7.282	7.907	-2	9
Dış Ticaret Açığı / Fazlası	1.852	1.961	2	6
İhracat / Üretim (%)	29	27		
İthalat / Yurtiçi Tüketim (%)	10	9		

(Kaynak: PAGEV-2024)

2024 yılında plastik hammadde arzının %87'si ithalatla karşılanmaktadır. 2024 yılında gerçekleşen 7,9 milyon tonluk plastik mamul iç tüketimin yaklaşık 3,2 milyon tonu otomotiv, ambalaj, inşaat ve elektronik gibi ihracatçı sektörler kanalı ile yarı mamul ve mamul şeklinde dolaylı olarak ihraç edilmektedir. Kalan 4,7 milyon tonluk kısım ise doğrudan tüketici tarafından tüketilmiştir.

Türkiye, plastik mamul ticaretinde geniş bir coğrafi çeşitliliğe sahiptir. Her yıl 100'ün üzerinde ülkeden plastik mamul ithalatı yapılırken, yaklaşık 200 ülkeye ihracat gerçekleştirilmektedir. Bu durum, sektörün uluslararası pazarlara

yüksek entegrasyonunu ve dış ticaret ağının kapsamını göstermektedir. 2023-2024 yılı ihracat gerçekleştirmeleri Tablo 2’de verilmiştir.

2024 yılında, ithalatın ülkelere göre dağılımı incelendiğinde, Türkiye’nin 10 ülkeden yaptığı ithalatın toplam ithalat miktarının %70’ini, değer bazında ise %75,9’unu oluşturduğu görülmektedir. Söz konusu dönemde Çin, toplam plastikten mamul madde ithalatından miktar olarak %20,8 ve değer olarak %28,4 pay alarak Türkiye’nin en büyük tedarikçisi konumuna gelmiştir. Çin’in ardından Almanya ise miktar bazında %18,4 ve değer bazında %13,9 pay ile ikinci sırayı almaktadır. Çin ve Almanya’dan sonra İtalya, İran, Güney Kore ve Fransa başlıca tedarikçi ülkeler konumundadır.

Aynı dönemde sektör mamul madde ihracatına bakıldığında ihracatta 10 ülkeye yapılan satışlar toplam ihracatın miktar bazında %45,3’ünü, değer bazında ise %48,1’ini oluşturmaktadır. Türkiye’nin plastik mamuller alanındaki en önemli ihracatçıları Irak, İngiltere, İtalya, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri, oluşturmaktadır. Bu ülkeler, sektörün pazar çeşitliliği ve ihracat performansı açısından stratejik önem taşımaktadır.

2024 yılı verilerine göre, Türkiye’nin toplam plastik hammadde dış ticaretini incelendiğinde ithalatının miktar bazında %71,1’i, değer bazında ise %70,6’sı yalnızca 10 ülkeden gerçekleştirilmiştir. Bu dönemde Suudi Arabistan, Güney Kore ve Amerika Birleşik Devletleri ithalatta ilk üç sırayı almış; söz konusu ülkelerin toplam ithalat içindeki payı miktar bazında %32,5, değer bazında ise %35,4 olmuştur.

Aynı dönemde plastik hammadde ihracatında ise toplam ihracatın miktar bazında %52,4’ünün, değer bazında ise %54,3’ünün 10 ülkeye yapıldığı görülmektedir. Bu dönemde Türkiye’nin en büyük üç plastik hammadde ihracat pazarı İtalya, Rusya Federasyonu ve Romanya’dır. Bu ülkelerin toplam ihracat içerisindeki payı miktar bazında %22,6, değer bazında ise %23,7 olarak gerçekleşmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarım sektöründe plastiklerin giderek artan kullanımı mevsim etkisini, su kullanımını azaltarak iklim değişikliğine uyumu artırırken bitki besin kullanımını artırarak verimliliği artırmakta çiftçilere önemli destek sağlamaktadır. Ancak tüm sektörlerde plastik materyallerin üretimi

kullanılması ve yaygınlaşması sonucunda plastik atıklar ve çevresel zararları bugün daha çok tartışılmaya başlamıştır.

Tarımsal plastiklerin çok azı toplanıp geri dönüştürülmekte çoğu toprağa gömülerek, tarlada yakılarak veya çöpe atılarak kaldırılmaktadır. Plastikler petrol türevi olduğu için sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Bu imha şekli çevre üzerinde ciddi bir etki yaratarak toprak sağlığı, biyoçeşitlilik ve insan sağlığını kötü etkilemektedir. Toprak ve sudan gıdalara geçen mikro plastikler insanlarda sağlık sorunlarına yol açabilen zehirli kimyasal kirleticiler taşıyabilmektedir. Gıda sektöründe plastiklerin döngüsel ekonomi modeli ile sürdürülebilir kullanımı gıda güvenliği ve çevre açısından önemlidir.

Plastiğin ekonomiye sağladığı önemli faydaların yanı sıra, üretim ve kullanımının bu denli genişlemesiyle bağlantılı iki önemli olumsuzluk bulunmaktadır:

Birincisi plastiklerin sera gazı emisyonlarına katkısının, 2050 yılına kadar küresel karbon bütçesinin %15'ine ulaşabileceği tahmin edilmektedir. İkicisi tüketici sonrası plastik ürünler, deniz çöpü ve plastik kirliliğine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (World Economic Forum, 2016). Küresel plastik üretiminin yalnızca %9'u geri dönüştürülürken, büyük bir kısmı çöp sahalarına gönderilmekte, yakılmakta veya büyük miktarlarda doğal çevrede kirletici olarak birilmektedir. Bu durum, her yıl yaklaşık 11 milyon ton plastiğin okyanuslara karışması ve deniz çöpünün %85'ini plastiklerin oluşturmasıyla kendini göstermekte yani deniz çöpünün %80'i karasal kaynaklıdır ((UNEP, 2022; UNEP, 2021). 2040 yılına kadar her yıl 23 ila 37 milyon ton plastik atığın okyanuslara ulaşacağı tahmin edilmektedir.

Balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetlerinden kaynaklanan plastiklerden kaynaklanan kirlilikte küresel mikroplastik kirliliğine katkı yapmaktadır. Deniz ortamında mikro ve nano plastiklere ayrışan plastikler deniz yaşamını etkileyerek, su hayvanlarının bağırsak mikrobiyomunu değiştiren ciddi etkilere neden olduğu belirtilmektedir.

Küresel tarımsal film kullanımının da 2018'deki 6,1 milyon ton seviyesinden, 2030'a kadar %50 artışla 9,5 milyon tona ulaşacağı öngörülmektedir (Le Moine, 2018). Plastik kirliliği sorununu çözmek, saf plastik üretiminin azaltılmasını, tüketici sonrası plastiklerin kötü yönetiminin kontrol altına alınmasını, tek kullanımlık plastiklerin yasaklanmasını ve

döngüsel ekonomi prensiplerinin, malzeme geri kazanımına vurgu yapılarak uygulanmasını gerektirmektedir (UNEP, 2019; World Economic Forum, 2016).

Biyoekonomi, tarımda plastiklerin sürdürülebilir kullanımı için alternatifler üretilmesi, döngüsel yaklaşımların desteklenmesi çevre kirliliğini azaltırken ekonomik fırsatlar yaratır ve yeniliği teşvik eder. Bu kadar yaygın kullanımdan vazgeçmenin zorluğu düşünüldüğünde kullanımının kısıtlanması yanında alternatif ikame ürünlerin geliştirilmesi, mevcut malzemelerde sürdürülebilirliği destekleyecek şekilde standartların iyileştirilmesi önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Aggie Horticulture. (2022). *Expanded polystyrene and horticultural substrates: Environmental considerations*. Aggie Horticulture Publications
- Akça, M. O., & Ok, S. S. (2021). Toprak ekosistemi üzerine mikroplastiklerin etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 9(2), 79–91.
- APE Agriculture Plastic & Environment. (2022). APE Statistics - APE Europe, Comité International des Plastiques en Agriculture. <https://apeeurope.eu/statistics/>
- Benoit, P., Smith, J., & Brown, L. (2021). Agricultural plastic waste management: Challenges and solutions in forage systems. *Journal of Environmental Management*, 289, 112–123.
- Bhardwaj, A., Jan, B., & Alam, T. (2021). Quality characteristics of packaging materials and containers used in the storage of fresh produce. *Packaging and Storage of Fruits and Vegetables* (pp. 25–39). Apple Academic Press.
- Brodhagen, M., Goldberger, J. R., Hayes, D. G., Inglis, D. A., Marsh, T. L., & Miles, C. (2017). Policy considerations for biodegradable plastic mulch use in agriculture: A review of biodegradable mulch films and regulatory frameworks. *Environmental Science & Policy*, 67, 49–61.
- Croplife International. (2022). *Global collection and recycling of empty pesticide containers*. Croplife International Reports.
- Data Bridge. (2021). *Animal Feed Packaging Market – Global Industry Trends and Forecast to 2029*.
- Dataintel. (2021). *Global Bale Net Wrap Market Report*.
- Diara, F., Rossi, L., & Bianchi, R. (2012). End-of-life management of polyurethane foams in horticulture: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 33, 156–162.
- Domagała-Świątkiewicz, I., & Siwek, P. (2013). The effect of biodegradable mulch films on soil properties and yield of tomato. *Folia Horticulturae*, 25(2), 141–147.
- ECPA (European Crop Protection Association). (2015). *Guidelines for empty pesticide container management*. ECPA Publications.
- ECHA. (2019). *Annex XV restriction report: Intentionally added microplastics*. European Chemicals Agency.
- European Bioplastics. (2021). *Bioplastics market data*.

- Emekli, N., & Büyüktaş, K. (2015). Sera örtü malzemelerinin mekanik özellikleri. *Derim*, 23(2), 24–35.
- FAO/WHO. (2014). *Pesticide container management and recycling: Best practices*. Food and Agriculture Organization / World Health Organization.
- FAO. (2021). *Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Future Market Insights, Inc. (2020). *Agricultural Nets Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2020-2030*.
- Grand View Research. (2019). *Plant Pots Market Size, Share & Trends Analysis Report By*
- Grand View Research, Inc. (2019). *Biodegradable Mulch Film Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2019–2025*.
- Guerrini, L., Mari, M., Zaccardelli, M., & Campanelli, G. (2017). Environmental impacts of agricultural plastic use and disposal: A case study in Mediterranean horticulture. *Waste Management*, 70, 243–252.
- Hao, Y., Min, J., Ju, S., Zeng, X., Xu, J., Li, J., Wang, H., Shaheen, S. M., Bolan, N., Rinklebe, J., & Shi, W. (2024). Potential hazards from the biodegradation of soil plastic mulch: Increases in microplastics and CO₂ emissions. *Journal of Hazardous Materials*, 467.
- Huang, Y., Zhao, Y., Wang, J., Zhang, M., Jia, W., & Qin, X. (2020). LDPE microplastic films alter soil microbial community composition and enzymatic activities in agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 727, 138–160.
- Le Moine, B. (2018). *Agricultural plastic films market in the world*. Agricultural Film Manufacturers Association.
- Markets and Markets. (2018). *Seed Coating Market by Process (Film Coating, Encrusting, Pelleting), Active Ingredients (Protectants, Phytoactive Promoters), Crop Type (Cereals & Grains, Oilseeds & Pulses, Flowers & Ornamentals), and Region - Global Forecast to 2025*.
- Markets and Markets. (2020a). *Agricultural Films Market by Type (LLDPE, LDPE, Reclaim, EVA, HDPE), Application (Greenhouse, Silage, Mulch), and Region (North America, Europe, Asia Pacific, South America, Middle East & Africa) - Global Forecast to 2026*.

- Markets and Markets. (2020b). Greenhouse Film Market by Resin Type (LDPE, LLDPE, EVA), Thickness (80 to 150 Microns, 150 to 200 Microns, More than 200 Microns), Width (4.5M, 7M, 9M, Others) and Region - Global Forecast to 2026.
- Markets and Markets. (2021). Agricultural Coatings Market by Coating Type (Polymers, Colorants, Pellets), Application (Fertilizers, Seeds, Pesticides), Seed Coating Process (Film Coating, Encrusting, Pelleting), Crop Type, and Region - Global Forecast to 2026.
- Maximize Market Research (2022). Global Silage Film Market: Industry Analysis and Forecast (2021-2027). Maximize Market Research Pvt Ltd.
- Mordor Intelligence. (2019). Polymer Coated Urea Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025).
- Mordor Intelligence. (2021). Agrochemical Packaging Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026).
- Mordorintelligence. (2020). Biodegradable Mulch Films Market - Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025).
- Plastics Europe, 2022b
- PAGEV.(2024). Türkiye Plastik Sektörü İzleme Raporu 2024.
- Plastics Europe (2022a). Plastics - the facts 2021, an analysis of European plastics production, demand and waste data, report 2021. www.plasticseurope.org (2022)
- Plastics Europe (2022b). The circular economy for plastics, a European overview, Plastics Europe AISBL. www.plasticseurope.org (2022)
- Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C. (2020). Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Science of the Total Environment*, 703, 134722.
- Rambabu, G. V., Bridjesh, P., Kishore, N. P., & Sai, N. S. (2023). Bir damla sulama sisteminin tasarımı ve geliştirilmesi. *Materials Today: Proceedings*.
- Regan, C. S. (1997). *Forage conservation in the wet/dry tropics for small landholder farmers*. Charles Darwin University (Australia).
- Research and Markets. (2021). Global Specialty Fertilizers Market Report 2021-2027.
- Samir, A., El Shiekh, H., El-Dawy, M., El-Zayat, Y., & El-Molla, D. (2023). Water losses in irrigation canals and modern sustainable solutions – a

- review. Proceedings of the Smart Cities International Conference (Vol. 27).
- Serrano, L., Fernandez, J., & Martinez, A. (2020). Biodegradable polyurethane foams for hydroponic applications: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(14), 3985–3995.
- Seybold, C. A. (1994). Soil stabilization with polymers: Environmental and human health considerations. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(6), 566–571.
- Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690–705.
- Tiseo, I. (2022). *Production of plastics worldwide from 1950 to 2020*. Statista.
- Transparency Market Research. (2022). *Bale Wrap Film Market: Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast, 2021-2031*.
- Tüzel, Y., Gül, A., Daşgan, H. Y., Özgür, M., Özçelik, N., Boyacı, H. F., & Ersoy, A. (2005). Örtüaltı yetiştiriciliğinde gelişmeler.
- UNEP. (2019). *Addressing Single-use Plastic Products Pollution*. United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2021). *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2022). *Drowning in Plastics – Marine Litter and Plastic Waste Vital Graphics*. United Nations Environment Programme.
- Wheeler, R. M., Tibbitts, T. W., & Yorio, N. C. (1985). Toxicity of polyurethane foam to small seedlings in controlled environment studies. *Hort Science*, 20(6), 905–907.
- Wright, P. (2020). Recycling and recovery of polyurethane foams: State of the art. *Polymer Degradation and Stability*, 180, 109–121.
- World Economic Forum. (2016). World Economic Forum The new plastics economy-rethinking the future of plastics



ISBN: 978-625-378-481-2