

# TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE



IKSAD  
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

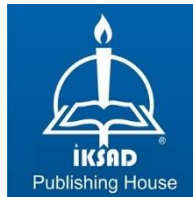
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR

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](mailto:iksadyayinevi@gmail.com)

[www.iksadyayinevi.com](http://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..... 63

### BÖLÜM 3

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

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER..... 91

### 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..... 118

### BÖLÜM 5

#### PLASTİKLEŞEN TOPRAKLAR: MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN TOPRAĞIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Doç. Dr. Halil ERDEM ..... 173

### BÖLÜM 6

#### GÜNÜMÜZ VE GELECEKTE TOPRAKLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE MİKROPLASTİKLERİN ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR ..... 197

### BÖLÜM 7

#### TOPRAKTA MİKROPLASTİKLERİ TANIMLAMA KRİTERLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR ..... 215

### BÖLÜM 8

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

Doç. Dr. Halil ERDEM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE..... 245

### BÖLÜM 9

#### TARIM VE ÇEVRE ARASINDA GÖRÜNMEZ TEHDİTLER: MİKROPLASTİKLER İLE PESTİSİTLER

Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER..... 272

## **BÖLÜM 10**

### **ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI**

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 284

## **BÖLÜM 11**

### **HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER**

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 322

## **BÖLÜM 12**

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

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI ..... 360

## **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..... 385

## **BÖLÜM 14**

### **PLASTİK VE MİKROPLASTİK EKONOMİSİ: TARIM, ÇEVRE VE TÜRKİYE PAZARI**

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL..... 422

## 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 YEŞİLAYER<sup>1</sup>

Doç. Dr. Halil ERDEM<sup>2</sup>

Prof. Dr. Arda YILDIRIM<sup>3</sup>

Dr. Cabir Çağrı GENÇE<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootehni Bölümü, Tokat, Türkiye. E-posta: nihat.yesilayer@gop.edu.tr

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

<sup>3</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootehni Bölümü, Tokat, Türkiye. E-posta: arda.yildirim@gop.edu.tr

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

## BÖLÜM 4

### ATIKSULARDAKİ MİKROPLASTİKLERİN TARIM VE HAYVANCILIK EKOSİSTEMLERİ İLE ETKİLEŞİMİ VE YÖNETİMİ

Dr. Saliha DİRİM BUHAN<sup>1</sup>  
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN<sup>2</sup>  
Prof. Dr. Arda YILDIRIM<sup>3</sup>

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

---

<sup>1</sup> Tokat Niksar Belediyesi, Etüt Proje Müdürlüğü, Niksar/Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0009-0002-2413-8867, e-posta: ceddarim@hotmail.com

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

<sup>3</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni 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 ortamdaki 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 dögüsel ekonomi yaklaşımları anahtar rol oynamaktadır (Al-Salem ve ark., 2009).

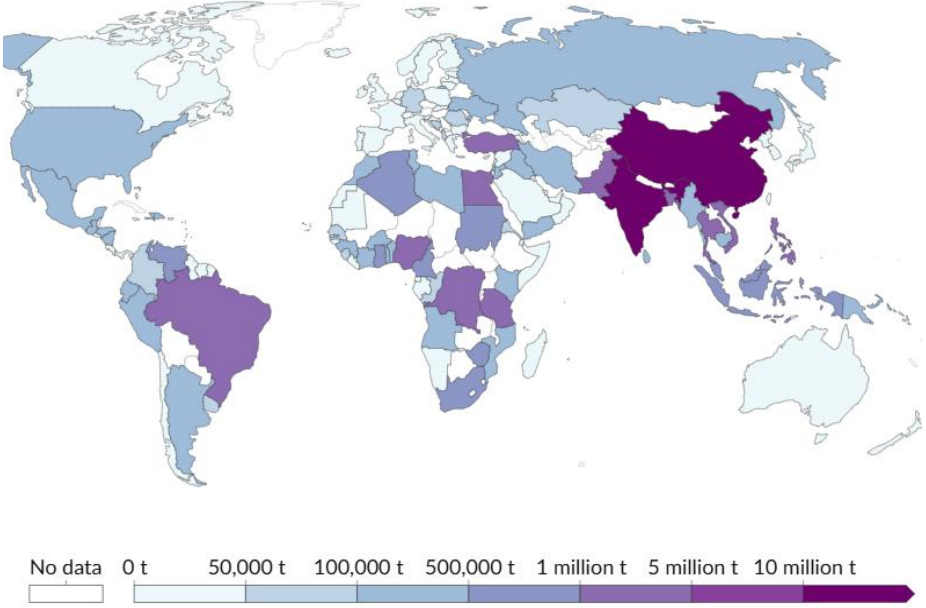
Bu derleme, mikroplastik kirliliğini, özellikle tarım-hayvancılık sektörü ve atık su arıtma tesisleri ekseninde ele almakta; mikroplastikleri her yönü ile tanıtarak; çevresel taşınım yollarını bilimsel bir perspektifle incelemektedir. Ayrıca, mevcut bertaraf teknolojilerini, yönetim stratejilerini ve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

## **1. MİKROPLASTİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ**

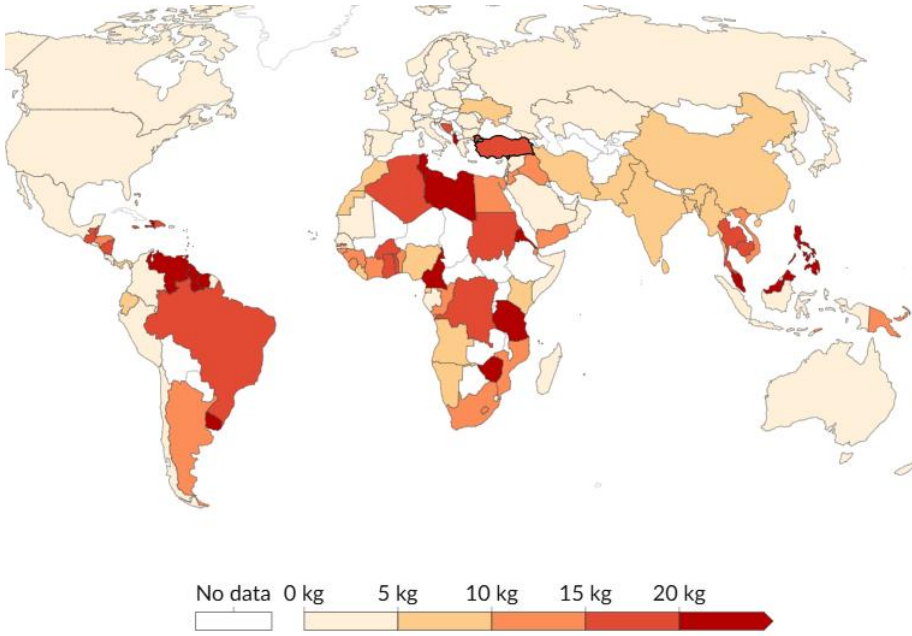
### **1.1. Küresel Plastik Üretimi ve Mikroplastik Oluşumu**

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 mikroboncuklar 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 çöprü" kapsamında değerlendirilselerde, mikroplastikler; 5 mm'den küçük boyut, katı hal, suda çözünmezlik, bozunmaya direnç ve plastisite gibi benzersiz özellikleriyle geleneksel deniz çöpründen 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 çöprünü "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.

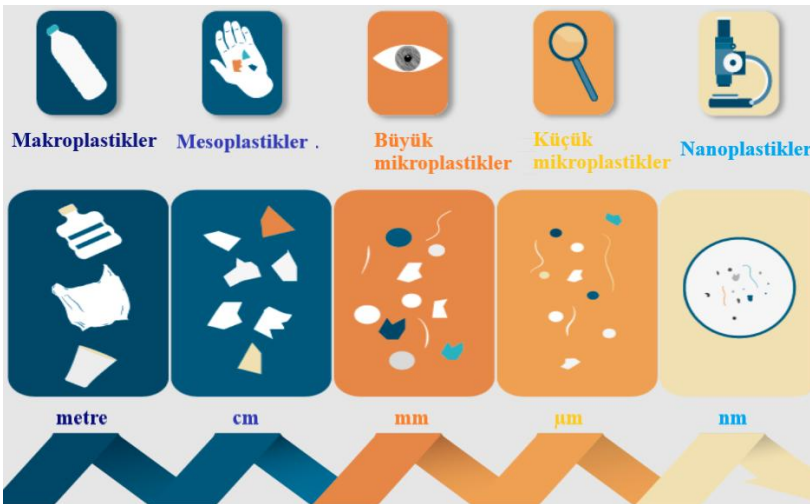
Plastik atıklar, çevresel davranışlarını ve etkileşimlerini belirleyen temel bir parametre olan boyutlarına göre sınıflandırılır (Barnes ve ark., 2009; Enyoh ve ark., 2023). Yaygın kabul gören sınıflandırma şu şekildedir:

- **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  $\mu$ m - 5 mm
- **Nanoplastikler:** 1 nm - 1  $\mu$ 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 $\mu$ m	Kozmetikler, aşınmış büyük plastikler	Hücrelere nüfuz edebilir, tespiti zor
Mikroplastik	0.1 $\mu$ 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 ağları	Gözle görülür, parçalanma kaynağı



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

### 1.5. Şekline (Morfolojisine) Göre Sınıflandırma

Mikroplastikler, görünümüne 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 dağılımını 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 <sup>3</sup> )	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.

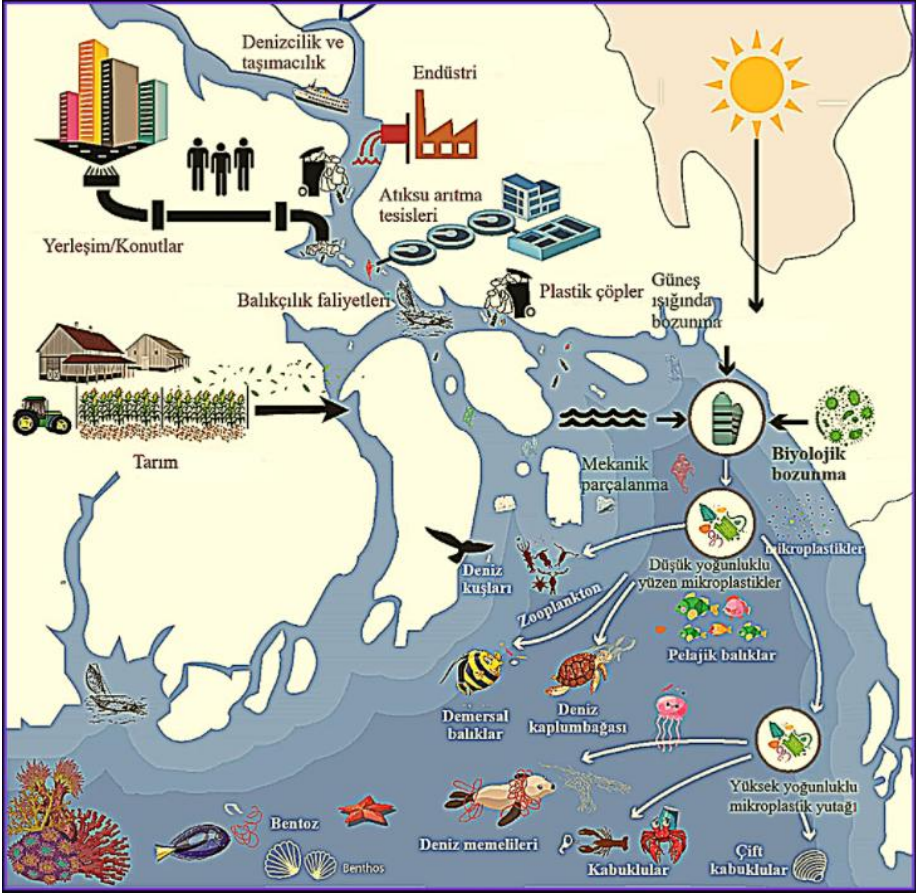
#### 3.2. Kıyı ve Deniz Taşınım Dinamikleri

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).

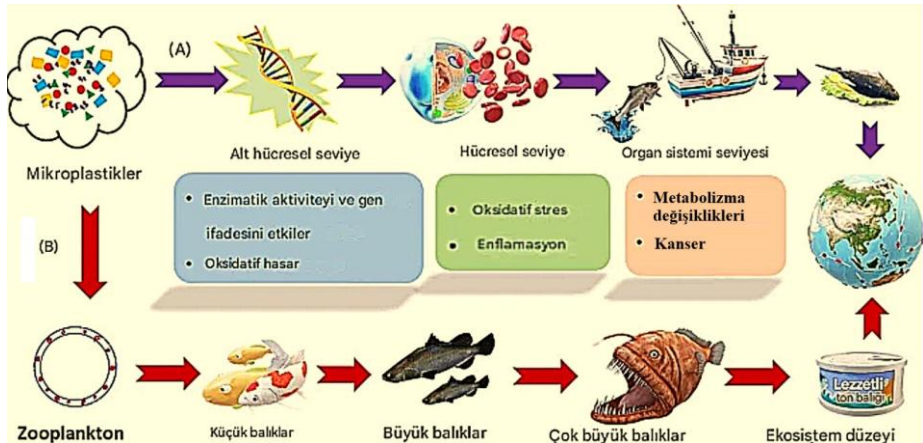
### 3.5. Çevresel Kompartmanlar Arasındaki Değişimler

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 nehirlere 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 Rekreasyonel Faaliyetler**

Plajlarda bırakılan tek kullanımlık plastikler (şişe, torba, pipet, bardak), plastik şişe 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 dögüsel 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-elektrofiltrasyon, 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/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 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).

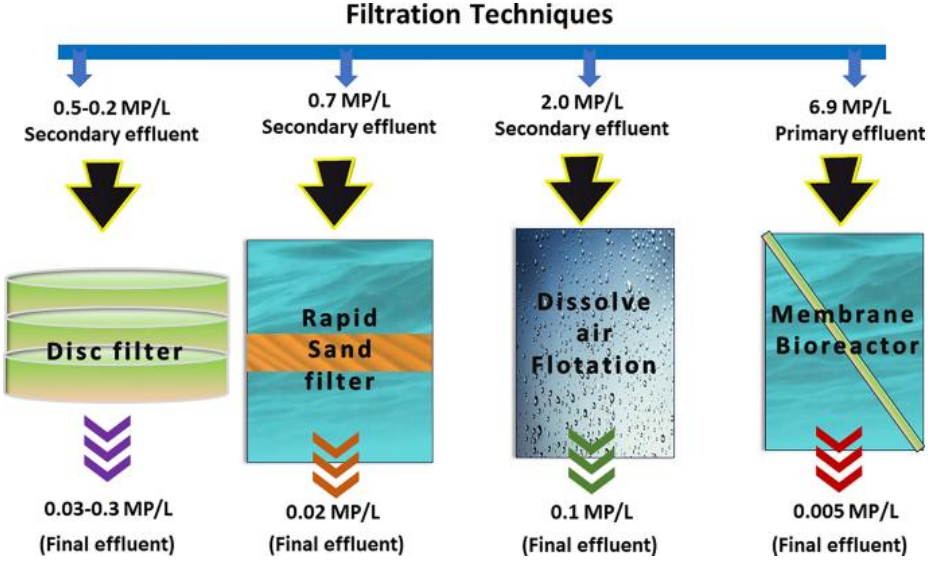
### 5.4. AAT'lerdeki MP Bolluğu ve Giderim Verimliliği

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  $3.14 \times 10^4$  parçacık/L (Daegu, Kore) arasında değiştiği, ortalamanın  $1.90 \times 10^3$  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 ( $8.70 \times 10^8$  parçacık/gün), en düşük değer İspanya'nın Kartagena kentinde elde edilmiştir ( $6.70 \times 10^6$  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  $1550 \pm 50$  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 kaynağını** oluşturmaktadır (Ren ve ark., 2023). Arıtılmış atık suyun deşarjı ve özellikle arıtma çamurunun tarımda kullanımını, 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 **2.10×10<sup>5</sup> ton'a** ulaştığı tahmin edilmektedir (Zhang ve Liu, 2018). Topraktaki MP'ler, doğal toprak özelliklerini (yapı, geçirgenlik, mikrobiyal aktivite) değiştirebilir. Daha

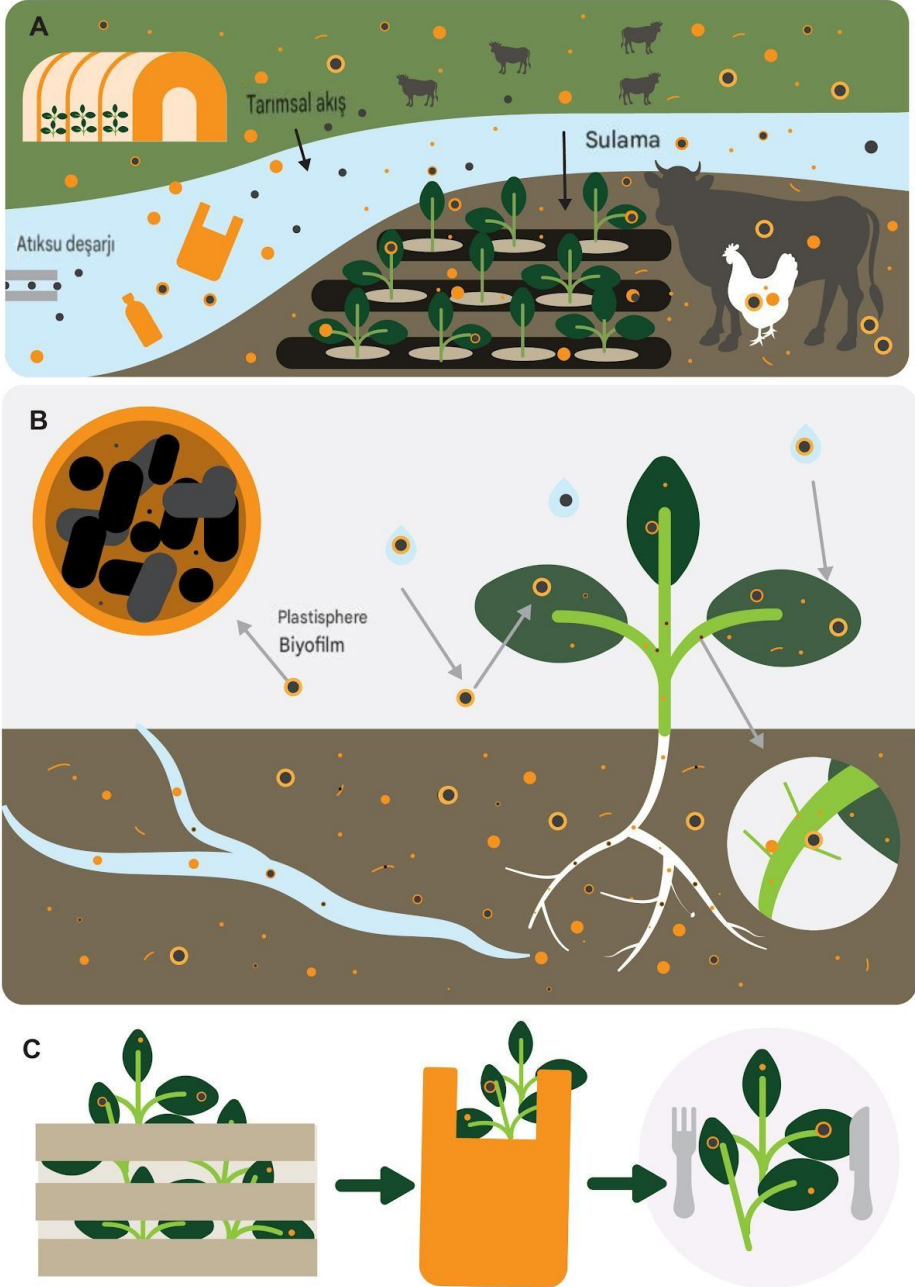
da önemlisi, çevredeki plastikler (ve mikroplastikler), hücre dışı polimerik maddelerin plastik yüzeye mikrobiyal salgılanmasıyla oluşan **mikrobiyal biyofilmler** tarafından hızla kolonize edilir ve çeşitli mikrobiyal toplulukları destekleyebilen yeni bir hidrofobik ekolojik yaşam alanı (plastisfer)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

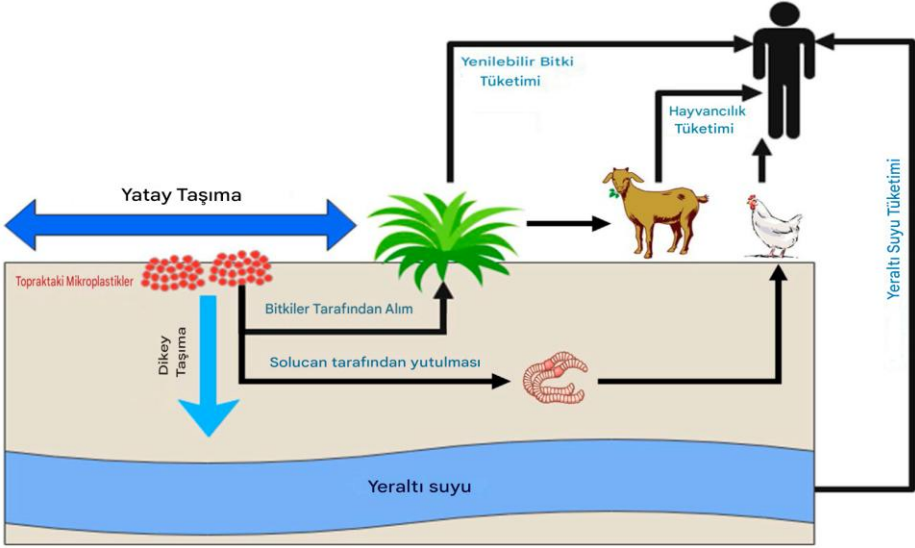
Arıtılmış ancak MP içeren atık su ile yapılan sulama, MP'lerin tarım arazilerine taşınmasının bir diğer önemli yoludur (Quilliam ve ark., 2023). Şekil 8'de gösterildiği üzere plastikler ve mikroplastikler, kirlenmiş sulama suyu, hayvan dışkısı ve organik gübrelerden veya malç filmi veya poli tünel gibi 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 gübrelere veya malç filmi veya poli tüneller 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 dışkı, 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 kirletebilir (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 yapılıdır. Reçineyi bir ürüne dönüştürürken performansı ve görünümünü 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  $1.00 \times 10^3$  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  $22.7 \times 10^3$  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 çökeltir, 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 (Goepfert 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). Kıyısal 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 mikroplastığe 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

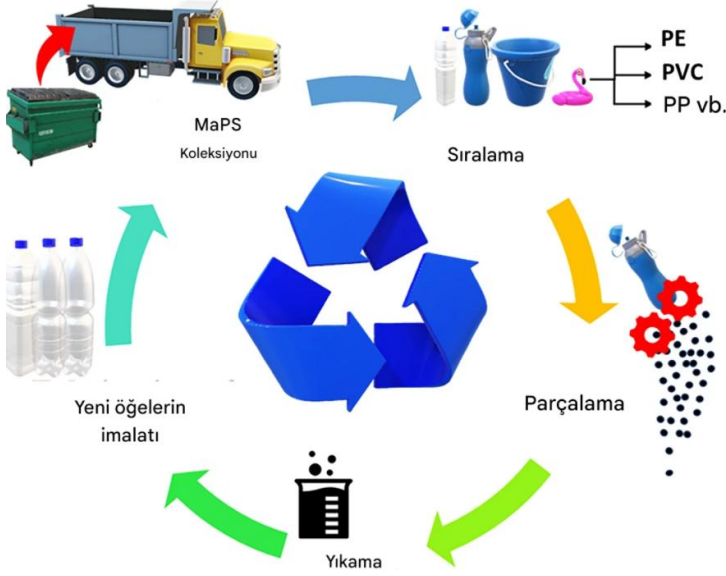
yetersizliği kabul edilmeli ve bu tesisler için yükseltme planları yapılmalıdır.

- **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 bildirişinden özetlenmiştir).

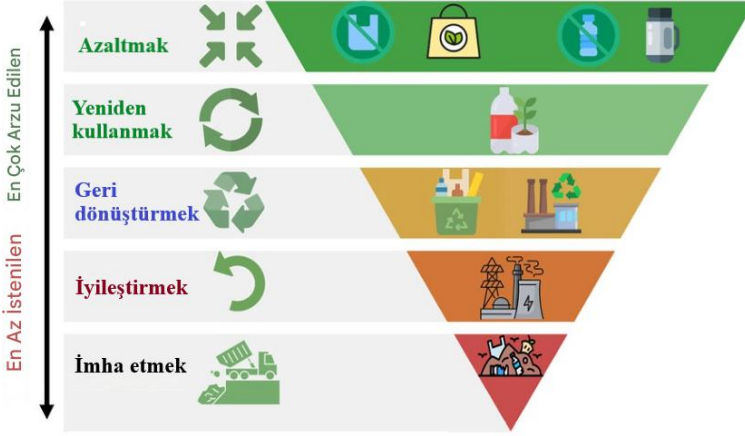
Üreticiler	Tüketiciler	Politika Yapıcılar ve Uygulayıcılar	Araştırmacılar ve Mühendisler
MP içeren ürünler kullanmaktan kaçının	Tek kullanımlık plastiklerden kaçının	Tek kullanımlık plastik üretimini kısıtlayan/ yasaklayan düzenlemeler yapın	MP analizi için standart yöntemler geliştirin
Tek kullanımlık 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,	Çamaşır makinesi mikrofiber filtresi kullanın	Kaynakta ayrı toplamayı teşvik edici (vergi indirimi vb.)	Plastikleri biyobozundurabilecek mikroorganizmaları

<b>katkı maddelerini sınırlandırın</b>		sistemler geliştirin	inceleyin
<b>Üretimde geri dönüştürülmüş plastik kullanımını artırın</b>	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
<b>Üretim sonrası atıkları etkin yönetin</b>	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 kullanılmalı, 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 kullanılmalı, 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 oluşturmalı, 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).

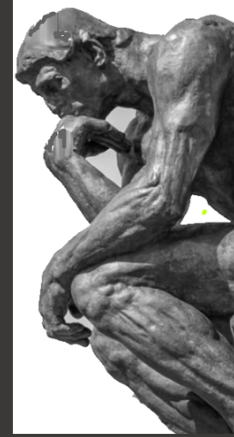
## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mikro ve nanoplastik kirliliği, çok boyutlu bir küresel çevre ve halk sağlığı krizidir. Sorunun üstesinden gelmek için, kaynaktan 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 taşı 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. Yükü, masum diğer canlıların günahları olan "Nuh'un Gemisi" ise; son yolculuğu için yelkenlerini kasırgalarla doldurup, dümenini "altınca 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.
- 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.
- 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.
- 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, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174–182.
- 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.

- 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.
- 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](https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- El-Jourbagy, J., Roessing, M., Hair, H., & Banks, C. (2021). Creating an Industrial Regulatory Framework to Reduce Plastics. *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., Borrorro, 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.
- 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., ....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, P.U., Oukia S.K. and Tom Bond, T. (2020). Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(10), 2664-2675
- 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.
- 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., .....Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8(1), 4666.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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](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.
- 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., Wilcox, C., Vince, J., & Hardesty, B. D. (2021). Challenges and misperceptions around global fishing gear loss estimates. *Marine Policy*, 129, 104522.
- 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.
- 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. *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](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.
- Urli, S., Corte Pause, F., Crociati, M., Baufeld, A., Monaci, M., & Stradaioli, 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.
- Wang, X., Liu, L., Zheng, H., Wang, M., Fu, Y., Luo, X., & et al. (2020).. *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.
- 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 Contaminants*, 11, 4, , 100549
- Weithmann, N., et al. (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.