

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

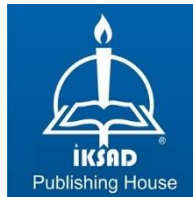
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR

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

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-481-2

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
BÖLÜM 1 MİKROPLASTİKLERİN DENİZ EKOSİSTEMLERİ VE ORGANİZMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN Prof. Dr. Arda YILDIRIM.....	1
BÖLÜM 2 SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KAYNAKLARI Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER	62
BÖLÜM 3 SU ÜRÜNLERİ YETİŞTİRİCİLİĞİNDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: ETKİLERİ VE DOĞA TEMELLİ AZALTIM STRATEJİLERİ Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER	90
BÖLÜM 4 ATIKSULARDAKİ MİKROPLASTİKLERİN TARIM VE HAYVANCILIK EKOSİSTEMLERİ İLE ETKİLEŞİMİ VE YÖNETİMİ Dr. Saliha DİRİM BUHAN Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN Prof. Dr. Arda YILDIRIM.....	117
BÖLÜM 5 PLASTİKLEŞEN TOPRAKLAR: MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİNİN TOPRAĞIN KİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ Dr. Cabir Çağrı GENÇE Doç. Dr. Halil ERDEM.....	172
BÖLÜM 6 GÜNÜMÜZ VE GELECEKTE TOPRAKLARIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE MİKROPLASTİKLERİN ETKİSİ Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR.....	196
BÖLÜM 7 TOPRAKTA MİKROPLASTİKLERİ TANIMLAMA KRİTERLERİ Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR.....	214
BÖLÜM 8 MİKROPLASTİKLERİN AĞIR METALLERLE ETKİLEŞİMİ: TOPRAK, BİTKİ VE İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ÇEVRESEL BİR TEHDİT Doç. Dr. Halil ERDEM Dr. Cabir Çağrı GENÇE	244
BÖLÜM 9 TARIM VE ÇEVRE ARASINDA GÖRÜNMEZ TEHDİTLER: MİKROPLASTİKLER İLE PESTİSİTLER Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER.....	271

BÖLÜM 10

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 283

BÖLÜM 11

HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 321

BÖLÜM 12

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

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI 359

BÖLÜM 13

ÇEVRESEL KOMPONENTLER, BİTKİSEL VE HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Prof. Dr. Yakup BUDAK

Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ

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

BÖLÜM 14

PLASTİK VE MİKROPLASTİK EKONOMİSİ: TARIM, ÇEVRE VE TÜRKİYE PAZARI

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL 421

ÖNSÖZ

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

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

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

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

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

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

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER¹

Doç. Dr. Halil ERDEM²

Prof. Dr. Arda YILDIRIM³

Dr. Cabir Çağrı GENÇE⁴

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

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

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

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

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



BÖLÜM 1

MİKROPLASTİKLERİN DENİZ EKOSİSTEMLERİ VE ORGANİZMALARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Dr.Öğr. Üyesi Ekrem Buhan¹

Prof. Dr. Arda Yıldırım²

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

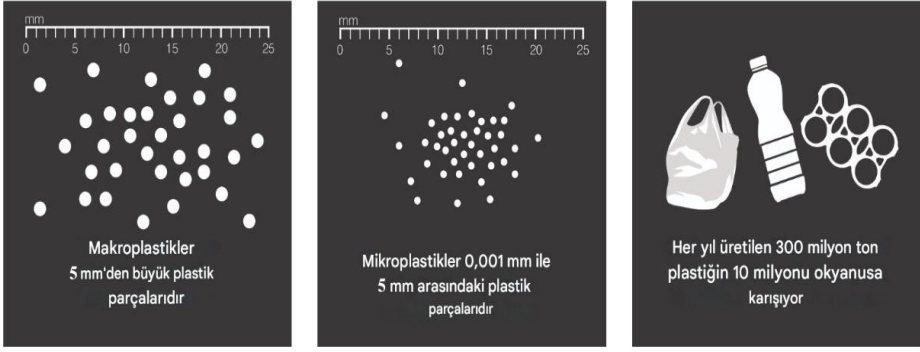
¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Hayvan Yetiştirme Anabilim Dalı, Tokat/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-4338-1758, e-posta: ekrem.buhan@gop.edu.tr

² 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

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

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



Şekil 1. Mikroplastik büyüklüğünün ölçülendirilmesi (NOC-National Oceanography Centre, 2025).

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

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

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

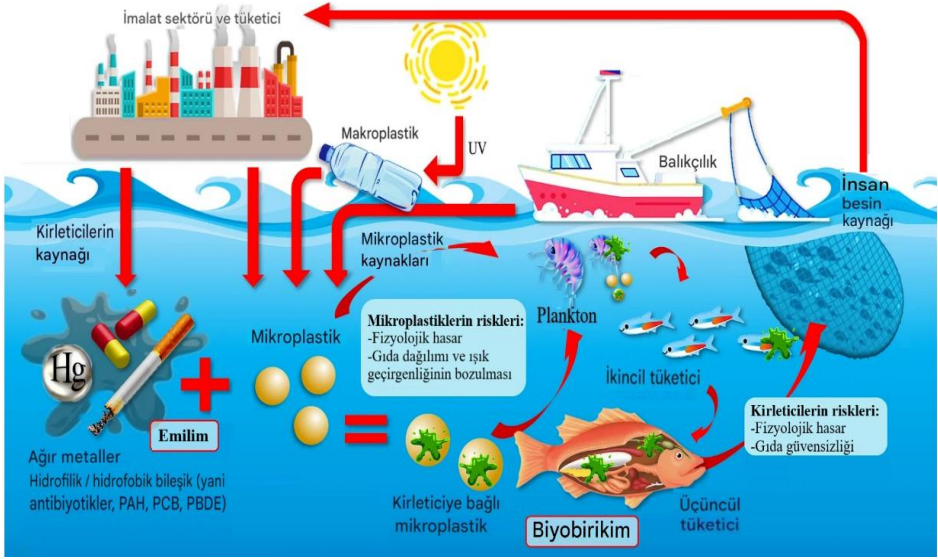
mevcut bilimsel literatürü sentezleyerek bu küresel soruna ilişkin kapsamlı bir bilgi sunmayı ve etkili politika ile yönetim kararlarının alınmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

1. Mikroplastiklerin Denizel Ekosistemlere Etkileri

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

1.1. Ekolojik hiyerarşi üzerindeki etkileri

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



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

1.1.1. Birey düzeyindeki etkiler

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

1.1.2. Popülasyon düzeyindeki etkiler

Bireysel uygunluktaki azalma, popülasyon parametrelerine yansır. Deneysel ve modelleme çalışmaları, kronik MP maruziyetinin popülasyon büyüklüğünde azalmaya, yaş ve boy dağılımında değişimlere ve nihayetinde

popülasyonun büyüme oranında düşüşe yol açabileceğini öngörmektedir (Berlino ve ark., 2023). Özellikle larval ve genç bireylerin daha hassas olması popülasyonun yenilenme kapasitesini ciddi şekilde zayıflatılabilir (tablo 1). Bu durum, ticari öneme sahip balık ve kabuklu popülasyonlarında sürdürülebilir avcılık sınırlarını tehdit edebilir (Amelia ve ark.,2021).

1.1.3. Topluluk (komünite) düzeyindeki etkiler

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

1.1.4. Ekosistem düzeyindeki etkiler

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

Tablo 1. Mikroplastiklerin Ekolojik Hiyerarşi ve Faktörlere Etkileri

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

1.2 Mikroplastiklerin denizel ekosistemlerdeki dağılımı ve organizmalarla karşılaşma yolları

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

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

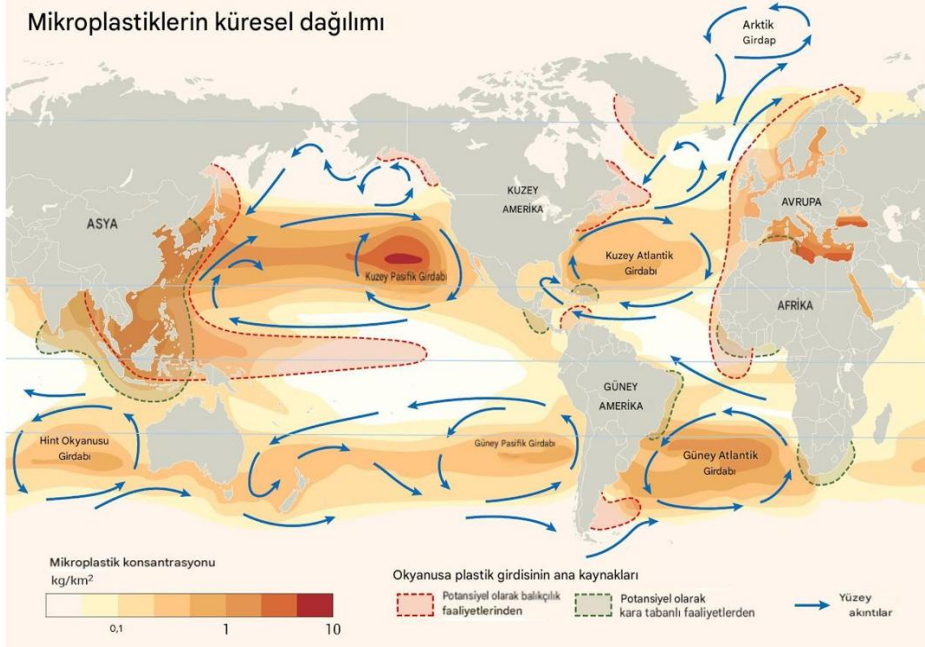
Tablo 2. Dünyanın farklı bölgelerinde MP bolluğu örnekleri (Amelia ve ark.,2021).

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

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

Okyanus akıntıları ve girdapların etkisi: Okyanus akıntıları ve girdaplar, mikroplastiklerin birikimi için önemli alanlar oluşturmaktadır (Şekil 3). Örneğin, Kuzey Pasifik Subtropikal Girdabı'nda 32,76 parça/m³'lük maksimum konsantrasyon kaydedilmiştir (Goldstein ve ark., 2012). Benzer şekilde, endüstriyel kıyı bölgeleri ve liman alanları da mikroplastik sıcak noktaları olarak tanımlanmaktadır (Noren ve Naustvoll, 2010). Büyük Pasifik

Çöp Girdabı gibi alanlarda, plastiklerin büyük çoğunluğunun balıkçılık kaynaklı olduğu bildirilmiştir (Lebreton ve ark., 2018).



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

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

Tablo 3. Mikroplastiklerin Organizmalarla Temas Yolları ve Belirleyici Faktörler

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

1.2. Ekolojik Faktörlere Göre Değişen Tepkiler

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

1.2.1. Trofik Seviye

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

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

1.2.2. Yaşam evresi ve gelişim aşaması:

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

1.2.3. Yaşam alanı ve beslenme stratejisi

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

2. MİKROPLASTİKLERİN DENİZEL ORGANİZMA GRUPLARINA ETKİLERİ

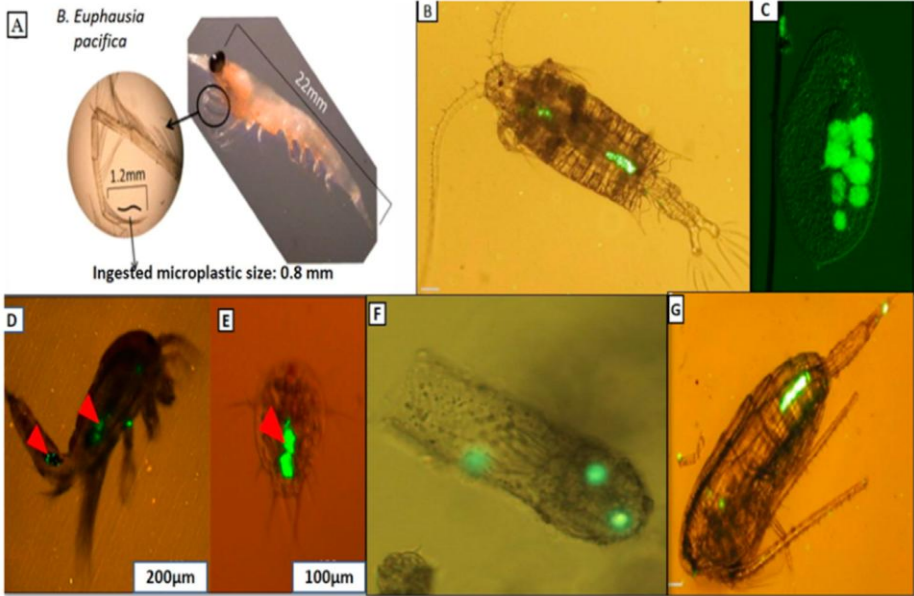
Mikroplastikler, denizel biyotanın hemen hemen tüm grupları üzerinde, grupların biyolojik ve ekolojik özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik gösteren olumsuz etkilere neden olmaktadır.

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

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

etki, tek başına olan etkiden daha fazla) toksik etkiler gösterebilmektedir (Su ve ark., 2022).

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



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

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

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

2.2. Omurgasızlar

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

2.2.1. Bentik Omurgasızlar

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

Tablo 5. Mikroplastiklerin Bentik Omurgasızlar Üzerindeki Etkileri

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

2.2.2. Mercanlar

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

Tablo 6. Mikroplastiklerin Denizel Omurgasızlara Etkileri

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

Tablo 6 devamı. Mikroplastiklerin Denizel Omurgasızlara Etkileri

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

2.2.3. Kabuklular (Karides, Yengeç, Istakoz)

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

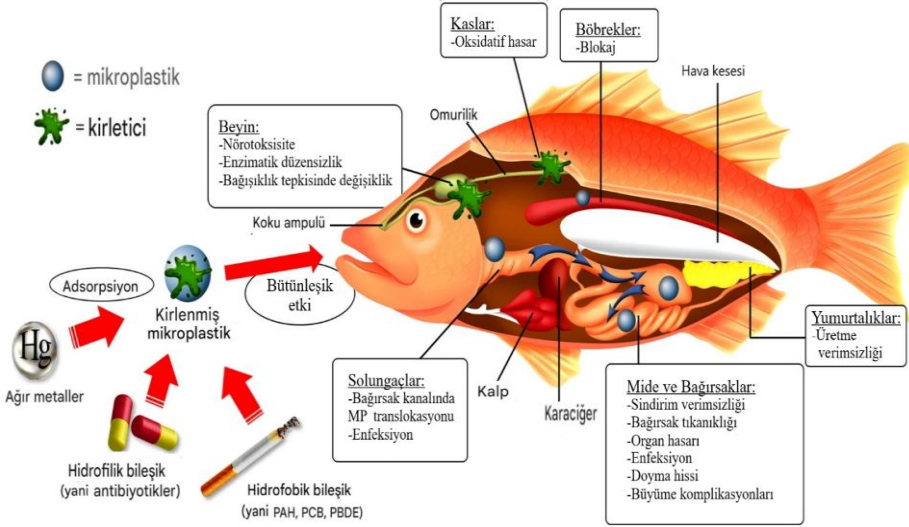
2.2.4. Diğer omurgasızlar (Amfipodlar, Deniz Yıldızı vb.)

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

2.3. Balıklar

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

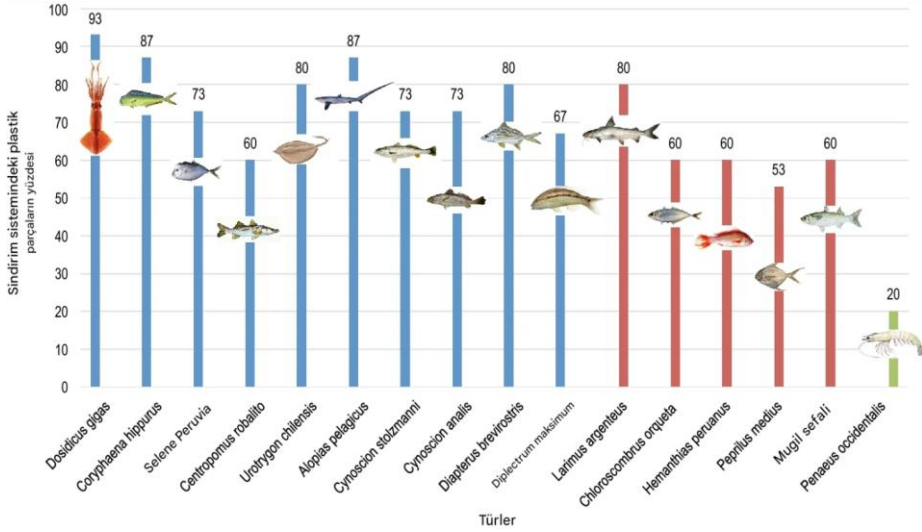
Fiziksel ve fizyolojik etkiler: Yutulan MP'ler, bağırsak tıkanıklığına, mukozal yaralanmalara, tokluk hissine ve besin emiliminin azalmasına neden olarak büyüme geriliğine ve vücut kondisyonunun kötüleşmesine yol açar (Bhuyan, 2022). Solungaçlara yapışan lifsel MP'ler, solunum verimliliğini düşürebilir.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



Şekil 5. MP ve kirlenicilerin balıklar üzerindeki etkileri (Amelia ve ark.,2021).

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

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



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

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

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

Vektör etkisi ve insan sağlığı riski: Balıklar, MP'ler ve bunlara bağlı kirleticiler (ağır metaller, KOK'lar) için bir vektör görevi görür (Tablo 8). Tüketilen balıklar yoluyla bu kirleticiler insan besin zincirine girebilir (Mahamud ve ark., 2022). Balık kas dokusunda MP varlığı doğrudan insan maruziyeti için potansiyel bir kaynak oluşturmaktadır (Haave ve ark., 2021).

Tablo 8. Mikroplastiklerin balıklar üzerindeki etkileri

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

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

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

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

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

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

Tablo 9. Mikroplastiklerin üst trofik seviyeler üzerindeki etkileri

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

2.5. Deniz Çayırları ve Diğer Mavi Karbon Ekosistemleri

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

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

3. MİKROPLASTİKLERİN DENİZ BİYOTASI ÜZERİNE BİYOLOJİK ETKİLERİ

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

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

ark., 2021). Çeşitli balık türlerinin solungaçlarında lif, parça ve pelet formunda MP'ler bulunmuştur. Lifler, fiziksel özellikleri nedeniyle solungaç filamentlerine kolayca yapışmaktadır (Zhang ve ark., 2021).

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

Tablo 10. Denizel faunaya mikroplastiklerin zararlı etkileri

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

Tablo 10 devamı. Denizel faunaya mikroplastiklerin zararlı etkileri

Etkiler	Mekanizmalar	Etkilenen deniz hayvanları ve Kaynakçası
Bağışıklık Baskılanması: Azalmış bağışıklık yanıtlarına yol açan oksidatif stres	Mikroplastik kaynaklı stres, enfeksiyonlarla savaşma yeteneğini düşürerek hastalıklara yatkınlığı artırır	Kabuklu: Beyaz karides (<i>Litopenaeus vannamei</i>) (Niemcharoen ve ark., 2022)
Büyüme İnhibisyonu: Azalmış büyüme ve gelişimsel gecikmeler	Büyüme için kullanılacak enerji, MP'lerin neden olduğu stresle başa çıkmak için kullanılır	Kabuklu: Deniz kopepodu (<i>Tigriopus japonicus</i>) (Kim ve ark., 2022), Derisidikenli: Deniz kestanesi (<i>Paracentrotus lividus</i>) (Bertucci & Bellas, 2021), Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Wang ve ark., 2023), Balık: Deniz medakası (<i>Oryzias melastigma</i>) (Li ve ark., 2020)
Ölüm: Yutma, açlık veya toksisite nedeniyle artan ölüm oranı	Şiddetli tıkanıklıklar, toksik yüklenme veya besin yetersizlikleri ölüme yol açar	Kabuklu: Deniz kopepodu (<i>Acartia tonsa</i>) (Shore ve ark., 2021), Balık: Salmonid balıklar (Seeley ve ark., 2023), Deniz Kaplumbağası: Deniz kaplumbağaları (Wilcox ve ark., 2018), Deniz Kuşu: Albatros (<i>Diomedea</i>) (Roman ve ark., 2020) Su Memelisi: Afalina (Roman ve ark., 2021)
Genotoksosite: DNA hasarı ve genetik mutasyonlar	MP'lerin veya ilişkili toksinlerin neden olduğu oksidatif stres, DNA parçalanmasına ve mutasyonlara yol açar	Yumuşakça: Akdeniz midyesi (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) (Romdhani ve ark., 2022) Derisidikenli: Kum doları (<i>Scaphechinus mirabilis</i>) (Mazur ve ark., 2021), Deniz kestanesi (<i>Paracentrotus lividus</i>) (Mottola ve ark., 2024) Balık: Deniz balıkları (Wootton ve ark., 2021),
Endokrin Bozulma: Üreme ve büyüme etkileyen hormonal dengesizlikler	Bisfenol A (BPA) gibi katkı maddeleri hormonları taklit ederek sinyal yollarını bozar	Yumuşakça: Kan istiridyesi (<i>Tegillarca granosa</i>) (Tang ve ark., 2020), Derisidikenli: Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Yuan ve ark., 2023) Balık: Atlantik morinası (<i>Gadus morhua</i>) (Goksoyr ve ark., 2024), Mercan resifi balığı (Gonzalez ve ark., 2021)
Patojen Taşıyıcılığı: <i>Vibrio</i> spp. gibi patojenler için vektör	MP'ler zararlı bakteriler için yüzer taşıyıcı görevi görerek enfeksiyon riskini artırır	Kabuklu: Beyaz karides (<i>Litopenaeus vannamei</i>) (Cholewiński ve ark., 2022) Yumuşakça: Deniz tarağı (<i>Ruditapes</i> spp.) (Cholewiński ve ark., 2022; Bowley ve ark., 2021; Stenger ve ark., 2021) Derisidikenli: Deniz hıyarı (<i>Apostichopus japonicus</i>) (Cholewiński ve ark., 2022) Balık: Kırmızı mercan (<i>Pagrus major</i>) (Cholewiński ve ark., 2022)
İstilacı Türler: İstilacı türlerin yayılımı	MP'ler istilacı türler için sal görevi görerek onların yeni alanları kolonize etmesini sağlar	Mercan: Güneş mercanı (<i>Tubastraea</i> spp.) (Soares ve ark., 2023), Yumuşakça: Charu midyesi (<i>Mytella strigata</i>) (Kannan ve ark., 2023), Salyangoz (<i>Pirenella cingulata</i>) (Kannan ve ark., 2023), Tulumlu: 'Deniz kusmuğu' (<i>Didemnum vexillum</i>) (Gonzalez-Ortegon ve ark., 2024)
Trofik Transfer: MP'lerin ve ilişkili toksinlerin besin ağları boyunca transferi	Yırtıcılar, MP içeren avları tüketerek etkilerini trofik seviyeler boyunca büyütür	Zooplankton: Karides (<i>Palaemon elegans</i> ve <i>Praunus flexuosus</i>) (Kangas ve ark., 2023), Su Memelisi: Benekli fok (<i>Phoca largha</i>) (Wang ve ark., 2021), Katil balinalar (Harlacher ve ark., 2023)

4. GENEL ETKİ MEKANİZMALARI VE TOKSİSİTE

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

4.1. Fiziksel (Mekanik) Etkiler:

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

4.2. Kimyasal Etkiler: "Truva Atı" Paradigması

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

toksikolojik sonuçlara yol açabilmektedir. Bu, MP tehdidinin en kritik ve karmaşık yönüdür. İki ana bileşeni vardır;

- **İçsel (leachate) toksisite:** Plastik polimerlere esneklik, renk, alev geciktirici gibi özellikler kazandırmak için eklenen katkı maddeleri (ftalatlar, bisfenol A (BPA), bromlu alev geciktiriciler), plastikten sızabilir ve endokrin bozucu, nörotoksik veya kanserojen etkiler gösterebilir (Zimmermann ve ark., 2021).
- **Vektör (taşıyıcı) etkisi:** MP'lerin yüksek yüzey alan/hacim oranı ve hidrofobik yapısı, su kolonundaki diğer kirleticileri (ağır metaller, pestisitler, poliklorlu bifeniller (PCB'ler), hidrokarbonlar) yüzeylerinde adsorbe etmelerine (yoğunlaştırmalarına) olanak tanır (Teuten ve ark., 2009). Organizma MP'yi yuttuğunda, bu kirleticiler sindirim ortamında desorbe olarak (çözünerek) organizma dokularına geçebilir ve toksisiteye neden olabilir. Bu süreç, kalıcı organik kirleticilerin besin zincirinde taşınmasını ve üst trofik seviyelerde biyomagnifikasyonunu kolaylaştıran kritik bir yoldur (Koelmans ve ark., 2016).

Tablo 11. Mikroplastik toksisite mekanizmaları ve "Truva Atı" etkisi

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



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

4.2.1. Truva Atı kavramının gelişimi ve temel mekanizmaları

Mikroplastiklerin kirletici taşıyıcısı rolüne dair farkındalık, plastiklerin çevresel davranışına ilişkin erken gözlemlerle başlamıştır. Mato ve ark., (2001), denizel ortamdaki plastik pellet’lerin (nurdle) poliklorlu

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

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

Organizma tarafından yutulduğunda, sindirim sistemi ortamı (sıcaklık, pH, safra tuzları ve sindirim enzimlerinin varlığı) MP yüzeyinde adsorbe olmuş kirleticilerin desorpsiyonu için ideal koşullar sağlayabilir (Bakir ve ark., 2014). Bu "hızlı salım" olgusu, kirleticinin biyoyararlanımını (organizma tarafından alınabilirliği) önemli ölçüde artırarak, aynı kirleticinin sudan doğrudan alımına kıyasla daha yüksek doku konsantrasyonlarına ve daha şiddetli toksik etkilere yol açabilir (Avio ve ark., 2015). İşte bu noktada,

taşıyıcı MP “Truva atı” rolünü oynar (Şekil 7) ve içindeki tehlikeli yükü organizmanın savunma hatları içerisine sokar (Tablo 12 ve 14).

Tablo 12 . Mikroplastikler tarafından taşınabilen kirletici türleri ve etkileşimi

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

Tablo 13. "Truva Atı Etkisi" kavramının kronolojisi

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

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

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

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

MP maruziyetinden daha fazla büyüme inhibisyonu ve fotosentetik verimlilik kaybına yol açtığını göstermektedir (Su ve ark., 2022).

Tablo 15. Denizel organizmalarda gözlemlenen mikroplastik-kirletici birleşik etkisi

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

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

4.2.3. Trofik transfer ve biyomagnifikasyon potansiyeli

Truva atı etkisinin en kaygı verici yönlerinden biri, besin ağı boyunca taşınma ve biyomagnifikasyon (besin zincirinde yükseldikçe konsantrasyonun artması) potansiyelidir. MP'ler, zooplankton gibi düşük trofik seviyeli organizmalar tarafından kolayca yutulur (Botterell ve ark., 2019). Bu organizmalar daha sonra balık, kuş veya deniz memelileri gibi yırtıcılar tarafından tüketildiğinde, MP'ler ve onlarla ilişkili kirleticiler bir üst trofik seviyeye transfer edilebilir (Farrell ve Nelson, 2013). Bu süreç, “**vektörün kendisinin trofik transferi**” olarak tanımlanabilir.

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

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

4.2.4. Özel bir durum: Antifouling boya kökenli mikroplastikler

Geleneksel plastik atıklardan kaynaklanan MP'lerin yanı sıra, özel bir Truva atı tehlikesi antifouling (yüzey kirleşmesini önleyici) boyaların aşınması sonucu oluşan MP'lerden gelmektedir (Tablo 16). Bu partiküller, yalnızca fiziksel varlıklarıyla değil, içerdikleri yüksek konsantrasyondaki biyosidal ajanlar (örneğin, bakır oksit, çinko piriton, organotin kalıntıları) nedeniyle de risk oluşturur (Turner, 2020). Romeo ve ark., (2015), Malta'daki bir liman sedimanında yüksek düzeyde MP kirliliği tespit etmiş ve bu

MP'lerin aynı zamanda Pb, Cu, Zn ve organotin bileşikleriyle yoğun şekilde kontamine olduğunu bulmuştur. Bu boyalardan kaynaklanan MP'ler, doğrudan su kolonuna veya sedimanta karışarak, içerdikleri toksik metalleri zamanla salabilir (leaching) veya sedimentle beslenen organizmalar tarafından doğrudan yutulabilir (Ytreberg ve ark., 2021). Bu durumda, MP partikülü hem kirleticinin kendisi (boya matrisi) hem de yüksek konsantrasyonda kirletici taşıyan bir “Süper Truva Atı” işlevi görür. Bu tür MP'lerin etkileri, yalnızca partikül sayısına değil, aynı zamanda taşıdıkları spesifik toksik yüke de bağlıdır (Turner,2021).

Tablo 16. Boya Kaynaklı Mikroplastiklerle İlişkili Başlıca Toksik Bileşenler

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

4.2.5. “Truva Atı” etkisinin denizel organizmalar ve ekosistemler üzerindeki sonuçları

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

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

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

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

Popülasyon ve ekosistem seviyesindeki etkiler: Bireysel organizmalardaki bu olumsuz etkiler, zamanla popülasyon dinamiğini (büyüme, ölüm oranları, üreme başarısı) etkileyebilir. Özellikle hassas türlerde veya kritik yaşam evrelerinde (larval dönem) görülen etkiler, besin ağı yapısını bozabilir. Örneğin, fitoplankton üzerindeki kombine toksisite, birincil üretimi azaltarak tüm ekosistemin enerji akışını etkileyebilir. Ayrıca,

sedimanter ortamda biriken ve kirletici yüklü MP'ler, sedimentle beslenen organizmalar (bentik faunanın önemli bir kısmı) için sürekli bir kirletici kaynağı haline gelerek bentik-pelajik bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir (O'Briain ve ark., 2020).

5 . SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu kapsamlı derleme, mikroplastik kirliliğinin denizel ekosistemler için çok boyutlu, derinlemesine nüfuz eden ve giderek büyüyen bir küresel tehdit olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Etkiler, bireysel organizmaların fizyolojisi, davranışı ve üreme başarısından başlayarak, popülasyonların sürdürülebilirliğini, toplulukların yapısını ve nihayetinde ekosistemlerin temel işlevlerini ve insanlığa sağladığı hayati ekosistem hizmetleri tehlikeye atmaktadır. **Ana Bulguların Sentezi;**

- **Ekolojik kaskad/tepkime etkisi:** Setälä ve ark.,(2014) ve Galloway ve ark., (2017) gibi etkin araştırmalar; MP etkilerin, birey → popülasyon → topluluk → ekosistem hiyerarşisinde üst seviyeye doğru yayılan bir kaskad etkisi oluşturduğunu ve alt seviyelerdeki bozulmalar, üst seviyelerde beklenenden daha büyük ve karmaşık sonuçlara yol açabildiğini belirtmektedir.
- **Trofik magnifikasyon riski:** Yüksek trofik seviyelerdeki organizmaların daha şiddetli etkilenme eğilimi, MP'lerin ve özellikle taşıdıkları kirleticilerin besin zincirinde birikme (biyomagnifikasyon) potansiyelini işaret etmektedir. Bu durum, deniz memelileri, büyük balıklar ve insanlar gibi zincirin en üstündekiler için özel bir risk oluşturur (Rochman ve ark., 2013; Wright ve ark.. 2013).
- **Fonksiyonel grupların hassasiyeti:** Filtre ederek beslenenler (çift kabuklular), sedimentle beslenenler ve birincil üreticiler gibi belirli fonksiyonel gruplar, yüksek maruziyet oranları nedeniyle öncelikli

risk altındadır. Bu grupların ekosistem işlevlerindeki (su filtrasyonu, besin döngüsü, birincil üretim) rolleri göz önüne alındığında, MP kirliliğinin ekosistem işleyişi üzerindeki dolaylı etkileri doğrudan etkilerden daha yıkıcı olabilir (Browne ve ark., 2011).

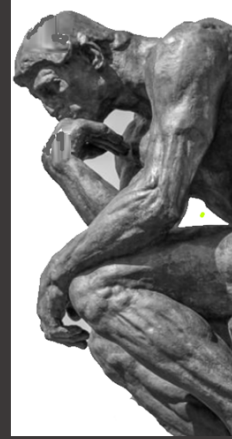
- **İkili Tehdit: “fiziksel + kimyasal”:** MP'ler sadece fiziksel bir engel olarak değil, aynı zamanda toksik kimyasallar için bir "**Truva Atı**" işlevi görerek etki eder. Bu ikili mekanizma, risk değerlendirmelerini karmaşıktırmakta ve geleneksel tek kirletici yaklaşımlarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu durum mikroplastik kirliliğini daha da tehlikeli ve büyüklüğünü öngörülemez kılmaktadır (Rochman ve ark., 2013; Wright ve ark., 2013; Galloway ve ark., 2017).

Mikroplastik kirliliği, denizel biyoçeşitliliğin ve ekosistem sağlığının sürdürülebilirliği önünde ciddi bir engeldir. Sorunun çözümü, ancak bilimsel araştırmalar, yenilikçi teknolojiler, güçlü ve uygulanabilir politikalar ile toplumsal farkındalık ve davranış değişikliğini içeren bütünleşik ve küresel ölçekte bir yaklaşımla mümkün olacaktır. Bu derlemenin bulguları, denizlerimizi ve biyoçeşitliliğini koruma çabaların aciliyetini ve önemini bir kez daha vurgulamaktadır. Denizlerimizin sayısız ekosistem hizmetleri ve doğal sermayesi tam olarak tüketilmeden; bilimsel araştırmalar yoğunlaştırılmalı, etkili izleme programları oluşturulmalı bunlarla birlikte eş zamanlı mikroplastik emisyonlarını kaynağında azaltmaya yönelik politikalara ve uygulamalara acilen gidilmesi gerekmektedir. Özellikle **4R** kuralı (tek kullanımlık plastikleri **reddet/ ¹Refuse**, kullanımı **azalt/ ²Reduce**, **tekrar kullan/ ³Reuse**, **geri dönüştür/ ⁴Recycle**) tüm kurumlar ve kamuoyunca rutin uygulamalara dönüştürülmelidir. Birçok uluslararası (UNEP, UNESCO, FAO, OECD, US EPA, EC, G20, WB, WWF, GP, ...) ve ulusal (ilgili Bakanlıklar, TEMA, TURMAPA, ÇEVKO, ...) kurum ve kuruluşlar 4R'nin yaygınlaşması

için çalışmalar yaparken; pratikte önemli gelişmeler ne yazıkki hayatiyet bulamamaktadır.

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

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



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

KAYNAKÇA

- Abreu, A., & Pedrotti, M. I. (2019). Microplastics in the oceans: The solutions lie on land. *Field Actions Science Reports*, (Özel Sayı 19), 62–67.
- Alfaro-Núñez, A., Astorga, D., Cáceres-Farías, L., Bastidas, L., Villegas, C. S., Mora, J. R., ... & Olea, A. (2021). Microplastic pollution in seawater and marine organisms across the Tropical Eastern Pacific and Galápagos. *Scientific Reports*, 11(1), 6424. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85939-3>
- Amelia, T. S. M., Khalik, W. M. A. W. M., Ong, M. C., & Shao, Y. Y. (2021). Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4>
- Anastasopoulou, A., & Fortibuoni, T. (2019). Impact of plastic pollution on marine life in the Mediterranean Sea. In F. Stock, G. Reifferscheid, N. Brennholt, & E. Kostianaia (Eds.), *Plastics in the aquatic environment-part I: current status and challenges* (pp. 135–196). Springer.
- Andrady, A. L. (2015). Persistence of plastic litter in the oceans. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter* (pp. 57-72). Springer.
- Arnold, S. J. (1983). Morphology, performance and fitness. *American Zoologist*, 23(2), 347–361.
- Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Avio, C. G., Gorbi, S., & Regoli, F. (2015). Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research*, 111, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

- Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2014). Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.01.004>
- Barboza, L. G. A., Lopes, C., Oliveira, P., Bessa, F., Otero, V., Henriques, B., Raimundo, J., Caetano, M., Vale, C., & Guilhermino, L. (2020). Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Science of The Total Environment*, 717, 134625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134625>
- Barrett, J., Chase, Z., Zhang, J., Holl, M. M. B., Willis, K., Williams, A., Hardesty, B. D., & Wilcox, C. (2020). Microplastic pollution in deep-sea sediments from the Great Australian Bight. *Frontiers in Marine Science*, 7, 576170. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576170>
- Barrick, A., Champeau, O., Chatel, A., Manier, N., Northcott, G., & Tremblay, L. A. (2021). Plastic additives: Challenges in ecotox hazard assessment. *PeerJ*, 9, e11300.
- Beiras, R., & Tato, T. (2019). Microplastics do not increase toxicity of a hydrophobic organic chemical to marine plankton. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 58–62. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.029>
- Berlino, M., Mangano, M. C., De Vittor, C., & Sarà, G. (2021). Effects of microplastics on the functional traits of aquatic benthic organisms: A global-scale meta-analysis. *Environmental Pollution*, 285, 117174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117174>
- Berlino, M., Sarà, G., & Mangano, M. C. (2023). Functional Trait-Based Evidence of Microplastic Effects on Aquatic Species. *Biology*, 12(6), 811. <https://doi.org/10.3390/biology12060811>
- Bertucci, J. I., & Bellas, J. (2021). Combined effect of microplastics and global warming factors on early growth and development of the sea urchin (*Paracentrotus lividus*). *Science of the Total Environment*, 782, 146888. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146888>

- Bhagat, J., Zang, L., Nishimura, N., & Shimada, Y. (2021). Zebrafish: An emerging model to study microplastic and nanoplastic toxicity. *Science of The Total Environment*, 728, 138707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138707>
- Bhuyan, M. S. (2022). Effects of microplastics on fish and in human health. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 827289. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
- Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Cole, M., Hopkins, F. E., Steinke, M., & ...et al. (2020). Bioavailability of Microplastics to Marine Zooplankton: Effect of Shape and Infochemicals. *Environmental Science & Technology*, 54(19), 12024–12033. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02715>
- Botterell, Z. L., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2019). Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: a review. *Environmental Pollution*, 245, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.065>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Cacador, I., & Canning-Clode, J. (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Browne, M. A., Niven, S. J., Galloway, T. S., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2013). Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity. *Current Biology*, 23(23), 2388–2392. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.012>
- Bucci, K., Tulio, M., & Rochman, C. M. (2020). What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review. *Ecological Applications*, 30(2), e02044. <https://doi.org/10.1002/eap.2044>

- Campos, D., Rodrigues, A. C., Rocha, R. J., Martins, R., Candeias-Mendes, A., Castanho, S., & diğ. (2021). Are microplastics impairing marine fish larviculture?—Preliminary results with *Argyrosomus regius*. *Water*, 13(1), 104. <https://doi.org/10.3390/w13010104>
- Cao, Y., Zhao, M., Ma, X., Song, Y., Zuo, S., Li, H., & Deng, W. (2021). A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans. *Science of The Total Environment*, 788, 147620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147620>
- Chae, Y., Kim, D., Choi, M.-J., Cho, Y., & An, Y.-J. (2019). Impact of nano-sized plastic on the nutritional value and gut microbiota of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* via dietary exposure. *Environment International*, 130, 104848. DOI: 10.1016/j.envint.2019.05.042
- Cholewiński, P., Moniuszko, H., Wojnarowski, K., Pokorny, P., Szeligowska, N., Dobicki, W., & diğ. (2022). The occurrence of microplastics and the formation of biofilms by pathogenic and opportunistic bacteria as threats in aquaculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8137. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138137>
- Cole, M. (2013). Microplastic swallowing zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Cormier, B., Cachot, J., Blanc, M., Cabar, M., Cifrandeau, C., Dubocq, F., ... & et al. (2022). Environmental microplastics disrupt swimming activity in acute exposure in *Danio rerio* larvae and reduce growth and reproduction success in chronic exposure in *D. rerio* and *Oryzias melastigma*. *Environmental Pollution*, 308, 119721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119721>
- Coyle, R., Hardiman, G., & Driscoll, K. O. (2020). Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100010>

- De Marchi, L., Renzi, M., Anselmi, S., Pretti, C., Guazzelli, E., Martinelli, E., Cuccaro, A., Oliva, M., Magri, M., & Bulleri, F. (2022). Polyethylene microplastics reduce filtration and respiration rates in the Mediterranean sponge *Petrosia ficiformis*. *Environmental Research*, 211, 113094. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113094>
- de Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., & Futter, M. N. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of the Total Environment*, 645, 1029–1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>
- Desforges, J. P. W., Galbraith, M., & Ross, P. S. (2015). Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(3), 320–330. DOI: 10.1007/s00244-015-0172-5
- Devi, A., De Silva, Y. S. K., Tyagi, L., & Aaryashree. (2025). The Individual and Combined Effects of Microplastics and Heavy Metals on Marine Organisms. *Microplastics*, 4(3), 38. <https://doi.org/10.3390/microplastics4030038>
- Di Renzo, L., Mascilongo, G., Berti, M., Bogdanović, T., Listes, E., Brkljača, M., ... Di Giacinto, F. (2021). Potential impact of microplastics and additives on the health status of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) stranded along the Central Adriatic Coast. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232 (8), Article 339. DOI:10.1007/s11270-021-04994-8
- Dong, J., Li, L., Liu, Q., Yang, M., Gao, Z., ...& et al. (2022). Interactive effects of polymethyl methacrylate (PMMA) microplastics and salinity variation on a marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Chemosphere*, 289, 133240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133240>
- Duan, Z., Chen, Y., Dou, Y., Fan, H., Wang, J., Cong, J., & diğ. (2024). Plastic food? Energy compensation of zebrafish (*Danio rerio*) after long-term exposure to polylactide and biotic microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133604. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133604>

- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Duncan, E. M., Broderick, A. C., Fuller, W. J., Galloway, T. S., Godfrey, M. H., Hamann, M., Limpus, C. J., Lindeque, P. K., Mayes, A. G., Omeyer, L. C. M., Santillo, D., Snape, R. T. E., & Godley, B. J. (2019). Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology*, 25(2), 744–752. DOI: 10.1111/gcb.14519
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- EC/European Commission. (2021). A European strategy for plastics in a circular economy. https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution*, 177, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- Ferrante, M., Zuccarello, P., Allegui, C., Fiore, M., Cristaldi, A., Pulvirenti, E., Favara, C., Copat, C., Grasso, A., Missawi, O., & Orecchio, S. (2022). Microplastics in fillets of Mediterranean seafood. A risk assessment study. *Environmental Research*, 204, 112247. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112247>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment. (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds.). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/ UNDP. Rep. Stud. GESAMP No. 93, 220 p.

- Godoy, V., Martín-Lara, M. A., Calero, M., & Blázquez, G. (2019). The relevance of interaction of chemicals/pollutants and microplastic samples as route for transporting contaminants, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 138, June 2020, Pages 312-323, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.033>
- Goldstein, M. C., Rosenberg, M., & Cheng, L. (2012). Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect. *Biology Letters*, 8(5), 817–820. DOI: 10.1098/rsbl.2012.0298
- Gonzalez, J. A., Hsiung, A. R., Nowak, E., Lange, D., Craig, S. E., Parker, C. G., & diğ. (2021). Impact of bisphenol-A and synthetic estradiol on brain, behavior, gonads and sex hormones in a sexually labile coral reef fish. *Hormones and Behavior*, 136, 105043. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2021.105043>
- Gonzalez-Ortegón, E., Demmer, J., Robins, P., & Jenkins, S. (2024). Floating plastics as a potential dispersal vector for rafting marine non-native species. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116919>
- Gouin, T., Roche, N., Lohmann, R., & Hodges, G. (2011). A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1466–1472. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es1032025>
- Guo, J., Huang, X., Xiang, L., Wang, Y., Li, Y., Li, H., ... & Mo, C. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>
- Guo, X., Liu, Y., & Wang, J. (2019). Sorption of sulfamethazine onto different types of microplastics: A combined experimental and molecular dynamics simulation study. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.070>
- Haave, M., Gomiero, A., Schönheit, J., Nilsen, H., & Olsen, A. B. (2021). Documentation of microplastics in tissues of wild coastal animals. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 31. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.575058>

- Harlacher, J. M., Emmons, C., Hanson, B., Olsen, D., Matkin, C., Phan, S., & diğ. (2023). Evidence of microplastics in marine top predators: microplastic particles isolated from the feces of fish-eating Killer Whales. Available at SSRN 4364184. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4364184>
- Hein, L., Remme, R. P., Schenau, S., Bogaart, P. W., Lof, M. E., & Horlings, E. (2020). Ecosystem accounting in the Netherlands. *Ecosystem Services*, 44, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101118>
- Hu, K., Zhou, P., Yang, Y., Hall, T., Nie, G., Yao, Y., Duan, X., Wang, S., & Sun, H. (2022). Degradation of microplastics by a thermal Fenton reaction. *ACS ES&T Engineering*, 2(1), 110–120. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00323>
- Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L., ... & ... (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124399. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399>
- Hoyo-Alvarez, E., Arechavala-Lopez, P., Jiménez-García, M., Solomando, A., Alomar, C., Sureda, A., Moranta, D., & Deudero, S. (2022). Effects of pollutants and microplastics ingestion on oxidative stress and monoaminergic activity of seabream brains. *Aquatic Toxicology*, 242, 106048. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.106048>
- Jacobsen, J. K., Massey, L., & Gulland, F. (2010). Fatal ingestion of floating net debris by two sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Marine Pollution Bulletin*, 60(5), 765–767. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.008>
- Jaafar, N., Azfaralariff, A., Musa, S. M., Mohamed, M., Yusoff, A. H., & Lazim, A. M. (2021). Occurrence, distribution and characteristics of microplastics in gastrointestinal tract and gills of commercial marine fish from Malaysia. *Science of the Total Environment*, 799. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149457>
- Jiang, Y., Yang, F., Zhao, Y., & Wang, J. (2020). Greenland Sea gyre increases microplastic pollution in the surface waters of the Nordic seas. *Science of The Total Environment*, 712, 136484.

- Justino, A. K., Ferreira, C. V., Fauvelle, V., Schmidt, N., Lenoble, V., Pelage, L., & diğ. (2023). From prey to predators: evidence of microplastic trophic transfer in tuna and large pelagic species in the southwestern Tropical Atlantic. *Environmental Pollution*, 327, 121532. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121532>
- Kang, H., Park, S., Lee, B., Ahn, J., & Kim, S. (2020). Modification of a Nile red staining method for microplastics analysis: A Nile red plate method. *Water*, 12(12), 3251. <https://doi.org/10.3390/w12113251>
- Kangas, A., Setälä, O., Kauppi, L., & Lehtiniemi, M. (2023). Trophic transfer increases the exposure to microplastics in littoral predators. *Marine Pollution Bulletin*, 196, 115553. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115553>
- Kannan, G., Mghili, B., Di Martino, E., Sanchez-Vidal, A., & Figuerola, B. (2023). Increasing risk of invasions by organisms on marine debris in the Southeast coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 195, 115496. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115496>
- Karak, P., Parveen, A., Modak, A., Adhikari, A., & Chakraborty, S. (2025). Microplastic Pollution: A Global Environmental Crisis Impacting Marine Life, Human Health, and Potential Innovative Sustainable Solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(6), 889. <https://doi.org/10.3390/ijerph22060889>
- Kelly, R., Elsler, L. G., Polejack, A., van der Linden, S., Tonnnesson, K., Schoedinger, S. E., Santoro, F., Pecl, G. T., Palmgren, M., Mariani, P., Glithero, D., Evans, K., Cvitanovic, C., Cook, J., Bartram, J., & Wisz, M. S. (2022). Empowering young people with climate and ocean science: Five strategies for adults to consider. *One Earth*, 5 (8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.007>

- Kim, K., Yoon, H., Choi, J. S., Yang, Y. J., & Park, J.-W. (2022). Chronic effects of nano and microplastics on reproduction and development of marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113962>
- Klein, S., Worch, E., & Knepper, T. P. (2015). Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the rhine-main area in Germany. *Environmental Science & Technology*, 49(10), 6070–6076. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b00492>
- Kochanek, A., Graż, K., Potok, H., Gronba-Chyła, A., Kwaśny, J., Wiewiórska, I., Ciuła, J., Basta, E., & Łapiński, J. (2025). Micro- and Nanoplastics in the Environment: Current State of Research, Sources of Origin, Health Risks, and Regulations—A Comprehensive Review. *Toxics*, 13(7), 564. <https://doi.org/10.3390/toxics13070564>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b06069>
- Koongolla, J. B., Lin, L., Yang, C. P., Pan, Y. F., Li, H. X., ... & et al. (2022). Microplastic prevalence in marine fish from onshore Beibu Gulf, South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 964461. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.964461>
- Kreitsberg, R., Randus, K., Kristoffersen, M., Heinlaan, M., Ward, R., Visnapuu, M., & diğ. (2021). Seagrass beds reveal high abundance of microplastic in sediments: a case study in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112417. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112417>

- Kvale, K., Prowe, A. E. F., Chien, C. T., Landolfi, A., & Oschlies, A. (2021). Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen. *Nature Communications*, 12(1), 2358. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22554-w>
- Lackner, M., & Branka, M. (2024). Microplastics in Farmed Animals, A Review. *Microplastics*, 3(4), 559-588. <https://doi.org/10.3390/microplastics3040035>
- Laist, D. W. (1997). Impacts of marine debris: Entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records. In J. M. Coe & D. B. Rogers (Eds.), *Marine Debris: Sources, Impacts, Solutions* (pp. 99–139). Springer-Verlag.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8(1), 4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W.J.G.M., Yin, N., Yang, J., Tu, C., & Zhang, Y. (2020b). Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nature Sustainability*, 3, 929–937. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0567-9>
- Li, Y., Sun, Y., Li, J., Tang, R., Miu, Y., & Ma, X. (2021). Research on the Influence of Microplastics on Marine Life. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 631(1), 012006.
- Li, Y., Wang, J., Yang, G., Lu, L., Zheng, Y., Zhang, Q., ...& et al. (2020a). Low level of polystyrene microplastics decreases early developmental

- toxicity of phenanthrene on marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121586. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121586>
- Liang, W. J., Li, J., Jong, M. C., Ma, C., Zuo, C., Chen, Q., & diğ. (2023). Process-oriented impacts of microplastic fibers on behavior and histology of fish. *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130856. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130856>
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., ... & Ren, H. (2016). Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 4054–4060.
- Mahamud, A. G. M. S. U., Anu, M. S., Baroi, A., Datta, A., Khan, M. S. U., Rahman, M., Tabassum, T., Tanwi, J. T., & Rahman, T. (2022). Microplastics in fishmeal: A threatening issue for sustainable aquaculture and human health. *Aquaculture Reports*, 25, 101205. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101205>
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science & Technology*, 35(2), 318–324
- Mazur, A. A., Chelomin, V. P., Zhuravel, E. V., Kukla, S. P., Slobodskova, V. V., & Dovzhenko, N. V. (2021). Genotoxicity of polystyrene (PS) microspheres in short-term exposure to gametes of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864) (Echinodermata, Echinoidea). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1088. <https://doi.org/10.3390/jmse9101088>

- Meaza, I., Toyoda, J. H., & Wise Sr, J. P. (2021). Microplastics in sea turtles, marine mammals and humans: A one environmental health perspective. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 298.
- Menéndez-Pedriz, A., Jaumot, J., & Bedia, C. (2022). Lipidomic analysis of single and combined effects of polyethylene microplastics and polychlorinated biphenyls on human hepatoma cells. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126777. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126777>
- Mottola, F., Caramanite, M., Barretta, A., Palmieri, I., & Rocco, L. (2024). Reproductive cytotoxic and genotoxic impact of polystyrene microplastics on *Paracentrotus lividus* spermatozoa. *Current Research in Toxicology*, 6, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2024.100173>
- Mountford, A. S., and Morales Maqueda, M. A. (2021). Modeling the accumulation and transport of microplastics by sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(2), e2020JC016826.
- Nagar, N., Saxena, H., Pathak, A., Mishra, A., & Poluri, K. M. (2023). A review on structural mechanisms of protein-persistent organic pollutant (POP) interactions. *Chemosphere*, 332, 138877. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138877>
- Navarro, A., Luzardo, O. P., Gómez, M., Acosta-Dacal, A., Martínez, I., ...& et al. (2023). Microplastics ingestion and chemical pollutants in seabirds of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 186, 114434. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114434>
- Nelms, S. E., Galloway, T. S., Godley, B. J., Jarvis, D. S., & Lindeque, P. K. (2018). Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, 238, 999–1007.

- Niemcharoen, S., Thaotumpitak, T., Palle, D., & Chanuse, N. (2022). Microplastic-contaminated feed interferes with antioxidant enzyme and lysozyme gene expression of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) leading to hepatopancreas damage and increased mortality. *Animals*, 12 (23), 3308. <https://doi.org/10.3390/ani12233308>
- NOC / National Oceanography Centre. (2021). Sources, amounts & pathways of plastics entering the global ocean. <https://noc.ac.uk/files/documents/science/report-plastics-entering-the-global-ocean-noci-december-2021.pdf>
- Noren, F., & Naustvoll, F. (2010). Survey of microscopic anthropogenic particles in Skagerrak. Commissioned by KLIMA- OG FORURENSNINGS DIREKTORATET, Norway.
- O'Briain, O., Marques Mendes, A. R., McCarron, S., Healy, M. G., & Morrison, L. (2020). The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment. *Water Research*, 182, 116021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116021>
- Ogunola, O. S., & Palanisami, T. (2016). Microplastics in the marine environment: Current status, assessment methodologies, impacts and solutions. *Journal of Pollution Effects & Control*, 4(161), 2.
- Park, B., Kim, S. K., Joo, S., Kim, J. S., Jo, K., ...& et al. (2023). Microplastics in large marine animals stranded in the Republic of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 189, 114734. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114734>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P., & Wilke, T. (2018). Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution*, 237, 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

- Rial, D., Bellas, J., Vidal-Liñán, L., Santos-Echeandía, J., Campillo, J. A., León, V. M., & diğ. (2023). Microplastics increase the toxicity of mercury, chlorpyrifos and fluoranthene to mussel and sea urchin embryos. *Environmental Pollution*, 336, 122410. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122410>
- Rochman, C., Hoh, E., Kurobe, T. et al. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep* 3, 3263 <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A., & Wilcox, C. (2020). Disentangling the influence of taxa, behaviour and debris ingestion on seabird mortality. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124071. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcebe>
- Roman, L., Schuyler, Q., Wilcox, C., & Hardesty, B. D. (2021). Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality? *Conservation Letters*, 14 (2), e12781. <https://doi.org/10.1111/conl.12781>
- Romdhani, I., De Marco, G., Cappello, T., Ibala, S., Zitouni, N., Boughattas, I., & diğ. (2022). Impact of environmental microplastics alone and mixed with Benzo[a]pyrene on cellular and molecular responses of *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Hazardous Materials*, 435, 128952. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128952>
- Romdhani, I., Venditti, M., Gallo, A., Abelouah, M. R., Gaaied, S., Boni, R., & diğ. (2024). Environmental microplastics compromise reproduction of the marine invertebrate *Mytilus galloprovincialis*: a holistic approach. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136219. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136219>

- Romeo, T., Pietro, B., Pedà, C., Consoli, P., Andaloro, F., & Fossi, M. C. (2015). First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 358-361. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.048>.
- Salerno, M., Berlino, M., Mangano, M. C., & Sarà, G. (2021). Microplastics and the functional traits of fishes: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 27(12), 2645–2655. <https://doi.org/10.1111/gcb.15570>
- Santos, R. G., Andrades, R., Demetrio, G. R., Kuwai, G. M., Sobral, M. F., De Souza Vieira, J., & diğ. (2020). Exploring plastic-induced satiety in foraging green turtles. *Environmental Pollution*, 265, 114918. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114918>
- Sarasamma, S., Audira, G., Siregar, P., Malhotra, N., Lai, Y.-H., Liang, S.-T., & diğ. (2020). Nanoplastics cause neurobehavioral impairments, reproductive and oxidative damages, and biomarker responses in zebrafish: throwing up alarms of wide spread health risk of exposure. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (4), 1410. <https://doi.org/10.3390/ijms21041410>
- Savinelli, B., Fernández, T. V., Galasso, N. M., D’Anna, G., Pipitone, C., Prada, F., & diğ. (2020). Microplastics impair the feeding performance of a Mediterranean habitat-forming coral. *Marine Environmental Research*, 155, 104887. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104887>
- Schür, C., Rist, S., Baun, A., Mayer, P., Hartmann, N. B., & Wagner, M. (2019). When fluorescence is not a particle: the tissue translocation of microplastics in *Daphnia magna* seems an artifact. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(7), 1495–1503. <https://doi.org/10.1002/etc.4436>

- Seeley, M. E., Hale, R. C., Zwollo, P., Vogelbein, W., Verry, G., & Wargo, A. R. (2023). Microplastics exacerbate virus-mediated mortality in fish. *Science of the Total Environment*, 866, 161191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161191>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environmental Pollution*, 185, 77–83.
- Sfriso, A. A., Tomio, Y., Rosso, B., Gambaro, A., Sfriso, A., Corami, F., & diğ. (2020). Microplastic accumulation in benthic invertebrates in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Environment International*, 137, 105587. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105587>
- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. (2018). Marine microplastics: abundance, distribution, and composition. In M. Zeng (Ed.), *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* (pp. 1–26). Elsevier.
- Shore, E. A., DeMayo, J. A., & Pespeni, M. H. (2021). Microplastics reduce net population growth and fecal pellet sinking rates for the marine copepod, *Acartia tonsa*. *Environmental Pollution*, 284, 117379. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117379>
- Sibly, R. M., Brown, J. H., & Kodric-Brown, A. (2012). *Metabolic ecology: A scaling approach*. John Wiley & Sons.
- Siletten, A., Bryan, A., Iken, K., Olnes, J., & Horstmann, L. (2025). Microplastics in marked seal stomachs from the Bering and Chukchi seas in 2012 and 2020. *Marine Pollution Bulletin*, 214, 117770. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117770>
- Soares, M. G., Warren, T. M., Giarrizzo, T., Martinelli Filho, J. E., Tavares, T. C., Ziveri, P., & diğ. (2023). Marine debris provide long-distance

- pathways for spreading invasive corals. *Science of the Total Environment*, 900, 165637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165637>
- Su, Y., Qi, H., Hou, Y., Gao, M., Li, J., ...& et al. (2022). Combined Effects of Microplastics and Benzo[a]pyrene on the Marine Diatom *Chaetoceros muelleri*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 779321. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.779321>
- Subias-Baratau, A., Sanchez-Vidal, A., Di Martino, E., & Figueroa, B. (2022). Marine biofouling organisms on beached, buoyant and benthic plastic debris in the Catalan Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113405. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113405>
- Susanti, N., Mardiasuti, A., & Haryadi, S. (2022). Microplastics in digestive system of little-black cormorant (*Phalacrocorax sulcirostris*) in Pulau Rambut Sanctuary. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 950 (1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012003>
- Tahir, A., Samawi, M., Sari, K., Hidayat, R., Nimzet, R., Wicaksono, E., & diğ. (2019). Studies on microplastic contamination in seagrass beds at Spermonde Archipelago of Makassar Strait, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341 (2), 022008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/2/022008>
- Tan, F., Yang, H., Xu, X., Fang, Z., Xu, H., Shi, Q., & diğ. (2020). Microplastic pollution around remote uninhabited coral reefs of Nansha Islands, South China Sea. *Science of the Total Environment*, 725, 138383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138383>
- Tang, Y., Rong, J., Guan, X., Zha, S., Shi, W., Han, Y., Du, X., Wu, F., Huang, W., & Liu, G. (2020). Immunotoxicity of microplastics and two

- persistent organic pollutants alone or in combination to a bivalve species. *Environmental Pollution*, 258, 113845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113845>
- Teuten, E. L., Rowland, S. J., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2007). Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environmental Science & Technology*, 41(22), 7759–7764.
- Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709.
- Timilsina, A., Adhikari, K., Yadav, A. K., Joshi, P., Ramena, G., & Bohara, K. (2023). Effects of microplastics and nanoplastics in shrimp: mechanisms of plastic particle and contaminant distribution and subsequent effects after uptake. *Science of the Total Environment*, 894, 164999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164999>
- Trestrail, C., Nuggeoda, D., & Shimeta, J. (2020). Invertebrate responses to microplastic ingestion: reviewing the role of the antioxidant system. *Science of the Total Environment*, 734, 138559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138559>
- Turner, A., Holmes, L., Thompson, R. C., & Fisher, A. (2020). Metals and marine microplastics: Adsorption from the environment versus addition during manufacture, exemplified with lead. *Water Research*, 173, 115577. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115577>
- United Nations Environment Programme. (2021). From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. UNEP. <https://malaysia.un.org/en/171922-pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>

- UNEP- United Nations Environment Programme (2022). End plastic pollution: Towards an international legally binding instrument (Draft resolution). <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/3852>
- Unsworth, R. K., Higgs, A., Walter, B., Cullen-Unsworth, L. C., Inman, I., & Jones, B. L. (2021). Canopy accumulations: are seagrass meadows a sink of microplastics? *Oceans*, 2 (1), 162–178.
- Vroom, R. J. E., Koelmans, A. A., Besseling, E., & Halsband, C. (2017). Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton. *Environmental Pollution*, 231, 987-996.
- Wang, S., Wang, Y., Liang, Y., Cao, W., Sun, C., & et al. (2020). The interactions between microplastic polyvinyl chloride and marine diatoms: Physiological, morphological, and growth effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111000>
- Wang, T., Hu, M., Xu, G., Shi, H., Leung, J. Y., & Wang, Y. (2021). Microplastic accumulation via trophic transfer: can a predatory crab counter the adverse effects of microplastics by body defence? *Science of the Total Environment*, 754, 142099. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142099>
- Wang, W., Gao, H., Jin, S., Li, R., & Na, G. (2019).** The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 110–117.

- Wang, H., Liu, H., Zhang, Y., Zhang, L., Wang, Q., & Zhao, Y. (2023). The toxicity of microplastics and their leachates to embryonic development of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Marine Environmental Research*, 190, 106114. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106114>
- Wang, F. F., Yu, Y., Wu, H., Wu, W., Wang, L., An, L., Cai, W. (2021). Microplastics in spotted seal cubs (*Phoca largha*): digestion after ingestion? *Science of the Total Environment*, 785, 147426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147426>
- Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2016). Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, *Nephrops norvegicus*. *Environmental Pollution*, 218, 895–900. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.020>
- Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L. J., Coppock, R., Sleight, V., ... & Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science*, 1(4), 140317.
- Wootton, N., Reis-Santos, P., Dowsett, N., Turnbull, A., & Gillanders, B. M. (2021). Low abundance of microplastics in commercially caught fish across southern Australia. *Environmental Pollution*, 290, 118030. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118030>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492.
- Yen, L. P., Yong, C. L. X., & Todd, P. A. (2024). The effect of oral colony morphology, coral surface condition, particle size, and seeding point on the trapping and deposition of microplastics. *Science of the Total*

- Environment, 921, 171077.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171077>
- Ytreberg, E., Hansson, K., Hermansson, A. L., och Jalkanen, J.-P. (2021). Metal and PAH loads from ships and boats, relative to other sources, in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112879.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112879>.
- Yu, R. S., & Singh, S. (2023). Microplastic pollution: Threats and impacts on global marine ecosystems. *Sustainability*, 15(17), 13252.
<https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Yuan, J., Yang, J., Xu, X., Wang, Z., Jiang, Z., & Ye, Z. (2023). Bisphenol A (BPA) directly activates the G protein-coupled estrogen receptor 1 and triggers metabolic disruption in the gonadal tissue of *Apostichopus japonicus*. *Biology*, 12(6), 798.
<https://doi.org/10.3390/biology12060798>
- Zhang, X., Wen, K., Ding, D., Liu, J., Lei, Z., Chen, H., Hu, X., Li, Y., Wang, X., & Wang, J. (2021). Size-dependent adverse effects of microplastics on intestinal microbiota and metabolic homeostasis in the marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Environment International*, 151, 106452.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106452>
- Zhang, Y., Zhang, D., & Zhang, Z. (2023). A critical review on artificial intelligence—based microplastics imaging technology: Recent advances, hot-spots and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1150.
<https://doi.org/10.3390/ijerph20021150>

Zimmermann, L., Bartosova, Z., Braun, K., Oehlmann, J., Völker, C., & Wagner, M. (2021). Plastic products leach chemicals that induce in vitro toxicity under realistic use conditions. *Environmental Science & Technology*, 55 (17), 11814–11823. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01103>

Zitouni, N., Cappello, T., Missawi, O., Boughattas, I., de Marco, G., Belbekhouche, S., Mokni, M., Alphonse, V., Guerbej, H., Bousserrhine, N., & Banni, M. (2022). Metabolomic disorders unveil hepatotoxicity of environmental microplastics in wild fish *Serranus scriba* (Linnaeus 1758). *Science of The Total Environment*, 838, 155872.