

TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE



İKSAD
Publishing House

TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Yazarlar

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Prof. Dr. Yakup BUDAK

Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL

Doç. Dr. Halil ERDEM

Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN

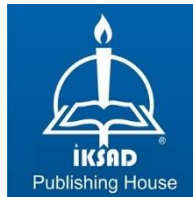
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI

Dr. Saliha DİRİM BUHAN



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

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

ISBN: 978-625-378-481-2

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

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

BÖLÜM 10

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 283

BÖLÜM 11

HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN..... 321

BÖLÜM 12

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

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Ercan 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, Zootekni 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, Zootekni 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

BÖLÜM 10

ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK KAYNAKLARI VE MARUZİYET YOLLARI

Prof. Dr. Arda YILDIRIM¹
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN²

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

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

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

GİRİŞ

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

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

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

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

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

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

1. MİKROPLASTİKLERİN TANIMI, SINIFLANDIRILMASI VE BAŞLICA ÇEVRESEL KAYNAKLARI

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

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

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

Plastik Parçacık Boyut Sınıflandırması



Şekil 1. Plastik parçalarının boyutlarına göre sınıflandırılması.

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

Tablo 1. Morfolojiye dayalı mikroplastik sınıflandırması.

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

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

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

saha kanıtını oluşturmaktadır.

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

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

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

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

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

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

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

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

2. ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİK MARUZİYET YOLLARI

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

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

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

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

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

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

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

Bazı işletmelerde maliyeti azaltmak ve döngüsellliği desteklemek amacıyla fırıncılık yan ürünleri (bayat ekmek, bisküvi kırığı), meyve-sebze posaları, bira mayası posası gibi gıda endüstrisi artıkları ile süpermarketlerden toplanan tüketilemeyen ürünler yem hammaddesi olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım sürdürülebilirlik açısından cazip görünse de girdi materyallerinin plastikle yoğun teması nedeniyle mikroplastik (MP) kontaminasyonu bakımından özgül riskler içerir. Ambalajdan ayırma ("de-packaging") adımı çoğu zaman kusursuz değildir; streç film, poşet ve kap parçalarının milimetrik/kılcal kırıntıları ayrışma hatalarından ya da mekanik işlem sırasında ufalanmadan kaynakla yeme karışabilir (Akanda ve ark.,

2025). Gıda atığı bazlı yemlerde risk yalnızca “de-packaging” hatalarından ibaret değildir; ön kontaminasyon da önemli bir giriş kapısıdır. Nitekim sofrata tuzlarında ve bazı şekerli ürünlerde mikroplastik (MP) varlığı tekrarlayan şekilde rapor edilmiştir; bu tür bileşenlerin önce gıdaya, ardından atık akışına MP taşınması mümkündür (Pironti ve ark. 2021).

Deniz ürünleri yan ürünleri ve balık unu için de benzer bir tablo söz konusudur: Balık ve kabuklularda yaygın MP birikimi bulunduğu için, bu hammaddeler yem zincirine MP getirme potansiyeli taşımaktadır. Bangladeş’te iki popüler kurutulmuş deniz balığı ürününde MP saptanması, bölgesel yem/gıda tedarik zincirlerinde kaynak yönetiminin önemini vurgulamaktadır (Djouina ve ark., 2024; Akanda ve ark., 2025).

Saha bildirimleri, yoğun barınak koşullarındaki su kuşlarında (ördek) MP kontaminasyonunu göstermiştir; maruziyetin yem, su ve çevresel toz gibi birden çok kanaldan beslendiğini işaret eder. Bu nedenle, gıda atığı bazlı yemlerde hem bileşen kökeninin izlenmesi hem de ön arıtma/ayıklama ve hijyen protokollerinin sıkılaştırılması kritik görülmelidir (Akanda ve ark., 2025). Tarlada ve merada kullanılan silaj streç filmleri ile balya ipleri zamanla ufalanıp kaba yem matrisine karışabilir; bu da özellikle gıda atığı bazlı yem akışlarıyla birlikte değerlendirildiğinde ek bir mikroplastik (MP) yükü doğurur. İspanya’daki saha çalışması, plastik malç kullanılan sebze tarlalarında koyun dışkılarında (kuru madde) yüksek MP düzeyleri ve film/fragment ağırlıklı morfolojiler bildirmiştir; tarladaki malç kalıntılarının başlıca kaynak olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, otlatma/bitki artığı tüketimi yoluyla MP alımının sahada gerçekçi bir risk olduğunu gösterir (Beriot ve ark., 2021). Öte yandan, bazı bölgelerde başıboş/gezinici küçük-büyükbaşların çöplük ve yol kenarı atıklarında makroplastik tükettiği ve bunun rumen impaksiyonu, indigestion/tekrarlayan timpani gibi kronik sindirim sorunlarına yol açabildiği çok sayıda saha çalışması ve derlemede rapor edilmiştir. Bu uç örnekler, özellikle gıda atığı tabanlı beslemede ambalaj artıklarının titizlikle uzaklaştırılmasının kritikliğini vurgular (Mekuanint ve ark., 2017; Priyanka ve Dey, 2018).

Uygulamada riski azaltmak için, hammadde kabulünde ambalaj kalıntılarının tam ayrıştırılması ve optik–hava ayırıcı, elek, yoğunluk bazlı ön-temizleme gibi mekanik adımlarla plastiklerin uzaklaştırılması esastır. Süreç tarafında paslanmaz çelik/cam esaslı ekipman, kapalı transfer ve toz kontrolü;

“de-packaging” hatlarında sürtünmeyi azaltan tasarımlar eklenerek aşınma kaynaklı bulaşmayı sınırlar. Tedarik zinciri için girdi spesifikasyonları (balık unu ve kuru deniz ürünlerinde MP için tedarikçi beyanı) ile periyodik doğrulama (örnekleme–analiz planı) pratik ve etkili iyileştirme alanlarıdır. Bu önlemler, derlemelerde vurgulanan çok yönlü azaltım paketinin parçasıdır (Akanda ve ark., 2025). Düzenleme boyutunda, pek çok ülkede yemlerde MP’ye özgü sistematik bir izleme standardının bulunmaması önemli bir boşluktur; izin verilebilir seviyelerin tanımlanması ve HACCP içinde MP-odaklı kritik kontrol noktalarının belirlenmesi, yem güvenliği yönetimini güçlendirir.

Su, ikinci önemli maruziyet yoludur. Dünya genelinde yüzey suları ve bazı içme suyu kaynaklarında (ham/arıtılmış/şişelenmiş) mikroplastik (MP) bildirimleri artmaktadır; içme suyu üzerine sistematik derlemeler ve tesis ölçekli çalışmalar bunu desteklemektedir. İçme suyu şebekelerinde boru ve bağlantı parçalarının aşınması da ek bir MP giriş yoludur (Wu ve ark., 2021; Akanda ve ark., 2025). Paketli içeceklerde, ambalajın kendisinden suya mikroparçacık geçişi mikroskopik/Raman analizleriyle kanıtlanmıştır (Schymanski ve ark., 2018). Kümes ortamlarında damlalık tipi suluklar, plastik su hatları ve kaplar zamanla ufalanarak suya mikroplastik geçişine zemin hazırlayabilir; saha örneklemelerinde su hattı, hayvan ağız yolu ile alımı, gübre zinciri olası bir taşıma yolu olarak tanımlanmıştır (Wu ve ark., 2021). Bu çerçevede suyun kaynağı (yüzey/yeraltı), ön arıtım süreçleri ve hat/rezervuar malzemesi seçimi, maruziyetin yönetiminde kritik önemdedir.

Solunum yoluyla alım, özellikle kapalı barınaklarda yem doldurma/boşaltma sırasında ve günlük faaliyetler esnasında yükselen lif ve tozların havada askıda kalabildiği durumlarda önem kazanmaktadır. İç ortamlarda lif konsantrasyonları ve çökelim hızları dış ortama göre belirgin biçimde yüksektir; liflerin önemli bir bölümü tekstil/ambalaj kaynaklıdır. Bu durum, barınak havasında da lif ve parçacık yükünün birikebileceğine işaret etmektedir. Maruziyet yolları insanlarda başlıca inhalasyon, ardından oral alım, daha düşük ölçüde dermal temas olarak tanımlanır; havadaki lif ve parçacıklar, toz yutumu gibi dolaylı mekanizmalarla sindirim sistemine de ulaşabilir. Bu nedenle, barınak havasının kalitesi (toz/lif kontrolü), yüzeylerin temizlik pratiği ve materyal seçimi maruziyet yönetiminde kritik öneme sahiptir (Dris ve ark., 2017; Pronti ve ark., 2021). Açık çevresel bağlamda,

mikroplastiklerin atmosferle uzun mesafelere taşınıp uzak ve seyrek nüfuslu alanlara dahi ıslak/kuru çökelimle ulaştığı gösterilmiştir; bu bulgular, çiftlik içi/dışı hava yüklerinin de rüzgâr ve yağışla beslendiğini düşündürmektedir (Allen ve ark., 2019).

Yapılan çalışmalar çiftlik hayvanlarında sahadaki yetiştiriciliklerde ve kümes içi örneklerinde kümes hayvanları ve diğer türlerde mikroplastik varlığı rapor edilmiştir; bu durum, yem-su-çevresel toz hatlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir. Buna örnek olarak etlik piliçlerin kas dokusunda MP tespiti; derlemelerde su/yem/ambalaj ve atmosferik girdiler verilebilir (Chen ve ark., 2023; Akanda ve ark., 2025).

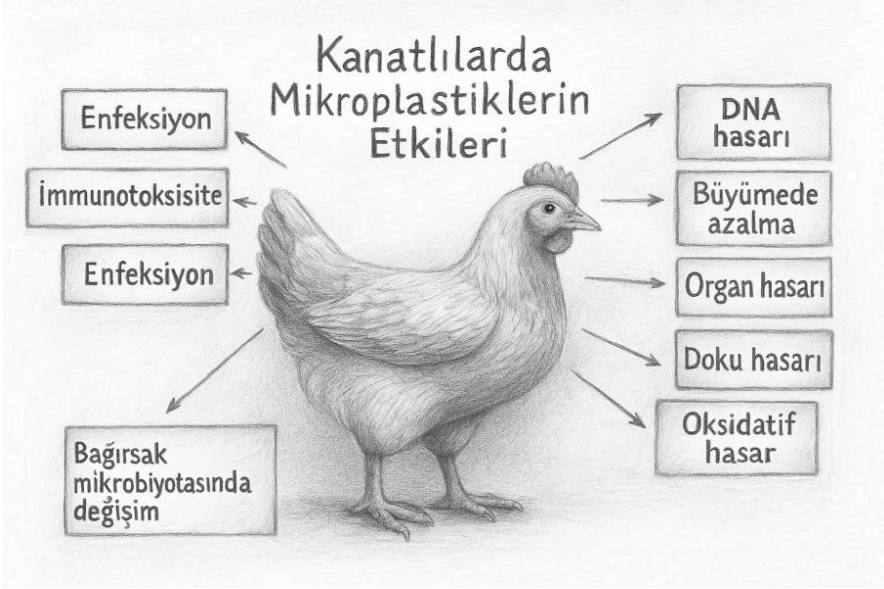
Deri yoluyla maruziyet, mevcut kanıtlara göre ikincil ve sınırlı kabul edilmektedir; asıl girişler inhalasyon ve oral alım üzerinden olmaktadır (Pironti ve ark., 2021). Deri yoluyla mikroplastik emilimine ilişkin çiftlik hayvanlarında yapılmış bir araştırma henüz bulunmamaktadır ve literatürde bu konudaki bilgi son derece sınırlıdır. Mevcut çalışmalar arasında yalnızca bir araştırma, çiftlik hayvanlarının akciğer dokularındaki mikroplastik varlığını incelemiştir. Li ve ark. (2023), hem yetişkin hem de fetal domuz akciğerlerinde mikroplastik tespit etmiş; özellikle fetal dokuda mikroplastik bulunması, bu partiküllerin yalnızca inhalasyon yoluyla akciğere ulaşmadığını ve farklı aktarım mekanizmalarının da söz konusu olabileceğini düşündürmüştür. Dong ve ark. (2023) ise çiftlik hayvanlarının vücut yüzeyini kaplayan yün ve kılların mikroplastiklere karşı fiziksel bir bariyer oluşturarak dermal girişe karşı belirli düzeyde koruyucu bir rol oynayabileceğini ileri sürmektedir. Bu bulgular, solunum ve dermal maruziyet yollarının yeniden değerlendirilmesini ve özellikle deri yoluyla emilim konusunda daha fazla araştırma yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Toparlayıcı kanıtlar, yem ve su hijyeninin, ekipman/ambalaj malzemesi seçiminin ve barınak içi toz-hava yönetiminin mikroplastik maruziyetini kontrol etmede belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle besleme sürecinde kullanılan plastik ürünlerin bileşimi ile gübrede saptanan MP'lerin bileşimi arasındaki uyum, yem hattı ve ekipman kaynaklı girişleri işaret eder; bu nedenle yem hammaddelerinin kökeni-işlenmesi, depolama/nakliye pratikleri ve temas eden malzemelerin (kap, boru, astar, ambalaj) polimer türü kritik önemdedir. Çiftlik ölçeğinde önleme/azaltma stratejileri literatürde vurgulanmakta; giriş kapılarının (yem, su, altyapı-ekipman) birlikte yönetimi

önerilmektedir. Ayrıca MP'lerin atmosferik taşınımına çevresel bölmeler arasında aktarılabilirdiği göz önüne alındığında, barınak içi hava kalitesi ve toz kontrolü de maruziyet yönetiminin ayrılmaz parçasıdır. Yem hammaddelerinin kökeni ve işleme hattı, depolama ve nakliye pratikleri; su temin zinciri ve hat materyalleri barınak içi hava kalitesi ve toz kontrolü birlikte ele alındığında maruziyet azaltımında anlamlı kazanımlar sağlanabilir (Wu ve ark., 2021; Beriot ve ark., 2021; Xu ve ark., 2022; Akanda ve ark., 2025).

3. MİKROPLASTİKLERİN HAYVAN VÜCUDUNDAKİ AKİBETİ (ABSORPSİYON, DAĞILIM VE ATILIM)

Mikroplastiklerin tarımsal üretim sistemlerinde giderek daha fazla tespit edilmesi, bu partiküllerin hayvan organizmasında nasıl davrandığının anlaşılmasını önemli hâle getirmiştir. Özellikle kanatlılarda maruziyet yolları ve toksikokinetik süreçler hem sağlık hem de ürün güvenliği açısından dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Mikroplastiklerin kanatlı üretimi üzerindeki olası etkileri Şekil 2'de özetlenmektedir. Dong ve ark. (2023), hayvanların mikroplastiklere (i) oral yolla, yem ve su tüketimi aracılığıyla, (ii) solunum yoluyla, hava içerisindeki partiküllerin akciğerlere inhalasyonu ile ve (iii) deri teması üzerinden üç temel maruziyet yoluyla karşılaşabileceğini belirtmektedir. Sheriff ve ark. (2023) ise mikroplastiklerin vücuda girdikten sonra organizmada çeşitli toksikokinetik süreçlere (emilim, dağılım, metabolizma ve atılım) ve buna bağlı toksikodinamik etkilere yol açabileceğini bildirmektedir. Bu süreçler, mikroplastik maruziyetinin hayvan sağlığı üzerindeki çok boyutlu etkilerini ortaya koymaktadır (Abd El-Hack ve ark., 2025).



Şekil 2. Mikroplastiklerin kanatlı üretimi üzerindeki olası etkilerini gösteren şema

Gehring ve van der Merwe (2014) ile Richardson (2020), bir kimyasalın toksikodinamik etkilerini, maruziyet süresi, dozu, sıklığı ve miktarı gibi değişkenlere bağlı olarak organizmada ortaya çıkan biyolojik tepkiler şeklinde tanımlamaktadır. Buna karşılık, toksikokinetik, yabancı bir kimyasalın vücuda alındıktan sonra geçirdiği emilim, dağılım, metabolizma ve atılım süreçlerini kapsamaktadır (van der Merwe ve ark., 2018; Asati ve ark., 2022). Sığır ve kanatlılarda mikroplastiklerin toksikodinamik ve toksikokinetik sonuçlarına ilişkin araştırmalar ise oldukça yenidir ve mevcut literatür henüz sınırlı düzeydedir (Sheriff ve ark., 2023).

Kuşlar tarafından alınan mikroplastikler, inflamasyona, gastrointestinal tıkanmalara ve besin emiliminde bozulmalara yol açarak normal sindirim süreçlerinin işleyişini bozabilir ve buna bağlı olarak genel sağlık durumunu olumsuz yönde etkileyebilir. Mikroplastikler (MP) ağız yoluyla alındıktan sonra çiftlik hayvanlarının gastrointestinal kanalında büyük ölçüde emilmeden transit geçer ve dışkıyla uzaklaştırılır; kontrollü deneyler ve saha gözlemleri bu sonucu doğrulamaktadır (Shelver ve ark., 2024; Beriot ve ark., 2021; HuertaLwanga ve ark., 2017; Wu ve ark., 2021). Yumurtacı tavuklarda [¹⁴C]-işaretli polistiren MP maruziyetinde, uygulanan dozun %96,8'i ilk 24 saat içinde dışkıyla elimine edilmiş; kan, yumurta ve dokularda kalan toplam

fraksiyon %1'in altında bulunmuştur (Shelver ve ark., 2024). Öte yandan Malik ve ark. (2025) 32 civcivi dört gruba ayırmış ve kontrol grubunun yanı sıra üç farklı mikroplastik maruziyet düzeyi uygulanmıştır (%20 MP, %30 MP ve %40 MP). Mikroplastikler kozmetik ürünlerden ekstrakte edilmiş ve yarı pişmiş hamur formunda günlük rasyonun belirli oranları şeklinde hayvanlara 28 hafta boyunca verilmiştir. Araştırmacıların bulgularına değerlendirildiğinde; mikroplastik maruziyetinin kanatlılarda çok yönlü fizyolojik bozulmalara yol açtığını, özellikle yüksek dozlarda (>%30 günlük rasyon) büyüme performansını düşürdüğünü, enzimatik ve hormonal yanıtları belirgin şekilde değiştirdiğini ve metabolik stres göstergelerini artırdığını göstermektedir. Araştırmacılar, bu değişimlerin hayvanlarda net enerji alımını azaltarak büyüme ve genel sağlık üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu vurgulamaktadır. Susanti ve ark. (2021), Endonezya'nın beş farklı kentindeki yoğun üretim sistemlerinde yetiştirilen ördeklerde mikroplastik varlığını araştırmış ve bağırsaklarda dikkate değer düzeyde mikroplastik birikimi tespit etmiştir. Bazı bölgelerde bir kuşta bulunan mikroplastik sayısının 39 ile 49 adet arasında değiştiği bildirilmiştir. Ördeklerde saptanan mikroplastiklerin çoğu fragman ve filament formunda olup, parçacık boyutları 100–5000 µm aralığında değişmiştir. Ayrıca analiz edilen örneklerde en sık karşılaşılan polimer türlerinin naylon, PBM, PET, PVC ve PE olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Filipinler'in South Caloocan bölgesindeki pazarlardan temin edilen tavukların taşlık ve bağırsak dokularında film, fragment ve pellet formunda çeşitli mikroplastik türleri tespit edilmiştir (Leon ve ark., 2022). Meksika'da yürütülen bir başka araştırmada ise 5 mm'den küçük mikroplastiklerin %16,45'inin tavuk taşlıklarında biriktiği bildirilmiştir (Huerta Lwanga ve ark., 2017). Bu bulgular, kümes hayvanlarının çevresel mikroplastik yükünden önemli ölçüde etkilenebildiğini göstermektedir. Mikroplastiklerin kanatlıların üreme sistemi üzerindeki olumsuz etkileri de deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Hou ve ark. (2022), 28 ve 42 gün süreyle sırasıyla 1 ve 100 mg/L polistiren (PS) mikroplastik verilen tavuklarda testis dokusunda yapısal bozulmalar, oksidatif stres ve belirgin inflamatuvar infiltrasyon geliştiğini rapor etmiştir. Meng ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen daha güncel bir çalışmada ise, 42 gün boyunca 5 µm boyutunda PS mikroplastiklere maruz bırakılan tavuklarda özellikle 10 mg/L ve 100 mg/L konsantrasyonlarında böbrek hasarı, oksidatif stres artışı ve

mitokondriyal fonksiyonlarda bozulma tespit edilmiştir.

Çeşitli saha çalışmalarında koyun gübrelerinde lif/film/fragman biçiminde ve çoğunlukla PE/PP bileşiminde MP'lerin düzenli olarak rapor edilmesi (Beriot ve ark., 2021) ve toprak–solucan–tavuk trofik hattında partikül transferinin deneysel olarak gösterilmesi (Huerta Lwanga ve ark., 2017), yeme ve çevresel girdilere rağmen alımın büyük kısmının emilmeden atıldığını desteklemektedir. Derleme çalışmalar da çiftlik hayvanlarında mikrometre boyutundaki MP'lerin biyoyararlanımının düşük, sistemik seviyelerin ise sınırlı olduğunu bildirmektedir (Wu ve ark., 2021).

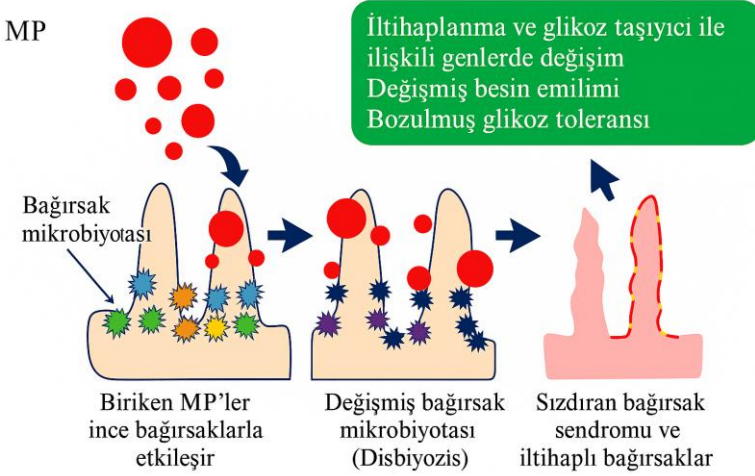
Mikroplastiklerin bağırsaklardan emilme olasılığı; parçacığın boyutuna, yüzey özelliklerine ve bağırsak bariyerinin (mukus tabakası, bağırsak epitel hücreleri, M-hücreleri/Peyer plakları ve sıkı bağlantılar) yapısına bağlıdır. Çeşitli araştırmalar, 100–150 mikrometreden daha büyük mikroplastiklerin bağırsaktan neredeyse hiç geçmediğini göstermektedir. Buna karşılık 100 mikrometreden küçük ve özellikle 1–2 mikrometreden daha küçük nano boyuttaki parçacıkların, epitel tabakasından geçebildiği; bunun da mukus üzerinden geçiş, M-hücreleri aracılığıyla taşınma veya hücreler tarafından endositoz yoluyla alınma gibi mekanizmalarla gerçekleşebileceği bildirilmektedir (Wright ve Kelly, 2017; Bruno ve ark., 2024; Obeng ve ark., 2025). Monclús ve ark. (2022), Japon bildircinlarında 5 hafta boyunca toplam 600 mg polietilen/polipropilen (PE/PP) mikroplastik uygulanarak parçacık boyutunun etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 125 mikrometreden küçük parçacıkların antioksidan enzimleri (CAT, GST, GPx) artırdığı; 3 mm boyutundaki daha büyük parçacıkların ise AST düzeyini yükselttiği ve dışı bildircinlarda 17 β -östradiol hormonunu azalttığı gösterilmiştir. Hayvanların son canlı ağırlığı değişmemiş olsa da büyüme hızının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, küçük parçacıkların ($\leq 125 \mu\text{m}$) bağırsak epiteline daha kolay ulaşım hücrel stres ve oksidatif yanıt oluşturma ihtimalinin yüksek olduğunu; büyük parçacıkların ise çoğunlukla mide–taşlıkta daha uzun süre kaldığını ve bağırsaklara daha yavaş geçtiğini göstermektedir.

Kemirgen modelinde PE (40–48 μm) ve PA (15–20 μm) mikroplastiklerine kısa süreli oral maruziyetinin duodenum geçirgenliğini ve sıkı bağlantı proteinlerine ait gen ekspresyonlarını etkilediği bildirilmiştir; bu, bariyer bütünlüğünün MP maruziyetinde hassas bir hedef olabileceğine işaret eder (Toto ve ark., 2022). PE (10–150 μm) için, farelerde barsak

mikrobiyotası ve inflamasyon üzerinde olumsuz etkiler bildirilmiştir (Li ve ark., 2020). PS ile yapılan çalışmalarda da barsak bariyeri bozulması ve metabolik etkileri rapor edilmiştir (Jin ve ark., 2019). Tür farklılıkları ve deney koşulları nedeniyle genelleme dikkat gerektirse de parçacık boyutu küçüldükçe (özellikle $<100 \mu\text{m}$ ve mikro-altı) epitel geçişi ve biyoyararlanım olasılığının arttığı yönünde tutarlı bir eğilim bulunmaktadır. Tekrarlayan maruziyet koşullarında, mikroplastiklerin kas dokusunda tespit edilebilir düzeyde birikebildiğine dair kanıtlar mevcuttur. Etlik piliçlerde yürütülen çalışmada, çiftlikten doğrudan alınan örneklerde PS ve özellikle PA6 başta olmak üzere çok sayıda polimer göğüs ve but kasında spektroskopik olarak doğrulanmıştır; akabinde yapılan kontrollü PS maruziyeti, göğüs kasında birikimin arttığını, but kasında ise zamanla azaldığını bildirilmiştir (Chen ve ark., 2023). Bu bulgular, kaslar arasındaki kan akımı ve dokunun yenilenme hızı (turnover) farklı olduğundan, mikroplastiklerin birikme, temizlenme dinamikleri de kas grubuna göre değişebileceğini göstermektedir. Tavşanlarda yeme katılan PVC parçacıkları, ince bağırsağın (ileum) iç yüzeyinde eksfoliasyona, yani epitelin üst tabakasındaki hücrelerin dökülmesine/soyulmasına yol açmış; ayrıca dalakta bağışıklık hücreleri (makrofajlar) içinde plastik tanecikleri görülmüştür. Bu bulgular, bağırsak bariyerinin kısmen aşılabildiğini ve parçacıkların sınırlı ölçüde kana/organlara taşınabileceği düşünülebilir. Yüksek doz ya da uzamış maruziyet ve uygun boyut-morfoloji koşullarında kısıtlı bir sistemik yayılım mümkündür; ancak yanıt, tür, hedef doku ve parçacık özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Papp ve ark., 2024)

Son dönemde yapılan Saijo ve ark. (2025)'nin gerçekleştirdiği bir çalışmada, yüksek yağlı diyetle beslenen farelere farklı boyutlarda (0,5–100 μm) polistiren mikroplastikler (PS-MP) verilmiştir. Bulgular, parçacık boyutundan bağımsız olarak glikoz toleransının bozulduğunu göstermiştir. Ayrıca, ince bağırsak yüzeyindeki villuslarda atrofi (yani villusların kısalıp incilmesi, emilim yüzeyinin küçülmesi) gözlenmiştir. Bağırsak dokusunda bağışıklık sistemi hücrelerinde de değişimler saptanmıştır. Özellikle doğal öldürücü hücreler (Natural Killer–NK hücreleri) sayısında artış rapor edilmiştir. NK hücreleri bağışıklık sisteminin ilk savunma hattında yer alan, virüs bulaşmış veya tümörleşmiş hücreleri ortadan kaldırabilen hücrelerdir. Bunun yanında makrofajlar (vücuttaki yabancı maddeleri fagosite eden, yani

“yiyip parçalayan” bağışıklık hücreleri) da artış göstermiştir. Bu durum, bağırsak mukozasında inflamasyonun (iltihaplanmanın) arttığını göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Polistiren mikroplastiklerin bağırsak bariyeri, mikrobiyota ve glikoz metabolizması üzerindeki etkilerinin şematik gösterimi. Saijo ve ark. (2025) çalışmasındaki grafik öğeleri temel alınarak Türkçeye çevrilmiş ve özgün biçimde yeniden düzenlenmiştir.

Ruminantlarda emilim–dağılım–eliminasyon dinamikleri, ön midelerin varlığı ve rumen mikrobiyotasının etkileri nedeniyle monogastriklerden farklılık gösterebilir. İn-vitro rumen çalışmalarında, yem matrisine karıştırılan mikroplastiklerin fermantasyon dengesini bozabildiği görülmüştür. Örneğin düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) parçacıkları gaz üretimini ve amonyak ($\text{NH}_3\text{-N}$) seviyelerini artırırken, yemin parçalanabilirliğini ve protozoa sayısını azaltmıştır; bu etkinin diğer polimerlerden daha belirgin olduğu rapor edilmiştir. Saha gözlemleri de bu bulguları desteklemektedir. İspanya’da yapılan bir çalışmada koyun dışkılarının %92’sinde mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Beriot ve ark., 2021). Benzer şekilde, Ekvador’da yürütülen bir araştırmada keçi dışkılarının %93’ünde mikroplastik tespit edilmiştir (González-Puetate ve ark., 2024). Bu veriler, ruminant dışkılarında mikroplastik kontaminasyonunun farklı kıtalarda yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Hollanda’da yapılan pilot bir çalışmada, 12 sığır ve 12 domuzun kan örneklerinin tamamında polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve stiren bazlı polimerlere ait sinyaller saptanmıştır. Ayrıca,

domuzların yaklaşık %40'ında polietilen tereftalat (PET), sığırların üçte birinde ise polipropilen (PP) bulunmuştur. Aynı çalışmada, süt örneklerinin çoğunda farklı plastik türleri tespit edilmiş, et örneklerinin yaklaşık %75'inde ise en az bir polimer bulunmuştur. Bu sonuçlar, ruminantlarda mikroplastiklerin büyük kısmının dışkıyla atıldığını, ancak düşük düzeyde de olsa kana ve ürünlere geçişin mümkün olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, işleme ve ekipman kaynaklı bulaşmanın da göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, gerçek endojen geçiş ile dış kaynaklı bulaşmayı ayırt edebilmek için daha kapsamlı ve standart yöntemlerle yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır. Chang ve ark. (2024), bireysel bölmelerde barındırılan Hulunbuir kuzularına 60 gün boyunca oral yolla farklı boyutlarda polistiren (PS) mikroplastikler (0, 25 ve 50 µm; 150 mg/gün) uygulayarak mikroplastik maruziyetinin fizyolojik ve metabolik etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular, partikül boyutu büyüdükçe jejunum epitelinde daha belirgin histolojik hasar oluştuğunu ve bu yapısal bozulmanın günlük canlı ağırlık artışında azalma, yemden yararlanma oranının düşmesi, besin maddesi sindirilebilirliğinin gerilemesi ve rumen pH'sında anlamlı bir düşüş gibi performans ve sindirim parametrelerindeki olumsuz değişikliklerle ilişkili olduğunu göstermiştir. Buna karşın, kuru madde tüketiminde ve rumen ile kolon epiteli morfolojisinde belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir. PS maruziyetinin rumen mikrobiyotasını da dikkate değer ölçüde yeniden şekillendirdiği görülmüş; Bacteroidetes, Prevotellaceae ve Actinobacteria gibi bazı mikrobiyal grupların relatif abundansı artarken, özellikle Coriobacteriales incertae sedis başta olmak üzere selüloz parçalayıcı mikroorganizma popülasyonlarında belirgin bir azalma kaydedilmiştir. Kan parametrelerinde gözlenen değişiklikler, oksidatif stres belirteçlerinin yükseldiğini ve inflamatuvar yanıtın aktive olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma, partikül boyutuna bağlı bu fizyolojik ve metabolik bozulmaların, longissimus lumborum kasında tespit edilen et kalite özelliklerindeki değişimlerle—özellikle kesme kuvveti, renk parametreleri ve pH farklılıklarıyla—ilişkili olabileceğini göstermiştir.

Dolaşıma geçen fraksiyonun hangi dokularda bulunduğu, kullanılan analitik yöntem ve modele bağlıdır. Tavuklarda karaciğer, ince bağırsak ve iskelet kası gibi dokularda PS, PET, PA6/PA66 varlığı spektroskopik olarak gösterilmiştir; özellikle kas dokusunda PA6 yüksek düzeydedir (Chen ve ark.,

2023). Elverişli deney koşullarında, yumurtacı tavuklarda tek doz [¹⁴C]-işaretli polistiren uygulamasında mikroplastiklerin yalnızca çok küçük bir kısmı emildiği; kan, dokular ve yumurtadaki toplam birikim %1'in altında kaldığı kanıtlanmıştır. Uygulanan dozun yaklaşık %97'si ilk 24 saat içinde dışkıyla uzaklaştırılmıştır. Eser düzeyde emilen PS'nin yumurta akı ve sarısına geçtiği yumurta akında erken saptanırken, sarıdaki düzey yaklaşık dördüncü günde en yüksek değerine ulaşmaktadır (Shelver ve ark., 2024).

Süt için de benzer bir ikilem söz konusudur: MP'nin kan-süt bariyerini aşabildiğine dair doğrudan, net kanıtlar sınırlıyken; sağım hatlarında boru/hortum/filtre aşınmasıyla eksojen bulaşma olasıdır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Pironti ve ark., 2021). Bu nedenle, biyolojik emilim ve süreç-kaynaklı bulaşmanın dikkatle birlikte değerlendirilmesi gerekir. Huerta Lwanga ve ark. (2017), iki tavuk dışkısı örneğinde kilogram başına 129.800 adet gibi son derece yüksek düzeyde mikroplastik bulunduğunu bildirmiştir. Buna karşın Wu ve ark. (2021), sekiz farklı tavuk çiftliğinden aldıkları çift numunelerde mikroplastik yoğunluğunu yalnızca 667 adet/kg yaş ağırlık olarak belirlemiştir; üstelik bu çalışma, Lwanga ve ark. (2017)'nin filtre boyutundan çok daha küçük olan 0.22 µm filtre kullanmasına rağmen daha düşük bir değer rapor etmiştir. Yan ve ark. (2020), çiftlik sayısını belirtmedikleri çalışmalarında incelenen 10 dışkı örneğinin 4'ünde mikroplastik tespit ederken, Yu ve ark. (2023) tek bir dışkı örneğinde 14.900 adet/kg mikroplastik belirlemiştir. Kanatlılarda mikroplastiklerin sindirim sürecinde nasıl parçalandığını doğrudan değerlendiren bir çalışma bulunmamaktadır; ancak mevcut bulgular bu olasılığı desteklemektedir. Örneğin Bilal ve ark. (2023), taşlıkta tespit edilen mikroplastiklerin kursakta bulunanlara kıyasla daha küçük boyutta olduğunu rapor etmiş ve bunun taşlığın güçlü kaslı öğütme işleviyle ilişkili olabileceğini öne sürmüştür. Benzer şekilde Huerta Lwanga ve ark. (2022), dışkıda bulunan mikroplastiklerin taşlıkta tespit edilenlerden daha küçük olduğunu göstererek, sindirim sürecinde parçalanmanın daha ileri düzeyde devam edebileceğine işaret etmiştir. Bu gözlemler, kanatlılarda mikroplastiklerin gastrointestinal sistem boyunca nasıl değişime uğradığını anlamak için daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Mevcut bulgular, kütle dengesi açısından yani mikroplastiklerin vücutta izlediği toplam yolun şöyle görüldüğünü göstermektedir: mikroplastikler çoğunlukla bağırsaktan

emilmeden geçer (transit); emilen küçük kısım sınırlı kalır; organlara dağılım düşüktür ve doku ile koşullara göre değişir; atılımın ana yolu ise dışkıdır. Bununla birlikte bu tablo; maruziyet dozu ve süresi, parçacık özellikleri (boyut, morfoloji, polimer tipi, yüzey kimyası), tür–yaş–fizyolojik durum ve kullanılan analitik yöntem duyarlıdır; gözlenen kinetik ve farklı matrislerdeki saptanabilirlik bu değişkenlere göre anlamlı biçimde değişebilir (Shelver ve ark., 2024; Chen ve ark., 2023; Abid ve ark., 2025). Analitik yöntem ile kullanılan ölçüm tekniğinin (Raman/FTIR, Py-GC-MS, LDIR) algılama sınırı ve seçiciliğinin sonucu etkileyebilir. Bu nedenle hem deney tasarımlarında hem de gıda güvenliği risk değerlendirmelerinde standartlaştırılmış protokoller, kontaminasyon kontrolü (blank/körler) ve matrise özgü yöntem doğrulaması vazgeçilmezdir. Matrise özgü doğrulama” ise, her örnek türü (kan, süt, et, dışkı vb.) için yöntemin gerçekten çalıştığını, yanlış pozitif/negatifleri ve geri kazanımı kontrol ederek kanıtlamayı ifade eder.

4. SONUÇ

Çiftlik hayvanlarında mikroplastik maruziyetinin uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak sucul ekosistemlerle ilişkilendirilmesine karşın, günümüzde karasal üretim sistemlerinde de giderek artan ve sistematik bir risk oluşturduğu net olarak görülmektedir. Bu bölümde sunulan kanıtlar, mikroplastiklerin kaynakları, hayvanlara ulaşma yolları ve vücut içindeki davranışlarının oldukça karmaşık ve çok katmanlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle yem tedarik zinciri, içme suyu hatları, barınak atmosferi ve tarımsal plastiklerin kullanımını gibi birden fazla temas noktası aynı anda devrede olduğundan, maruziyetin yönetilmesi her geçen gün daha da güç hale gelmektedir. Bu sebeple mikroplastikler yalnızca bir “çevresel kirlilik” unsuru olarak değil, yem güvenliği, hayvan sağlığı ve gıda güvenliği kesişiminde yer alan çok yönlü bir risk faktörü olarak ele alınmalıdır.

Mevcut bilimsel veriler, çiftlik hayvanlarının mikroplastikleri ağırlıklı olarak yem ve su yoluyla oral olarak aldığı ve bu parçacıkların büyük bölümünün bağırsaklardan emilmeden dışkıyla atıldığı yönünde tutarlıdır. Ancak dışkıyla uzaklaştırılma oranının yüksek olması, maruziyetin önemsiz olduğu anlamına gelmez. Zira boyutları küçük olan partiküller (özellikle <100 µm olanlar) bağırsak bariyerini geçerek oksidatif stres, inflamasyon, bağırsak geçirgenliğinde artış ve mikrobiyota dengesizlikleri gibi fizyolojik

değişikliklere yol açabilmektedir. Bu etkilerin ruminantlarda rumen fonksiyonlarını ve fermantasyon süreçlerini, monogastriklerde ise bağırsak epitel bütünlüğünü ve bağışıklık sistemini etkileyebildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla, geçmişte sıkça kabul edilen “mikroplastikler sadece sindirimden geçerek atılır” yaklaşımı günümüz verileriyle uyumlu değildir. Özellikle yoğun ve kapalı üretim sistemlerinde düşük seviyeli ancak sürekli maruziyetin zaman içinde subklinik ve kronik etkilere yol açma ihtimali göz ardı edilmemelidir.

Mikroplastiklerin biyolojik dokulara geçişinin düşük düzeylerde olduğu genel olarak doğru görünse de kas ve karaciğer gibi dokularda polimer izlerinin saptandığı saha çalışmaları, maruziyetin yalnızca pasif bir geçiş süreci olmadığını düşündürmektedir. Ancak bu bulguların yorumlanmasında önemli bir belirsizlik bulunmaktadır: bu polimerlerin ne kadarının gerçekten biyolojik geçişten ne kadarının ise örnekleme, laboratuvar işleme süreçleri veya ekipman kaynaklı kontaminasyondan kaynaklandığı kesin değildir. PET, PP veya PA6 gibi polimerlerin hem gıda işleme hatlarında hem de numune toplama ekipmanlarında yaygın olarak bulunması, yanlış pozitif sonuç olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmaların sıkı laboratuvar kontaminasyon kontrolleri, kör örnek uygulamaları ve matrise özgü doğrulama yöntemleri içermesi, sonuçların güvenilirliği açısından zorunludur.

Çiftlik düzeyinde değerlendirildiğinde, mikroplastiklerin hayvanlara girişindeki en önemli kaynak yemdir. Pelet yemler, balık unu, gıda atığı bazlı rasyonlar ve ambalaj malzemesi temasları maruziyeti artıran başlıca faktörlerdir. Özellikle balık unu gibi su ürünleri kökenli hammaddelerin zaten mikroplastik içeren dokulardan üretiliyor olması, yem kaynaklı kontaminasyonu daha kritik bir hale getirmektedir. Ayrıca mikroplastiklerin yalnızca küçük plastik parçalar değil, aynı zamanda yüzeylerinde ftalatlar, pestisitler, kalıcı organik kirleticiler ve ağır metaller taşıyabilen “kimyasal vektörler” olduğu düşünüldüğünde, riskin çok daha geniş bir çerçevede değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum, klasik hayvan besleme yaklaşımında fiziksel safsızlık olarak değerlendirilen olgunun bugün artık kimyasal ve biyolojik etkilerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Barınak içi hava ve toz da özellikle kümes hayvanlarında sanılandan

çok daha önemli bir maruziyet yolu olarak öne çıkmaktadır. Kapalı ortamlarda lif ve toz yoğunluklarının dış ortama göre oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Tekstil, ambalaj veya yem torbalarından kaynaklanan liflerin yem üzerine çökmesi; hayvanların solunum ve daha sonra yutma yoluyla bu parçacıkları sindirim kanalına taşımasına neden olmaktadır. Bu nedenle barınak havalandırması, toz kontrolü ve yüzey hijyeni yalnızca hayvan refahı açısından değil, mikroplastik maruziyetinin azaltılması açısından da kilit uygulamalardır.

Bu bölümde değerlendirilen veriler bir arada ele alındığında, çiftlik hayvanlarında mikroplastik kirliliğinin:

- Kaynaklarının çok çeşitli ve üretim sistemi boyunca süreklilik gösterdiği,
- Yem, su, hava ve çevresel toz yoluyla eşzamanlı çoklu maruziyet oluşturduğu,
- Emilim ve dokulara geçişin düşük düzeylerde olsa da tamamen göz ardı edilemeyeceği,
- Atılımın büyük ölçüde dışkı ile gerçekleştiği,
- Hayvansal ürünlere geçiş konusunda hem biyolojik hem de proses kaynaklı belirsizliklerin bulunduğu,
- Kontaminasyonun azaltılması için yem güvenliği, ekipman seçimi, ambalaj yapıları, atık yönetimi ve barınak hijyenini kapsayan çok yönlü müdahalelerin gerektiği,
- Türler arası karşılaştırmaların ancak standardize analiz yöntemleri geliştirildiğinde anlamlı hale gelebileceği

sonucunu ortaya koyduğu görülmektedir. Bu bağlamda mikroplastik maruziyetinin hem hayvan sağlığı hem de hayvansal ürün güvenliği üzerindeki etkilerinin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için “Tek Sağlık” yaklaşımını temel alan, disiplinler arası ve standardizasyona dayalı yeni bir araştırma altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulama boyutunda ise yem tedarik zincirindeki plastik temas yüzeylerinin azaltılması, balık unu ve gıda atığı bazlı hammaddelerin daha sıkı izlenmesi, su hatlarında plastik aşınmasının kontrol edilmesi, barınaklarda toz yönetiminin iyileştirilmesi ve plastik kullanımının mümkün olduğunca azaltılması, maruziyeti düşürmeye yönelik en etkin stratejiler arasında yer almaktadır.

Son dönem çalışmalar, mikroplastiklerin kanatlı ve diğer çiftlik

hayvanlarında oluşturduğu hücresel stres yanıtları ile üretim performansı arasındaki ilişkinin henüz tam olarak ortaya konmadığını göstermektedir. Özellikle oksidatif stres, inflamatuvar yanıt, apoptozis ve endokrin etkileşimlerin uzun dönem üretim kaybına nasıl yansıdığı belirsizdir. Mevcut veriler, mikroplastiklerin lokal doku etkileri ile makro düzeyde ekonomik sonuçlar arasında bir ‘bağlantı eksikliği’ olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle gelecekteki çalışmaların, hem gerçek çevresel mikroplastik tiplerini kullanması hem de performans verilerini eşzamanlı olarak değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında kullanılan mikroplastiklerin çoğu, tek bir polimer türünden oluşmakta ve genellikle çok yüksek konsantrasyonlarda uygulanmaktadır. Bu durum, hayvanların gerçek çevre koşullarında maruz kaldığı mikroplastik miktarlarını tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle gelecekteki araştırmalarda, çevrede gerçekten karşılaşılan daha düşük dozların, yaşlanmış (weathered) polimerlerin, farklı boyut ve türlerden oluşan karma mikroplastik karışımlarının ve düşük doz–uzun süreli maruziyet modellerinin öncelikli olarak ele alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, çiftlik hayvanlarında tespit edilen mikroplastik düzeyleri günümüzde düşük görünse de maruziyetin sürekliliği, parçacık çeşitliliği, kimyasal yükleri ve potansiyel biyolojik etkileri dikkate alındığında, bu konunun hem bilimsel hem de düzenleyici açıdan önümüzdeki dönemin en önemli araştırma başlıklarından biri olacağı açıktır. Hayvansal üretim sistemlerinde mikroplastik kontrolü sağlanmadığı sürece hem hayvan sağlığı hem de gıda güvenliği açısından risklerin devam edeceği unutulmamalıdır. Bu nedenle mikroplastikler, modern hayvancılıkta dikkate alınması şart olan yeni nesil bir kontaminant olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, *104*, 104456.
- Abid, K., Aroua, M., Barbera, S., Petrucco, S. G., Kaihara, H., Mahouachi, M., Ben Saïd, S., & Tassone, S. (2025). Effect of microplastic contamination on in vitro ruminal fermentation and feed degradability. *Animal Science Journal*, *96*, e70063.
- Adeyele, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., Fang, C., & Rahman, M. M. (2024). The unseen threat of the synergistic effects of microplastics and heavy metals in aquatic environments: A critical review. *Current Pollution Reports*, *10*(3), 478–497.
- Akanda, M. R., Kawsar, M. A., Sabuj, M. S. S., Ashik-Uz-Zaman, M., Siddiqui, M. S. I., & Hossain, M. A. (2025). Microplastic pollution in livestock farming in Bangladesh: A critical review of its key findings and mitigation strategies to address public health. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(7), 732.
- Allen, S., Allen, D., Moss, K., Le Roux, G., Phoenix, V. R., & Sonke, J. E. (2020). Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLOS ONE*, *15*(5), e0232746.
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, *12*(5), 339–344.
- Asati, S., Pandey, V., Gour, V., Tiwari, R., Soni, V., Rajpoot, K., Tekade, M., Sharma, M. C., & Tekade, R. K. (2022). Toxicity and toxicokinetic considerations in product development and drug research (Chapter 16). In R. K. Tekade (Ed.), *Pharmacokinetics and toxicokinetic considerations* (Vol. 2, pp. 401–424). Academic Press.
- Aves, A. R., Revell, L. E., Gaw, S., Ruffell, H., Schuddeboom, A., Wotherspoon, N. E., LaRue, M., & McDonald, A. J. (2022). First evidence of microplastics in Antarctic snow. *The Cryosphere Discussions*, *2022*, 1–31.

- Bilal, M., Taj, M., Ul Hassan, H., Yaqub, A., Shah, M. I. A., Sohail, M., Rafiq, N., Atique, U., Abbas, M., & Sultana, S. (2023). First report on microplastics quantification in poultry chicken and potential human health risks in Pakistan. *Toxics*, *11*(10), 612.
- Bruno, A., Dovizio, M., Milillo, C., Aruffo, E., Pesce, M., Gatta, M., Chiacchiaretta, P., Di Carlo, P., & Ballerini, P. (2024). Orally ingested micro- and nano-plastics: A hidden driver of inflammatory bowel disease and colorectal cancer. *Cancers*, *16*, 3079.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(4), 1212.
- Chang, X., Li, Y., Han, Y., Fang, Y., Xiang, H., Zhao, Z., Zhao, B., & Zhong, R. (2024). Polystyrene exposure induces lamb gastrointestinal injury, digestive disorders and inflammation, decreasing daily gain and meat quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *277*, 116389.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, *882*, 163305.
- Corte Pause, F., Urli, S., Crociati, M., Stradaoli, G., & Baufeld, A. (2024). Connecting the Dots: Livestock Animals as Missing Links in the Chain of Microplastic Contamination and Human Health. *Animals*, *14*(2), 350.
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Microplastic identification techniques. In C. B. Crawford & B. Quinn (Eds.), *Microplastic pollutants* (pp. 219–267).
- Critchell, K., & Hoogenboom, M. O. (2018). Effects of microplastic exposure on the body condition and behaviour of planktivorous reef fish (*Acanthochromis polyacanthus*). *PLOS ONE*, *13*(3), e0193308.
- Djouina, M., Loison, S., & Body-Malapel, M. (2024). Recent progress in intestinal toxicity of microplastics and nanoplastics: Systematic review of preclinical evidence. *Microplastics*, *3*(2), 217–233.
- Dong, X., Liu, X., Hou, Q., & Wang, Z. (2023). From natural environment to animal tissues: A review of microplastics (nanoplastics) translocation and hazards studies. *Science of the Total Environment*, *855*, 158686.

- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458.
- El Gazzar, W. B., Sliem, R. E., Bayoumi, H., Elsayed Nasr, H., Shabanah, M., Elalfy, A., Radwaan, S. E., Gebba, M. A., Mansour, H. M., Badr, A. M., Amer, M. F., Ashour, S. S., Morsi, H., Aboelkomsan, S. A. F., Baioumy, B., Hamid Sayed, A. E., & Farag, A. A. (2023). Melatonin alleviates intestinal barrier damaging effects induced by polyethylene microplastics in albino rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13619.
- Erdem, H., Gence, C. Ç., Öztürk, M., Buhan, E., Kholikulov, S. T., & Kaya, Y. (2025). Microplastics in soil increase cadmium toxicity: Implications for plant growth and nutrient imbalance. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236, 575.
- Espinosa, C., Beltrán, J. M. G., Esteban, M. A., & Cuesta, A. (2018). In vitro effects of virgin microplastics on fish head-kidney leucocyte activities. *Environmental Pollution*, 235, 30–38.
- Gehring, R., & van der Merwe, D. (2014). Toxicokinetic–toxicodynamic modelling (Chapter 8). In R. C. Gupta (Ed.), *Biomarkers in toxicology* (pp. 149–153). Academic Press.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782.
- González-Puetate, I., Martínez-Cepeda, G., Torres-Lasso, P., Chávez, K., & Guevara, G. (2024). Microplastics in ruminant feces in Ecuador. *Ciencia Veterinaria*, 26(2), 114–129.
- Habib, R. Z., Poulouse, V., Alsaidi, R., Al Kendi, R., Iftikhar, S. H., Mourad, A. H. I., Kittaneh, W. F., & Thiemann, T. (2022). Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(3), 609–619.
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Dugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., & Jonsson, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039–

- 1047.
- Hasegawa, T., & Nakaoka, M. (2021). Trophic transfer of microplastics from mysids to fish greatly exceeds direct ingestion from the water column. *Environmental Pollution*, 273, 116468.
- Hernandez, L. M., Yousefi, N., & Tufenkji, N. (2019). Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea. *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12300–12310.
- Hooge, A., Hauggaard-Nielsen, H., Heinze, W. M., Lyngsie, G., Ramos, T. M., Sandgaard, M. H., Vollertsen, J., & Syberg, K. (2023). Fate of microplastics in sewage sludge and in agricultural soils. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117184.
- Hou, L., Wang, D., Yin, K., Zhang, Y., Lu, H., Guo, T., Li, J., Zhao, H., & Xing, M. (2022). Polystyrene microplastics induce apoptosis in chicken testis via crosstalk between NF- κ B and Nrf2 pathways. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 262, 109444.
- Hu, L., Zhao, Y., & Xu, H. (2022). Trojan horse in the intestine: A review on the biotoxicity of microplastics combined environmental contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129652.
- HuertaLwanga, E., Mendoza-Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Segura, G. E., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7, 14071.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, N., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- Jeyasanta, I., Sathish, M. N., Patterson, J., Esmeralda, V. G., & Laju, L. R. (2024). Microplastics contamination in commercial fish meal and feed: A major concern in the cultured organisms. *Chemosphere*, 363, 142832.
- Jin, Y., Lu, L., Tu, W., Luo, T., & Fu, Z. (2019). Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of the Total Environment*, 649, 308–317.
- Kadac-Czapska, K., Knez, E., & Grembecka, M. (2022). Food and human safety: The impact of microplastics. *Critical Reviews in Food Science*

- and Nutrition*. Advance online publication.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzaud, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, *24*, 100489.
- Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., & Rizvi, Z. F. (2023). Impact of plastic mulching as a major source of microplastics in agroecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, *445*, 130455.
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, *50*(7), 3315–3326.
- Koelmans, A. A., Kooi, M., Law, K. L., & van Sebille, E. (2017). All is not lost: Deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters*, *12*(11), 114028.
- Kosuth, M., Mason, S. A., & Wattenberg, E. V. (2018). Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLOS ONE*, *13*(4), e0194970.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks—Are they immune from microplastics contamination? *Science of the Total Environment*, *714*, 136823.
- Leon, L. I. D., Bautista, I. M. R., Deza, A. G. M., Kok, J. F. F., Mundo, E. F. D., & VinceCruz-Abeledo, C. C. (2022). Microplastic fragments from poultry entrails in wet markets from South Caloocan, Philippines. *Research Square*.
- Li, B., Ding, Y., Cheng, X., Sheng, D., Xu, Z., Rong, Q., Wu, Y., Zhao, H., Ji, X., & Zhang, Y. (2020). Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice. *Chemosphere*, *244*, 125492.
- Li, H., Yang, Z., Jiang, F., Li, L., Li, Y., Zhang, M., Qi, Z., Ma, R., Zhang, Y., Fang, J., Chen, X., Geng, Y., Cao, Z., Pan, G., Yan, L., & Sun, W. (2023). Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research*, *216*, 114623.
- Liang, B., Zhong, Y., Huang, Y., Lin, X., Liu, J., Lin, L., Hu, M., Jiang, J., Dai, M., Wang, B., Zhang, B., Meng, H., Lelaka, J. J. J., Sui, H., Yang,

- X., & Huang, Z. (2021). Underestimated health risks: Polystyrene micro- and nanoplastics jointly induce intestinal barrier dysfunction by ROS-mediated epithelial cell apoptosis. *Particle and Fibre Toxicology*, 18, 20.
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status. *Food Chemistry*, 397, 133771.
- Maganti, S. S., & Akkina, R. C. (2023). Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 13(5), 348–356.
- Malik, A., Azam, S. M., Ambreen, M., Khan, R., Durrani, R., Ruby, T., Ahmad, S., Naqvi, S., Arshad, M., Zain ul Abideen, A., Sattar, N., Imtiaz, A., & Khan, A. A. (2025). Effect of microplastic ingestion on digestive enzymes, hormones, hematology, and serum biochemistry of *Gallus gallus domesticus*. *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 56(6), 1317–1326.
- Mekuanint, S., Alemneh, T., & Asredie, T. (2017). Indigestible rumen foreign bodies—Causes of rumen impaction in cattle, sheep and goats slaughtered at Addis Ababa abattoir enterprise, Ethiopia. *Journal of Veterinary Science and Medicine*, 5(1), 5.
- Meng, X., Yin, K., Zhang, Y., Wang, D., Lu, H., Hou, L., Zhao, H., & Xing, M. (2022). Polystyrene microplastics induced oxidative stress, inflammation and necroptosis via NF- κ B and RIP1/RIP3/MLKL pathway in chicken kidney. *Toxicology*, 478, 153296.
- Mohammadi, M., Dargahi, A., Almasi, A., Mousavi, S. A., & Mohammadi, P. (2025). Occurrence of microplastic, antibiotics, hormones, and heavy metals in livestock and poultry manure in west Iran. *Scientific Reports*, 15, 27228.
- Mohsen, M., Lin, J., Lu, K., Wang, L., & Zhang, C. (2024). Microplastic pollution in aquafeed of diverse aquaculture animals. *Heliyon*, 10(17).
- Monclús, L., McCann Smith, E., Ciesielski, T. M., Wagner, M., & Jaspers, V. L. B. (2022). Microplastic ingestion induces size-specific effects in Japanese quail. *Environmental Science & Technology*, 56(24), 15902–

15911.

- Muhib, M. I., & Rahman, M. M. (2023). Microplastics contamination in fish feeds: Characterization and potential exposure risk assessment for cultivated fish of Bangladesh. *Heliyon*, 9(9), e19789.
- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777–10779.
- Obeng, E. M., Hodge, C., & You, J. (2025). Microplastic pollution: A review of specific blood-tissue barrier breaches and health effects. *Environmental Pollution*, 126416.
- Oßmann, B., Schymanski, D., Ivleva, N. P., Fischer, D., Fischer, F., Dallmann, G., & Welle, F. (2019). Comment on “Exposure to microplastics (<10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study by Zuccarello et al. [Water Research 157 (2019) 365–371]”. *Water Research*, 162, 516–517.
- Papp, P. P., Hoffmann, O. I., Libisch, B., Keresztény, T., Geröcs, A., Posta, K., Hiripi, L., Hegyi, A., Gócza, E., Szőke, Z., & Olasz, F. (2024). Effects of polyvinyl chloride (PVC) microplastic particles on gut microbiota composition and health status in rabbit livestock. *International Journal of Molecular Sciences*, 25, 12646.
- Peixoto, D., Pinheiro, C., Amorim, J., Oliva-Teles, L., Guilhermino, L., & Vieira, M. N. (2019). Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 161–168.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: Intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Priyanka, M., & Dey, S. (2018). Ruminal impaction due to plastic materials—An increasing threat to ruminants and its impact on human health in developing countries. *Veterinary World*, 11(9), 1307.
- Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C. (2020). Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Science of the Total Environment*, 703, 134722.
- Ramage, S. J., Coull, M., Cooper, P., Campbell, C. D., Prabhu, R., Yates, K., Dawson, L. A., Devalla, S., & Pagaling, E. (2025). Microplastics in

- agricultural soils following sewage sludge applications: Evidence from a 25-year study. *Chemosphere*, 376, 144277.
- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2022). Evaluation of microplastic presence in yogurt production process. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 28(5), 633–641.
- Richardson, R. J. (2020). Toxicant interactions with macromolecular targets (Chapter 4). In *An introduction to interdisciplinary toxicology* (pp. 45–57). Academic Press.
- Saijo, Y., Hasegawa, Y., Okamura, T., Ono, Y., Ichikawa, T., Nakanishi, N., Tsuchimura, Y., Morioka, T., Tanaka, S., Takano, H., Hamaguchi, M., & Fukui, M. (2025). Negative impact of oral exposure to polystyrene microplastics on glucose tolerance and intestinal environment in mice is independent of particle size. *Environmental Sciences Europe*, 37(125), 1–16.
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162.
- Sheehan, K. L., Lawson, P., & Emerson, B. (2022). Fate of plastics in cattle digestive systems. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 28(3), 205–214.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of the Total Environment*, 909, 168512.
- Sheriff, I., Yusoff, M. S., & Halim, H. B. (2023). Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104039.
- Shufol, M. B. A., Riya, K. K., Hossain, M. K., Albeshr, M. F., Arai, T., Yu, J., Ngah, N., & Hossain, M. B. (2025). Microplastic contamination in highly consumed wild and cultured Asian seabass from a subtropical coastal region: Exposure and consumer risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107867.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics

- in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386.
- Susanti, R., Yuniastuti, A., & Fibriana, F. (2021). The evidence of microplastic contamination in central Javanese local ducks from intensive animal husbandry. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 178.
- Thiele, C. J., Hudson, M. D., Russell, A. E., Saluveer, M., & Sidaoui-Haddad, G. (2021). Microplastics in fish and fishmeal: An emerging environmental challenge? *Scientific Reports*, 11(1), 2045.
- Toto, B., Refosco, A., O’Keeffe, M., Barkhald, Ø. H., Brønstad, A., Lied, G. A., Yadetie, F., Goksøyr, A., Kögel, T., & Dierkes, J. (2022). Intestinal permeability and gene expression after polyethylene and polyamide microplastic ingestion in Wistar rats. *Toxicology Letters*, 370, 35–41.
- Toussaint, B., Raffael, B., Angers, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio Echevarria, I. M., & Van den Eede, G. (2019). Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain. Joint Research Centre (European Commission). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(5), 639–673.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study* (Report EH22-01). Vrije Universiteit Amsterdam.
- Visentin, E., Niero, G., Benetti, F., O’Donnell, C., & De Marchi, M. (2025). Assessing microplastic contamination in milk and dairy products. *NPJ Science of Food*, 9(1), 135.
- Walkinshaw, C., Tolhurst, T. J., Lindeque, P. K., Thompson, R., & Cole, M. (2022). Detection and characterisation of microplastics and microfibrils in fishmeal and soybean meal. *Marine Pollution Bulletin*, 185, 114189.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Xu, J., Bi, W., Hua, L., Cheng, Z., Wang, Y., Li, D., Liu, W., Wang, L., & Sun, H. (2022). Wide occurrence of seven phthalate plasticizers and two typical microplastics in pig feed. *Chemosphere*, 307, 135847.

- Yan, Z., Zhao, H., Zhao, Y., Zhu, Q., Qiao, R., Ren, H., & Zhang, Y. (2020). An efficient method for extracting microplastics from feces of different species. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121489.
- Yu, X., Zhou, Z.-C., Shuai, X.-Y., Lin, Z.-J., Liu, Z., Zhou, J.-Y., Lin, Y.-H., Zeng, G.-S., Ge, Z., & Chen, H. (2023). Microplastics exacerbate co-occurrence and horizontal transfer of antibiotic resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131130.
- Zhang, M., & Xu, L. (2022). Transport of micro- and nanoplastics in the environment: Trojan-Horse effect for organic contaminants. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(5), 810–846.
- Zimmermann, L., Geueke, B., Parkinson, L. V., Schür, C., Wagner, M., & Muncke, J. (2025). Food contact articles as source of micro- and nanoplastics: A systematic evidence map. *NPJ Science of Food*, 9(1), 111.