

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

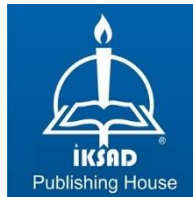
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR

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, 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

BÖLÜM 12

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

Prof. Dr. Arda YILDIRIM¹
Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI²

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048993>

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

² Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Ankara/Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-3333-1490, E-posta: emevliyaogullari@baskent.edu.tr

GİRİŞ

Plastik kirliliği, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve halk sağlığı boyutları olan karmaşık bir “Tek Sağlık” meselesi olarak ele alınmaktadır. Küresel plastik üretiminin 430 milyon tonu aştığı ve bunun yaklaşık üçte ikisinin kısa ömürlü ürünler olduğu, dolayısıyla hızla atığa dönüştüğü bildirilmektedir (Naz ve ark., 2024). Bu atıkların önemli bir kısmı, yetersiz atık yönetimi, geri dönüşümdeki sınırlılıklar ve tek kullanımlık ürünlere bağımlılık nedeniyle çevreye kontrolsüz biçimde yayılmakta; makroplastikler zamanla parçalanarak mikroplastik (MP) ve nanoplastik boyutuna inmektedir (Al Nahian ve ark., 2023; Pourebrahimi ve Pirooz, 2023; Sharma ve Vidarthi, 2024). Mikroplastikler, genel olarak 0.1 µm ile 5 mm arasındaki plastik partiküller olarak tanımlanmakta; polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), poliamid (PA), polietilen tereftalat (PET) ve polikarbonat (PC) gibi yaygın polimerlerden oluşabilmektedir (Kadaczapska ve ark., 2022; Olmo ve Holman, 2025). Bu partiküller üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinin hemen her aşamasında çevreye sızmakta; sucul ortamlar, toprak, atmosfer ve nihayetinde bitkisel ve hayvansal gıdalara kadar ulaşmaktadır (Solayman ve ark., 2026). Başlangıçta araştırmalar daha çok deniz ekosistemleri ve su ürünleri üzerine yoğunlaşmışken, son yıllarda karasal gıda hayvanlarında da anlamlı mikroplastik maruziyeti olduğu gösterilmiştir (Toussaint ve ark., 2019; Yıldırım ve Buhan, 2025a). Süt, kırmızı et, tavuk eti ve yumurta gibi temel hayvansal ürünlerde mikroplastik varlığı rapor edilmiş; bu bulgular çiftlik hayvanlarının yem, su, hava ve tarımsal plastikler üzerinden nasıl ve ne düzeyde maruz kaldığının sistematik olarak değerlendirilmesini zorunlu hâle getirmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Kedziński ve ark., 2020; van der Veen ve ark., 2022; Liu ve ark., 2022; Yıldırım ve Buhan, 2025b). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), 150 µm’den büyük plastik partiküllerinin çoğunun dışkıyla atıldığını; buna karşılık daha küçük partiküllerin bağırsak bariyerini aşarak doku ve organlara taşınabileceğini bildirmiştir (EFSA, 2016). Nitekim doğal maruziyet koşullarında, sığır dışkısında 74–50.583 parçacık/kg, tavuk dışkısında 667–129.800 parçacık/kg ve domuz dışkısında 0–112.000 parçacık/kg düzeylerinde mikroplastik rapor edilmiştir (Wu ve ark., 2021; Huerta Lwanga ve ark., 2017; Beriot ve ark., 2021). Bununla birlikte, bu dışkısal atılımın

yalnızca bir “çıktı göstergesi” olduğu; gerçek sistemik maruziyetin değerlendirilmesi için dokulardaki birikim düzeylerinin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Etlik piliçlerde jejunum, karaciğer, but ve göğüs kasında 2.2–1751.4 mg/kg aralığında mikroplastik yükü bildirildiği; perakende kırmızı et örneklerinde ise 53–7700 mg/kg düzeylerine ulaşılabildiği belirtilmektedir (Chen ve ark., 2023; van der Veen ve ark., 2022; Olmo ve Holman, 2025; Yıldırım ve Buhan, 2025b). Çalışmaların bir kısmı mg/kg, bir kısmı partikül/kg birimi kullanmaktadır; doğrudan karşılaştırma zordur. Çiftlik hayvanlarının maruziyet yolları incelendiğinde, tarımsal peyzajın hemen her bileşeninin mikroplastik açısından potansiyel bir kaynak olduğu görülmektedir. Sera ve silaj örtüleri, plastik malçlar, atık çamuru ve kanalizasyon çamuru gibi organik gübreler, geri kazanılmış atık suyla sulama, plastik boru ve vanalar, yem üretim zincirinde kullanılan paketleme materyalleri ve genel çiftlik ekipmanları başlıca giriş kapıları olarak tanımlanmaktadır (Rodríguez-Seijo ve Pereira, 2019; Beriot ve ark., 2021; Wu ve ark., 2021; Ziajahromi ve ark., 2024; Olmo ve Holman, 2025). UV ışınları, mekanik aşınma ve sıcaklık–nem dalgalanmaları gibi faktörler bu materyallerin parçalanma hızını artırarak mikroplastik yükünü daha da yükseltmektedir (Siddiqui ve ark., 2023; Solayman ve ark., 2026). Mikroplastiklerin çiftlik hayvanlarındaki biyolojik etkileri hem partikülün fiziksel varlığı hem de taşıdığı kimyasal yük üzerinden iki boyutlu bir risk tablosu oluşturmaktadır. Polimer yüzeyleri; kalıcı organik kirleticiler (PCB, DDT türevleri, PBDE), pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar ve ağır metaller gibi toksik maddeleri adsorbe ederek bunların sindirim sistemi üzerinden organizmaya taşınmasına aracılık edebilmektedir (Campanale ve ark., 2020; Wu ve ark., 2021; Adeleye ve ark., 2024). Deneysel çalışmalarda, özellikle polistiren ve polietilen bazlı mikro/nanoplastiklerin bağırsak bariyer bütünlüğünün bozulması, oksidatif stres belirteçlerinde artış, inflamatuvar yanıtın uyarılması, mikrobiyotada dengesizlik ve çeşitli organlarda apoptoz ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Blackburn ve Green, 2022; El Gazzar ve ark., 2023; Djouina ve ark., 2024). Kanatlılarda yürütülen güncel çalışmalar, bu etkilerin yalnızca teorik bir risk olmadığını ortaya koymaktadır. Abd El-Hack ve ark. (2025), mikroplastiklerin bağırsak fonksiyonu, bağışıklık sistemi ve üretim performansı üzerindeki olası olumsuz etkilerini detaylı biçimde tartışmakta; orta Doğu’da satışı sunulan tavuk etlerinde gram başına 0.03–

1.19 partikül düzeylerinde mikroplastik tespit edildiğini bildirmektedir. Japon bildircinlerinde yapılan deneysel bir çalışmada ise mikroplastik maruziyetinin dalak dokusunda mikroyapısal hasar, hücresel düzensizlik, oksidatif stres ve inflamasyonla ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2024; Abd El-Hack ve ark., 2025). Öte yandan, insan sağlığı açısından bakıldığında, mikroplastiklerin gıdalar, içme suyu ve solunum yoluyla vücuda girdiği; gastrointestinal sistemin temel giriş yolu olduğu kabul edilmektedir (Kadaczapska ve ark., 2022). Tavuk eti, kırmızı et, süt ürünleri, balık, kabuklu deniz ürünleri, sofr tuzu, şeker, bal, meyve ve sebzeler gibi çok sayıda gıda grubunda farklı polimerlere ait mikroplastiklerin varlığı gösterilmiş; bu parçacıkların boyutu küçüldükçe toksik potansiyellerinin arttığı vurgulanmıştır (Obmann ve ark., 2019; Schymanski ve ark., 2018). Politika ve düzenlemeler düzeyinde bakıldığında, plastik üretimi ve atık oluşumunun geldiği nokta, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda jeopolitik ve ekonomik bir sorun olarak da değerlendirilmektedir. Avrupa Parlamentosu ve ulusal bilimsel ofisler, plastiklerin sağlık etkilerine ilişkin bilimsel kanıtları derleyerek müzakere süreçlerine girdi sağlamaya çalışmakta; örneğin Fransız Parlamentosu Bilimsel Seçenekler Ofisi (OPECST), mikro- ve nanoplastiklerin insan vücudunda ve hücre düzeyinde birikimine karşın, hâlâ standart bir biyomonitoring metodunun bulunmadığına dikkat çekmektedir (OPECST, 2024). Benzer şekilde İsviçre’de yayımlanan bir sağlık–çevre derlemesi, plastik katkı maddelerinin (yumuşatıcılar, stabilizatörler vb.) ve mikro/nanoplastiklerin tıbbi uygulamalar dâhil pek çok alanda görünmez ama sürekli bir maruziyet kaynağı hâline geldiğini vurgulamaktadır (Wiesinger, 2024).

Bu kitapta yer alan “Çiftlik Hayvanlarında Mikroplastik Kaynakları ve Maruziyet Yolları” ve “Hayvansal Ürünlerde Mikroplastikler” başlıklı bölümlerde, çiftlik düzeyindeki maruziyet yolları ile ürün bazlı kontaminasyon desenleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır (Yıldırım ve Buhan, 2025a; 2025b). Bu üçüncü bölümde ise, aynı konuyu “Soru ve Cevaplarla” ele alarak; okuyucuların mikroplastik–hayvan–insan ilişkisini hem mekanistik düzeyde hem de pratik hayvancılık uygulamaları bağlamında daha iyi kavrayabilmeleri amaçlanmaktadır.

Sorular, üç temel konu etrafında yapılandırılmıştır. İlk olarak, mikroplastiklerle ilgili güncel bilgiler ele alınmaktadır. Bu bölümde

mikroplastiklerin ne olduğu, nasıl sınıflandırıldığı, çevrede nasıl hareket ettiği ve çiftlik hayvanlarının bu parçacıklara hangi yollarla maruz kaldığı açıklanmaktadır. Ayrıca mikroplastiklerin hayvan vücudunda hangi dokularda birikebildiği üzerinde durulmaktadır. İkinci odak noktası, mikroplastiklerin yaratabileceği risklerdir. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı, büyüme ve verim performansı, et-süt-yumurta gibi hayvansal ürünlerin kalitesi ve tüketici güveni üzerindeki olası etkileri, ayrıca Tek Sağlık (One Health) yaklaşımıyla insan sağlığına yansıyan sonuçları değerlendirilmektedir. Üçüncü odak noktası ise geleceğe yöneliktir. Bu bölümde mevcut çalışmaların yöntemsel eksikleri, literatürdeki bilgi boşlukları, mikroplastiklere ilişkin düzenleme ve mevzuattaki belirsizlikler ile hayvan besleme açısından maruziyeti azaltmaya yönelik stratejiler ve gelecekte öne çıkması beklenen araştırma alanları ele alınmaktadır. Bu bölümün amacı, mevcut literatürü bilimsel bir çerçevede özetlerken aynı zamanda konuyla ilgilenen okurları özellikle öğrencileri ve genç araştırmacıları mikroplastiklerin hayvansal üretim ve gıda güvenliği bağlamındaki çok katmanlı etkilerini eleştirel ve analitik bir bakış açısıyla değerlendirmeye yönlendirmektir. Böylece bölüm hem bilgi aktarımı hem de düşünsel farkındalık kazandırma işlevini birlikte yerine getirmeyi hedeflemektedir.

1. SORU VE CEVAPLARLA ÇİFTLİK HAYVANLARINDA MİKROPLASTİKLER

1. Mikroplastik nedir? Hangi özellikleri onları hayvansal üretim açısından riskli hâle getirir?

Cevap: Mikroplastikler, boyutu 1 µm–5 mm arasında değişen ve çevrede büyük plastiklerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçlerle parçalanması sonucu oluşan plastik partiküllerdir (Liu ve ark., 2022). Birincil mikroplastikler doğrudan küçük üretilirken, ikincil mikroplastikler UV ışığı, sıcaklık ve mekanik aşınma sonucu çevrede oluşur (Geyer ve ark., 2017). Hayvansal üretim açısından risk oluşturmalarının temel nedenleri; (i) tarımsal plastik kullanımının yoğunluğu (silaj örtüleri, sulama boruları, ambalaj materyalleri), (ii) yem tedarik zincirinin plastikle sürekli temas hâlinde olması, (iii) bu parçacıkların sindirim sisteminde fiziksel tahriş, mikrobiyota değişimi ve oksidatif stres gibi biyolojik etkiler oluşturabilmesidir (Abd El-

Hack ve ark., 2025). Ayrıca mikroplastiklerin yüzeyleri, PAH'lar, pestisitler ve ağır metaller gibi toksik maddeleri adsorbe edebildiği için hayvanda "taşıyıcı kirletici" işlevi görebilir (Campanale ve ark., 2020). Bu nedenle mikroplastikler hem yem güvenliği hem hayvan sağlığı hem de insan tüketimi açısından önem taşır.

2. Küresel plastik üretimindeki artış ile mikroplastik kirliliği arasındaki ilişki nedir? Hayvan besleme açısından ne ifade eder?

Cevap: Plastik üretimi 1950'den bu yana 200 kat artmış ve günümüzde yıllık 430 milyon tonu aşmıştır (Naz ve ark., 2024). Geri dönüşüm oranı dünya genelinde yalnızca %9 civarındadır; geri kalanı yakılmakta, depolanmakta veya doğrudan çevreye yayılmaktadır (Al Nahian ve ark., 2023). Çevreye yayılan bu plastikler zamanla mikro- ve nanoplastiklere parçalanmakta, toprak, su ve hava yoluyla tarımsal sistemin her aşamasına girmektedir. Hayvan besleme açısından bu durum iki kritik sonuca yol açar: (i) Yem hammaddelerinde, özellikle tahıllarda, yağlı tohum küspelerinde ve balık ununda giderek artan bir mikroplastik arka plan seviyesi oluşur; (ii) Çiftlik hayvanlarının doğal maruziyeti kronik ve düşük dozlu bir yapıya dönüşür. Dolayısıyla plastik üretimindeki kontrolsüz artış, yem güvenliğini etkileyen "görünmez ama sürekli" bir riskin giderek büyümesi anlamına gelir ve bu risk Tek Sağlık (One Health) çerçevesinde değerlendirilmelidir.

3. Çiftlik hayvanlarında mikroplastik maruziyetinin başlıca kaynakları nelerdir?

Cevap: Mikroplastik maruziyeti üç ana yolla gerçekleşir: oral, inhalasyon ve mukozal temas. Oral alım en önemli yoldur; çünkü mikroplastikler yem hammaddelerinde, hazır yemlerde, plastik big-bag çuvalarda, yem nakil sistemlerinde ve içme suyu hatlarında tespit edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Merada otlayan ruminantlar ayrıca toprakla birlikte anlamlı miktarda mikroplastik yutabilmektedir (Beriot ve ark., 2021). İnhalasyon yoluyla maruziyet, özellikle kümes havasındaki plastik lifler, sentetik tekstil parçacıkları ve aşınmış ekipman tozlarıyla ilişkilidir (Wu ve ark., 2021). Üçüncü yol olan mukozal temas, özellikle göz ve burun aracılığıyla alınan partiküllerin tekrar yutulması şeklinde dolaylı bir maruziyet oluşturur. En riskli kaynaklar plastik silaj örtüleri, aşınmış PVC sulama sistemleri, plastik yem çuvaları, big-bag'ler, tarımsal malçlar ve ambalaj

materyalleridir.

4. Yemlerde ve yem hammaddelerinde mikroplastik kontaminasyonu nasıl oluşur? Hangi yemler daha yüksek risk taşır?

Cevap: Yemlerdeki mikroplastik kontaminasyonu üç ana mekanizma ile oluşur: (i) Hammaddenin yetiştirilme ortamındaki çevresel kirlilik (örneğin plastik malç ve kanalizasyon çamuru kullanılan tarlalarda), (ii) İşleme–taşıma–ambalajlama süreçlerinde plastik aşınması, (iii) Depolama sırasında yırtık, aşınmış veya UV’ye maruz kalmış ambalajlardan mikroplastik dökülmesi. Literatürde en yüksek risk grupları; balık unu ve deniz kökenli yemler, yoğun plastik ambalaj kullanılan ticari yemler, kurak ve rüzgârlı bölgelerde toz-toprakla temas eden açık depolanan tahıllar olarak bildirilmiştir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Ayrıca silaj örtülerinin aşınması ruminant yemlerinde önemli bir kaynak olabilir. Yem zinciri boyunca plastik kullanımının azaltılması, en kritik önleyici adımlardan biridir.

5. Mikroplastikler sindirim kanalında nasıl davranır? Hangi koşullarda emilir veya dışkıyla atılır?

Cevap: Sindirim kanalındaki davranış büyük ölçüde partikül boyutu, şekli, polimer türü ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Büyük partiküller (>100–150 µm) genellikle emilmez ve bağırsak boyunca transit geçerek dışkıyla atılır (EFSA, 2016). Ancak bu süreçte mukozada irritasyon, yüzey zedelenmesi ve hafif inflamasyon görülebilir. Küçük mikroplastikler (<20–30 µm) ve özellikle nanoplastikler, M-hücreleri veya endositoz mekanizmaları üzerinden sınırlı da olsa kana geçebilir ve karaciğer, böbrek ve dalak gibi dokulara taşınabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Deneysel araştırmalarda bağırsak mikrobiyotasında değişimler, oksidatif stres artışı ve sıkı bağlantı proteinlerinin zayıflaması gibi etkiler bildirilmiştir. Bununla birlikte mevcut çalışmaların çoğu yüksek dozlu maruziyet modellerine dayanmaktadır; bu nedenle çevresel düzeydeki kronik maruziyetin gerçek biyolojik etkileri hâlen tam olarak net değildir.

6. Mikroplastiklerin boyutu, şekli ve polimer yapısı hayvan vücudundaki biyolojik etkileri nasıl belirler?

Cevap: Mikroplastiklerin biyolojik etkilerinde boyut, şekil ve polimer türü belirleyici üç temel parametredir. Boyut küçüldükçe emilme ve dokuya geçme olasılığı artar; özellikle <20 µm partiküllerin bağırsak bariyerini

aşabildiği, nanoplastiklerin ise hücrel ve subhüresel yapılara ulaşabildiği gösterilmiştir (EFSA, 2016). Şekil de önemlidir; lifsi yapıdaki plastikler (örneğin tekstil kaynaklı mikro-lifler) mukozada daha fazla mekanik tahriş yaratabilirken, düzensiz parçacıklar yüzey alanı fazla olduğu için toksik maddeleri daha çok adsorbe edebilir (Olmo ve Holman, 2025). Polimer türü ise kimyasal yükü belirler: PVC ve PS daha yüksek katkı maddesi ve NIAS bileşik içerirken, PE ve PP çevrede adsorbe ettiği kirleticilerle toksisitesini artırabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bu nedenle mikroplastiklerin toksik etkisi sadece “parçacık sayısı” ile değil, parçacığın fiziksel ve kimyasal özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

7. Mikroplastikler sadece fiziksel tahriş mi yapar, yoksa biyolojik süreçleri de etkiler mi?

Cevap: Güncel çalışmalar mikroplastiklerin yalnızca mekanik partiküller olmadığını, çok yönlü biyolojik etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Hayvan modellerinde bağırsak epitel bütünlüğünün bozulması, sıkı bağlantı proteinlerinin azalması ve “sızdıran bağırsak” benzeri durumlar bildirilmiştir (Abd El-Hack ve ark., 2025; Saijo ve ark., 2025). Mikrobiyotada faydalı bakterilerin azalması ve potansiyel patojenlerin artması şeklinde disbiyozis oluşabilir (Wu ve ark., 2021). Mikroplastikler aynı zamanda inflamasyon, oksidatif stres ve hücrel hasarı tetikleyebilir; lipid peroksidasyonu ve antioksidan enzimlerde artış bu etkinin göstergeleridir (Blackburn ve Green, 2022). Yüksek doz kullanılan deneylerde büyüme performansında düşüş, yemden yararlanmanın bozulması ve dokularda histopatolojik hasar gözlenmiştir. Bu nedenle mikroplastikler hem fiziksel hem immünolojik hem de metabolik süreçlerde etkili olan “aktif biyolojik stresörler” olarak değerlendirilmelidir.

8. Mikroplastiklerin taşıdığı katkı maddeleri ve adsorbe ettiği çevresel kirleticiler neden önemlidir?

Cevap: Plastik maddeler sadece polimerden oluşmaz; üretim sırasında plastifiyanlar, UV stabilizatörleri, antioksidanlar, boya ve alev geciktiriciler gibi yüzlerce katkı maddesi eklenir (Campanale ve ark., 2020). Ayrıca üretim sürecinde oluşan istenmeyen NIAS bileşikleri de toksisiteye katkıda bulunabilir. Mikroplastiklerin hidrofobik yüzeyleri çevredeki PAH’lar, PCB’ler, pestisitler ve ağır metal komplekslerini kolayca adsorbe eder.

Böylece mikroplastikler bir “taşıyıcı platform” gibi davranarak adsorbe ettiği toksinleri hayvan dokularına taşıyabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bu durum hem kimyasal yükün artmasına hem de toksisitenin sinerjik şekilde güçlenmesine yol açar. Ayrıca bağırsak epitel bütünlüğünün bozulması diğer kirleticilerin emilimini artırabilir. Dolayısıyla mikroplastiklerin etkisi, yalnızca polimer yapısına değil, üzerlerine bağlı karmaşık kimyasal kokteyle de bağlıdır.

9. Çiftlik hayvanlarının dokularında mikroplastik birikimi hangi koşullarda ortaya çıkar?

Cevap: Doku birikimi, genellikle küçük partiküllerin (<20–30 µm) bağırsak bariyerini aşarak dolaşıma geçmesiyle ilişkilidir (EFSA, 2016). Jejunumdan portal dolaşıma geçen partiküller başta karaciğer olmak üzere dalak, böbrek ve lenfoid dokulara taşınabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Kas dokusunda tespit edilen mikroplastiklerin bir kısmı sistemik dolaşım ile gelen gerçek birikim olabilir; bir kısmı ise kesim ve işleme sırasında oluşan eksojen kontaminasyona bağlıdır (Yıldırım ve Buhan, 2025b). Ruminantlarda işkembede plastik lif birikimi olasılığı tartışılrsa da doğrulayan veri sınırlıdır. Doku birikimini artıran risk faktörleri arasında kronik maruziyet, yüksek yüzey alanlı partiküller, lifsi yapıdaki plastikler, oksidatif stres koşulları ve bağırsak bariyer bütünlüğünü bozacak diğer stresörler (mikotoksinler, sıcaklık stresi) yer alır. Ancak doğal saha düzeyinde birikimin tam boyutu hâlâ belirsizdir.

10. Et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerde tespit edilen mikroplastiklerin kaynağı nedir? Endojen geçiş mi, eksojen kontaminasyon mu?

Cevap: Her iki mekanizma da mümkündür ve çoğu zaman birlikte görülür. Endojen geçiş, hayvanın yem, su ve çevreden aldığı küçük boyutlu mikroplastiklerin bağırsak bariyerini aşarak dokulara taşınmasıyla oluşur; özellikle karaciğer, bağırsak ve kas dokusunda bu durum daha net rapor edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Eksojen kontaminasyon ise kesim, işleme, ekipman, su püskürtme sistemleri, plastik kasalar, ambalaj materyalleri ve depolama aşamalarında oluşur (Yıldırım ve Buhan, 2025b). Et ürünlerinde tespit edilen mikroplastiklerin önemli bir kısmının ambalaj kaynaklı olabileceği gösterilmiştir. Süt ve yumurtada ise kabuk/dış ortam

kontaminasyonu ile gerçek sistemik geçişin ayrımı halen zordur. Bu nedenle hayvansal ürünlerde bulunan mikroplastikleri değerlendirirken hem hayvanın biyolojik maruziyeti hem de post-harvest süreçlerin hijyeni birlikte incelenmelidir.

11. Mikroplastiklerin diğer yem kirleticileri (mikotoksinler, ağır metaller, pestisitler) ile birleştiğinde oluşturduğu “kokteyl etkisi” hangi bilimsel soruları gündeme getirir?

Cevap: Mikroplastikler, hem bağırsak epitelinde fiziksel hasar oluşturabilmeleri hem de kimyasal kirleticileri adsorbe ederek taşıyabilmeleri nedeniyle çoklu kirleticilerle etkileşime açık bileşik bir risk tablosu yaratır. Mikotoksinler (AFB1, DON), ağır metaller (Pb, Cd), pestisit kalıntıları ve veteriner ilaçları ile birlikte alındığında iki temel mekanizma önem kazanır: (i) Mikroplastiklerin bağırsak bariyerini zayıflatması, diğer toksinlerin emilimini artırabilir; (ii) Mikroplastik yüzeylerine adsorbe olan kirleticiler, partikül vücut dokularına geçtiğinde bu toksinleri de beraberinde taşıyabilir (Kadac-Czapska ve ark., 2022). Bilimsel açıdan yanıtı açık olmayan sorular arasında; bu kirleticilerin sinerjik mi yoksa antagonistik mi etkileştiği, hangi kirletici kombinasyonlarının daha tehlikeli olduğu ve kronik düşük doz maruziyetin uzun dönem fizyolojik etkilerinin ne olduğu yer alır. Bu nedenle gelecekte mikroplastikler tek başına değil, “çoklu kirletici–bileşik etki modelleri” içinde değerlendirilmelidir.

12. Mikroplastik maruziyeti hayvan performansını (büyüme, yemden yararlanma, süt verimi, yumurta verimi) nasıl etkileyebilir?

Cevap: Hayvan performansı üzerindeki etkiler, çoğunlukla bağırsak sağlığında meydana gelen bozulmalara bağlıdır. Mikroplastikler bağırsak epitelinin bütünlüğünü azaltarak sindirim–emilim kapasitesini düşürebilir; sıkı bağlantı proteinlerini zayıflatarak “sızdıran bağırsak” sendromuna benzer bir durum yaratabilir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Mikrobiyotadaki dengesizlikler fermentasyon ürünlerini (örneğin kısa zincirli yağ asitleri) etkileyebilir ve yemden yararlanmayı düşürebilir. Yüksek doz kullanılan deneysel çalışmalarda canlı ağırlık artışında azalma, yemden yararlanma oranında bozulma, yumurta kabuk kalitesinde düşüş ve bazı durumlarda karaciğer ağırlığında artış rapor edilmiştir (Olmo ve Holman, 2025). Ancak çevresel gerçekliğe daha yakın düşük doz–uzun süreli çalışmalarda sonuçlar

sınırlı ve heterojendir. Bu nedenle performans etkilerini kesinleştirmek için kronik saha düzeyini simüle eden deneyler gereklidir.

13. Mikroplastikler üreme sistemi, embriyonik gelişim ve transgenerasyonel etkiler açısından risk oluşturur mu?

Cevap: Bu alandaki veriler sınırlı olmakla birlikte, özellikle küçük partiküllerin (<10 µm) ve nanoplastiklerin biyolojik bariyerleri aşabilmesi nedeniyle potansiyel risk söz konusudur. İnsan tıbbında plasenta ve testis dokusunda mikroplastik tespiti (Ragusa ve ark., 2021; Braun ve ark., 2021; Hu ve ark., 2024) bu riskin hayvanlarda da araştırılması gerektiğini göstermektedir. Kanatlılarda yapılan bazı deneysel çalışmalarda mikroplastik maruziyetinin sperm kalitesi, endokrin yanıt ve ovaryum dokusunda stres göstergeleri üzerinden etkili olabileceğine dair bulgular vardır (Abd El-Hack ve ark., 2025). Embriyonik gelişim konusunda ise nano boyutlu plastiklerin teori olarak yumurta içi ortama geçebileceği öne sürülmektedir, ancak kanıt henüz sınırlıdır. Transgenerasyonel etkiler (epigenetik değişiklikler, yavru performansı, bağışıklık duyarlılığı) günümüzde neredeyse tamamen çalışılmamış bir konudur ve gelecekte yüksek öncelikli araştırma alanlarından biri olacaktır.

14. Mikroplastiklerin halk sağlığı boyutu nedir? Hayvansal ürünler bu riskin insanlara taşınmasında nasıl bir rol oynar?

Cevap: Mikroplastiklerin insanlarda bağırsak, akciğer, damar plakları ve plasenta gibi dokularda bulunması (OPECST, 2024) maruziyetin yaygın ve çok katmanlı olduğunu göstermektedir. Hayvansal ürünler bu risk zincirinde iki şekilde rol oynar: (i) Hayvanın sistemik dolaşımına geçen küçük partiküller kas, karaciğer ve süt gibi ürünlere endojen olarak geçebilir; (ii) Kesim, işleme ve ambalajlama sırasında dış kaynaklı kontaminasyon oluşabilir (Yıldırım ve Buhan, 2025b). İnsan bağışıklık sistemi üzerindeki etkiler, inflamasyon, endotelial stres ve olası metabolik bozukluklar bilimsel değerlendirme gerektirir. Henüz insan sağlık riskleri için net bir doz–yanıt ilişkisi belirlenememiş olsa da mikroplastiklerin endokrin bozucu kimyasalları ve ağır metalleri taşıyabilmesi, halk sağlığı açısından dikkatli bir yaklaşımı gerektirir. Bu nedenle hayvansal ürünlerde mikroplastik izleme programlarının başlatılması önemlidir.

15. Mikroplastik tespitinde kullanılan analitik yöntemlerin (FTIR, Raman, Pyrolysis-GC/MS) sınırlılıkları nelerdir? Neden standardizasyon gereklidir?

Cevap: Analitik yöntemler mikroplastik araştırmalarının en kritik zayıflık noktalarından biridir. FTIR ve Raman spektroskopisi, polimer türünü belirlemede etkilidir ancak genellikle >20–30 µm partikülleri tespit edebilir; daha küçük partiküllerde hassasiyet azalır (Olmo ve Holman, 2025). Pyrolysis-GC/MS kimyasal bileşimi tanımlayabilir ancak parçacık sayısı hakkında bilgi vermez. Numune hazırlama aşamalarında (doku sindirimi, filtrasyon, kontaminasyon kontrolü) hata payı oldukça yüksektir ve laboratuvarlar arasında yöntem farklılığı sonuçların karşılaştırılmasını güçleştirir. Bu nedenle EFSA ve uluslararası kuruluşlar, mikroplastik analizlerinde birlikte çalışabilir, tekrarlanabilir ve hassasiyet sınırları açıkça tanımlı standartların geliştirilmesini önermektedir. Standardizasyon sağlanmadıkça risk değerlendirmeleri, mevzuat hazırlıkları ve gıda güvenliği yönetimi sağlıklı yürütülemez.

16. Mevcut literatüre göre, ruminantlarda (sığır–koyun) mikroplastik maruziyeti nasıl gerçekleşir ve diğer türlere göre hangi yönleriyle daha kritiktir?

Cevap: Ruminantlarda maruziyet çoğunlukla mera, toprak ve tarımsal plastik kalıntıları üzerinden oluşur. Özellikle plastik malç kullanılan tarlalarda otlatılan koyunlarda dışkıda yüksek MP seviyeleri rapor edilmiştir; örneğin Beriot ve ark. (2021), İspanya'daki sebze tarlalarında 500–1000 parçacık/kg seviyelerini bildirmiştir. İşkembe fizyolojisi nedeniyle ruminantların sürekli geviş getirmesi, toprağı ve bitki üzerinde biriken plastik lifleri daha fazla yutmalarına neden olur. Silaj örtülerinin UV altında aşınması da önemli bir kaynaktır. Ruminantlar açısından kritik olan nokta şudur: işkembe, plastik liflerin mekanik olarak parçalanabileceğı bir ortamdır; bu nedenle mikroplastiklerin daha küçük formlara dönüşmesi ve nanoplastiklerin oluşma potansiyeli teorik olarak daha yüksektir. Ayrıca rumen mikrobiyotasındaki değişiklikler fermentasyon süreçlerini etkileyebilir. Ancak ruminantlarda doku birikimi ve metabolik etkiler konusunda veri hâlâ çok sınırlıdır.

17. Kanatlı hayvanlar (etlik piliç, yumurtacı tavuk, hindi, ördek) mikroplastiklere karşı daha hassas olabilir mi?

Cevap: Kanatlı hayvanların mikroplastiklere duyarlılığı hem sindirim fizyolojileri hem de üretim sistemlerinin özellikleri nedeniyle bazı açılardan ruminant ve monogastrik türlere kıyasla daha yüksek olabilir. Kanatlılarda bağırsak yüzeyi oldukça geniştir ve epitel geçirgenliği genç büyüme döneminde daha fazladır; bu durum küçük partiküllerin (özellikle <20 µm ve nanoplastikler) sınırlı da olsa emilme ihtimalini artırır (Shelver ve ark., 2024). Deneysel çalışmalarda polistiren mikroplastiklere maruz bırakılan etlik piliçlerde villus bütünlüğünde azalma, oksidatif stres artışı ve karaciğerde metabolik değişiklikler bildirilmiştir (Abd El-Hack ve ark., 2025). Kanatlılarda inhalasyon yoluyla maruziyet de önemlidir; kümes içinde hava yoluyla taşınabilen tekstil lifleri ve plastik tozlar solunum yoluna girebilir. Kanatlı üretiminde yem tüketimi canlı ağırlığa oranla oldukça yüksek olduğu için, maruziyet birim kg vücut ağırlığı açısından diğer türlerden daha fazla olabilir. Yumurta özelinde, güncel bulgular mikroplastiklerin yalnızca dış yüzeyde değil, yumurta akı ve sarısında da düşük düzeyde endojen geçiş gösterebildiğini ortaya koymuştur. Liu ve ark. (2022), pazardan alınan yumurtalarda özellikle sarı fraksiyonunda belirgin mikroplastik varlığı bildirmiştir. En güçlü mekanizma kanıtı ise Shelver ve ark. (2024) tarafından sunulmuş olup, kontrollü koşullarda verilen işaretli mikroplastiklerin çok küçük bir kısmının kana geçtiği, 2–4 gün içinde ovaryuma ulaştığı ve gelişen yumurta sarısına taşındığı gösterilmiştir. Bu geçiş düzeyi düşük olsa da tamamen sıfır değildir ve kanatlıların gastrointestinal maruziyetinin yumurta içi mikroplastik yükünün temel belirleyicisi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla kanatlı hayvanlar, yüksek yem tüketimi, bağırsak geçirgenliğinin dönemsel artışı, kümes havasındaki liflere inhalasyon yoluyla maruziyet, lipofilik yumurta sarısının partikülleri tutma eğilimi gibi nedenlerle mikroplastiklere karşı belirli yönlerden daha duyarlı kabul edilebilir. Ancak bu duyarlılık, yüksek doku birikimi anlamına gelmemekte; çoğu partikülün hızla dışkıyla atıldığı ve endojen geçişin miktar olarak düşük olduğu mevcut verilerle uyumludur (Shelver ve ark., 2024).

18. Su ürünlerinde (balık, midye, karides) tespit edilen mikroplastikler çiftlik hayvanlarına nasıl taşınabilir?

Cevap: Deniz ürünleri, özellikle balık unu ve balık yağı üretim zinciri üzerinden çiftlik hayvanlarının yemine doğrudan geçiş sağlayabilir. Olmo ve Holman (2025) deniz kökenli yem hammaddelerinin karasal yemlere oranla daha yüksek mikroplastik içerebildiğini, özellikle lif ve fragment formunun yaygın olduğunu rapor etmektedir. Bu nedenle balık unu içeren kanatlı ve domuz yemlerinde maruziyet riski artar. Ayrıca su ürünleri işleme tesislerinde kullanılan plastik ekipmanlar da kontaminasyon kaynağı olabilir. Midye ve karides gibi filtreleyici türler, çevredeki mikroplastikleri yoğun şekilde biriktirdiği için “yüksek MP biyobirikim potansiyeline sahip hammaddeler” olarak değerlendirilmelidir. Su ürünleri kaynaklı mikroplastikler, polimer türü açısından da çeşitlilik sunar; bu durum hayvan metabolizmasında farklı biyolojik yanıtların ortaya çıkmasına neden olabilir.

19. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkilerini anlamada hangi önemli bilgi eksikleri vardır?

Cevap: Bilimsel çalışmalar incelendiğinde, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkilerini tam olarak değerlendirmemizi zorlaştıran dört temel bilgi boşluğu öne çıkmaktadır:

Gerçekçi doz ve uzun süreli çalışma eksikliği: Mevcut araştırmaların çoğu, hayvanlara çok yüksek miktarda mikroplastik verilen kısa süreli denemelere dayanmaktadır. Bu durum, çiftliklerde hayvanların gerçek yaşamda maruz kaldığı düşük ama sürekli mikroplastik dozlarını tam olarak yansıtmamaktadır (Yıldırım ve Buhan, 2025a).

Nanoplastiklerin belirsizliği: 1000 nanometrenin altındaki çok küçük plastik parçacıkları (nanoplastikler) hücre içine girebilecek kadar küçüktür. Ancak günümüzde bunları tespit etmek ve etkilerini ölçmek için kullanılan yöntemler yeterince gelişmiş değildir.

Birden fazla kirleticinin birlikte etkisi: Mikroplastiklerin mikotoksinler, ağır metaller veya pestisitler gibi diğer kirleticilerle birlikte yarattığı “kokteyl etkisi” henüz iyi anlaşılmamıştır. Bu maddeler birlikte daha güçlü bir toksik etki oluşturabilir.

Türler arası farklılıkların net olmayışı: Kanatlılar, ruminantlar ve domuzlar gibi farklı hayvan türlerinin sindirim sistemleri birbirinden çok

farklıdır. Bu nedenle bir türde elde edilen sonuçları diğer türlere doğrudan uyarlamak mümkün değildir.

Bu bilgi eksikleri giderilmeden, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki gerçek riskini tam olarak değerlendirmek mümkün olmayacaktır.

20. Mikroplastiklerin Tek Sağlık (One Health) perspektifi açısından değerlendirilmesi neden zorunludur?

Cevap: Mikroplastikler sadece tek bir ekosistemi değil, çevre–hayvan–insan üçgeninin tamamını etkileyen yaygın ve mobil partiküllerdir. Çevrede bozulmadan kalabilir, suda yüzer, toprakta birikir ve havaya karışabilir; böylece tüm canlı sistemlerini aynı anda etkileyen bir yayılım dinamiği oluşturur. Çiftlik hayvanları üzerindeki etkiler, nihayetinde insanlara et, süt, yumurta ve su ürünleri yoluyla taşınabilir (Naz ve ark., 2024). Ayrıca mikroplastikler, çevresel kirleticileri taşıyarak kimyasal risklerin de geçişini kolaylaştırır. Plastikler aynı zamanda biyoçeşitlilik üzerinde etkili olup toprak solucanları, polinatörler ve mikrobiyal döngüleri bozabilir. Bu nedenle mikroplastiklerin yönetimi yalnızca gıda güvenliği değil, ekosistem sağlığı, hayvan refahı, halk sağlığı ve çevre koruma politikalarının bütünleşik olarak yürütülmesini gerektirir. One Health yaklaşımı, bu karmaşık etkileşimleri tek bir çatı altında değerlendirmek için zorunlu bir çerçeve sağlar.

2. SONUÇ

Mikroplastikler, çiftlik hayvancılığı ve hayvan besleme bilimi açısından artık soyut bir çevre sorunu değil; yemden suya, barınak havasından çiftlik ekipmanlarına kadar üretim sürecinin tüm aşamalarına temas eden yeni ve çok boyutlu bir risk alanı hâline gelmiştir. Son yıllarda yapılan deneysel çalışmalar, mikroplastiklerin hayvanların sindirim kanalına, dolaşım sistemine ve bazı dokularına sınırlı da olsa geçebildiğini göstermiş; saha gözlemleri ise özellikle kanatlı ve serbest dolaşan türlerde çevresel maruziyetin sürekli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, mikroplastiklerin artık çiftlik hayvanı biyolojisinin bir parçası hâline geldiğini kabul etmeyi gerektirmektedir.

Hayvan besleme biliminde mikroplastiklerin etkilerini değerlendirirken konuyu yalnızca tek bir boyutta ele almak yeterli değildir. Gerçekçi ve bütüncül bir bakış açısı, bu partiküllerin oluşturduğu riskleri üç temel eksen-

incelemeyi gerektirir. İlk olarak, hayvan sağlığı üzerinde ortaya çıkabilecek etkiler dikkate alınmalıdır; çünkü mikroplastikler sindirim sistemi bütünlüğü, bağırsak mikrobiyotası, oksidatif denge ve bağışıklık fonksiyonları üzerinde doğrudan değişikliklere yol açabilmektedir. İkinci eksen, ürün kalitesi ve gıda güvenliği ile ilişkilidir. Hayvanların maruz kaldığı mikroplastiklerin et, süt ve yumurta gibi nihai ürünlerde iz bırakma potansiyeli hem güvenilir gıda üretimi hem de tüketici sağlığı açısından kritik bir konudur. Üçüncü ve daha geniş çerçeveyi oluşturan eksen ise Tek Sağlık yaklaşımı ve sürdürülebilir üretimdir. Mikroplastiklerin çevre–hayvan–insan döngüsündeki hareketliliği, bu partiküllerin yalnızca çiftlik hayvanlarını değil tüm ekosistemi ilgilendiren bir sorun olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla mikroplastik maruziyetinin azaltılması, sürdürülebilir hayvansal üretim sistemlerinin oluşturulması ve uzun vadeli çevresel risklerin yönetilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bugün için eldeki veriler, mikroplastiklerin büyük çoğunluğunun bağırsak sistemi içinden hızla atıldığını, fakat küçük bir fraksiyonun fizyolojik süreçler ile sınırlı düzeyde temas kurabildiğini göstermektedir. Bu temasın kronik ve düşük dozda uzun vadeli sonuçları ise henüz tam olarak tanımlanmamıştır. Bağırsak bariyerinde ince ama anlamlı değişiklikler, oksidatif stres, mikrobiyota dengesinde kaymalar ve bazı türlerde antioksidan yanıtın artması gibi bulgular, gelecekte daha hassas deneylerle derinlemesine anlaşılması gereken işaretlerdir. Bugünün bilgisiyle mikroplastikleri “akut toksin” olarak nitelendirmek doğru değildir; ancak hayvan sağlığı açısından düşük dozlu, uzun dönemli ve çok faktörlü bir stres faktörü olma potansiyeli ciddiye alınmalıdır.

Ürün kalitesi açısından bakıldığında, et, süt ve yumurtada tespit edilen mikroplastik seviyeleri genellikle düşüktür; fakat bu düşük düzey bile tüketici algısı açısından büyük önem taşır. Mikroplastik içeren bir ürünün biyolojik olarak zararlı sayılması için yüksek konsantrasyonlara ulaşması gerekmez de tüketici gözünde güven kaybının ortaya çıkması için yalnızca birkaç parçacığın varlığı yeterlidir. Bu nedenle mikroplastikler hem biyolojik hem de sosyo-ekonomik bir risk parametresidir. Üretici işletmeler için güvenli üretim, artık yalnızca besin maddelerinin optimizasyonu değil; aynı zamanda plastik kaynaklı kirliliğin kaynağında azaltılması anlamına gelmektedir. Yemlerin taşındığı torbalar, big-bag astarları, öğütme ve karıştırma hatlarındaki plastik ekipmanlar, suluk hatları, havalandırma kanallarındaki toz–lif birikimi ile

plastik tabanlı yer kaplamaları; tümü mikroplastik kaynağı olabilir. Bu nedenle, mikroplastik maruziyetini azaltmak için üretim zincirinin tüm basamaklarında bütüncül önlemler alınması gerekmektedir. İlk olarak, yem kaynaklı risklerin azaltılması büyük önem taşır. Yemlerin taşınması ve depolanmasında kullanılan plastik torba ve astarların daha dayanıklı veya alternatif malzemelerle değiştirilmesi, üretim hattındaki sert plastik parçaların aşınmasını önlemek amacıyla düzenli bakım yapılması, toz tutucu filtre sistemlerinin aktif biçimde kullanılması ve balya ipi, naylon örtü, yemlik kenarları gibi mikro-aşınma potansiyeli taşıyan bileşenlerin periyodik olarak kontrol edilmesi, yemden kaynaklı partikül yükünü ciddi ölçüde azaltabilir. İkinci olarak, su ve barınak yönetimi mikroplastik girişlerinin sınırlanmasında kritik bir role sahiptir. PVC ve plastik su hatlarının belirli aralıklarla yenilenmesi, su sistemlerinde sediment ve partikül tutucu filtrelerin kullanılması ve kümes havasındaki lif ve toz birikimini azaltacak etkin havalandırma ile toz yönetimi protokollerinin uygulanması hem hayvan sağlığını korur hem de mikroplastik yükünü azaltır. Üçüncü düzey olan atık ve hijyen yönetimi ise çiftlik ortamındaki plastik parçalanmasını ve çevresel mikroplastik yayılımını sınırlamak açısından önemlidir. Temizlik işlemlerinde aşınma oluşturan plastik bazlı fırçalar yerine daha dayanıklı kompozit materyallerin tercih edilmesi, plastik ambalaj atıklarının kapalı ve kontrollü sistemlerde toplanması ve çiftlik içinde uygun geri dönüşüm noktalarının oluşturulması bu süreci destekler. Bu üç düzeyin birlikte uygulanması hem hayvanların mikroplastik maruziyetini azaltır hem de sürdürülebilir üretim sistemlerine geçişi güçlendirir.

Güncel düzenlemelerde mikroplastikler çoğunlukla ambalaj migrasyonu, plastik katkı maddeleri, yemlerde plastik kalıntıları ve çevre kirliliği başlıkları altında dolaylı olarak ele alınmaktadır. Mikroplastikler için tür-boyut-limit bazlı spesifik “maksimum kalıntı seviyeleri” henüz tanımlanmamıştır. Mevcut bilimsel veriler ve uluslararası kurumların gündemine aldığı konular değerlendirildiğinde, gelecek yıllarda mikroplastiklere ilişkin daha net ve bağlayıcı düzenlemelerin ortaya çıkacağı öngörülebilmektedir. Bu kapsamda özellikle dört alanda belirgin bir düzenleyici eğilim dikkat çekmektedir. İlk olarak, yemlerde plastik parçacıkları için maksimum tolerans seviyelerinin belirlenmesi, hayvan besleme zincirinin standardizasyonu açısından önem kazanmaktadır. İkinci

olarak, kuluçkahane, kesimhane ve yumurta işleme aşamalarında ikincil plastik kontaminasyonunun sınırlandırılmasına yönelik hijyen ve proses kriterlerinin daha detaylı hale getirilmesi beklenmektedir. Buna paralel olarak, çevresel yükü azaltmayı amaçlayan biyobozunur polimerler için kalite ve güvenlik sertifikasyonlarının zorunlu hâle gelmesi, üreticilerin malzeme seçimini doğrudan etkileyecektir. Ayrıca, biyolojik bariyerleri aşma potansiyeli yüksek olan nano boyuttaki partiküller için ayrı ve daha hassas değerlendirme kriterlerinin oluşturulması kaçınılmaz görünmektedir. Tüm bunlara ek olarak, mikroplastiklerin çevre-hayvan-insan döngüsündeki hareketliliğini dikkate alan Tek Sağlık yaklaşımıyla entegre çevresel risk değerlendirmesi, ulusal ve uluslararası düzenlemelerde daha merkezi bir konuma yerleşecektir. Bu eğilimler, önümüzdeki dönemde mikroplastik yönetiminin daha sistematik, ölçülebilir ve bilim temelli bir çerçevede ele alınacağını göstermektedir. Bu sürecin temel itici gücü, tüketici hassasiyeti ve gıda güvenliği otoritelerinin bilimsel belirsizlikleri azaltma isteğidir. Hayvan besleme uzmanlarının bu düzenlemelere proaktif uyum sağlaması, gelecekteki üretim standartlarının belirlenmesinde stratejik avantaj yaratacaktır.

Mikroplastik araştırmalarının odak noktası, önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde değişerek daha ileri, bütüncül ve çözüm odaklı bir yapıya dönüşecektir. Bu dönüşümün temel eksenleri şimdiden belirginleşmektedir. İlk olarak, gelişmiş analitik metotlar araştırmaların yönünü şekillendirecektir. Nano-ölçekli partikülleri tespit edebilen yüksek çözünürlüklü spektroskopi ve görüntüleme tekniklerinin yaygınlaşması, mikroplastiklerin gerçek biyolojik davranışlarının daha doğru anlaşılmasını sağlayacaktır. Buna ek olarak, hızlı, düşük maliyetli ve sahada uygulanabilir test kitlerinin geliştirilmesi, çiftlik koşullarında rutin izleme süreçlerini kolaylaştıracaktır. İkinci olarak, biyobozunur ve düşük aşınma eğilimli yeni polimerlerin hayvancılık sistemlerine entegrasyonu öne çıkacaktır. Yem torbaları, su hatları, barınak malzemeleri ve diğer çiftlik ekipmanlarında plastik bağımlılığını azaltmayı hedefleyen yenilikçi materyaller, tarımsal plastik kullanımını minimize eden ekolojik çözümlerle birleşerek üretim zincirinin çevresel yükünü azaltma potansiyeli taşımaktadır. Üçüncü olarak, probiyotik ve mikrobiyal biyogiderim yaklaşımları, mikroplastiklerin biyolojik ortamda daha hızlı uzaklaştırılmasına yönelik umut verici bir alan olarak görülmektedir. Bağırsak mikrobiyotasını hedefleyen stratejiler, partiküllerin sindirim sisteminden

atılımını destekleyebilir; aynı şekilde çiftlik atıklarında bakteriyel veya enzimatik süreçlerle plastik parçalanmasının hızlandırılması, çevresel birikimi azaltmaya katkı sağlayacaktır. Dördüncü gelişme alanı ise Tek Sağlık modelleri ve yapay zekâ destekli risk analizidir. Hayvan–çevre–insan etkileşimini kapsayan mikroplastik akış modelleri, maruziyetin ekosistem içindeki dinamiklerini daha iyi açıklayacaktır. Büyük veri analitiği ve yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri ise farklı üretim sistemleri için risk haritaları oluşturarak gelecekteki düzenlemelere ve kontrol stratejilerine yön verecektir. Tüm bu gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, mikroplastiklerin hayvancılık ve gıda zinciri üzerindeki risklerinin yönetimi günümüzden çok daha sistematik, ölçülebilir ve öngörülebilir bir yapıya kavuşacaktır.

Tüm bulgular bir arada değerlendirildiğinde mikroplastikler, hayvan besleme ve çiftlik hayvancılığı için “yüksek dozda akut bir tehlike” olmaktan ziyade, “düşük dozda ancak kesintisiz maruziyetle işleyen uzun vadeli bir stres faktörü” olarak görülmelidir. Bu nedenle abartılı alarmcı yaklaşımlar kadar, riski küçümseyen “yok sayıcı” yaklaşımlar da bilimsel açıdan doğru değildir. En uygun yaklaşım, temkinli–kanıta dayalı ve çok disiplinli bir değerlendirme modelidir.

Bu kitap bölümünde sunulan Soru–Cevap yapısı, okurların özellikle lisans ve lisansüstü öğrencilerin karmaşık bir konuyu adım adım anlamasına yardımcı olmayı hedeflemiştir. Amaç yalnızca mevcut bilgiyi aktarmak değil, aynı zamanda hangi soruların hâlen yanıtı olmadığı, gelecekteki tez ve araştırmalarda hangi boşlukların doldurulabileceğini fark ettirmektir. Sonuç olarak mikroplastikler, çiftlik hayvancılığı için artık yok sayılamayacak bir parametredir. Hayvan besleme uzmanları, araştırmacılar ve düzenleyici otoriteler; yem güvenliğini, çiftlik yönetimini ve hayvansal ürün kalitesini bu yeni gerçekliğe göre yeniden değerlendirmek durumundadır. Bu süreçte başarı, bilimsel titizlik, çok disiplinli iş birliği ve genç araştırmacıların konuya eleştirel–sorgulayıcı bir zihinle yönelmesi ile mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, *104*, 104456.
- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., Fang, C., & Rahman, M. M. (2024). The unseen threat of the synergistic effects of microplastics and heavy metals in aquatic environments: A critical review. *Current Pollution Reports*, *10*(3), 478–497.
- Al Nahian, S., Rakib, M. R. J., Kumar, R., Haider, S. M. B., Sharma, P., & Idris, A. M. (2023). Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, *855*, 158892.
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., & Huerta Lwanga, E. (2021). Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, *755*, 142653.
- Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, *51*, 518–530.
- Braun, T., König, M., Reuter, S., & Fegert, J. M. (2021). Detection of Microplastic in Human Placenta and Meconium in a Clinical Setting. *Pharmaceutics*, *13*(7), 921.
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(4), 1212.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, *882*, 163305.
- Djouina, M., Loison, S., & Body-Malapel, M. (2024). Recent progress in

- intestinal toxicity of microplastics and nanoplastics: Systematic review of preclinical evidence. *Microplastics*, 3(2), 217–233.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6), e04501.
- El Gazzar, W. B., Sliem, R. E., Bayoumi, H., Elsayed Nasr, H., Shabanah, M., Elalfy, A., Radwaan, S. E., Gebba, M. A., Mansour, H. M., Badr, A. M., Amer, M. F., Ashour, S. S., Morsi, H., Aboelkomsan, S. A. F., Baioumy, B., Hamid Sayed, A. E., & Farag, A. A. (2023). Melatonin alleviates intestinal barrier damaging effects induced by polyethylene microplastics in albino rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13619.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782.
- Hu, C. J., Garcia, M. A., Nihart, A., Liu, R., Yin, L., Adolpho, N., Gallego, D. F., Kang, H., Campen, M. J., & Yu, X. (2024). Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis. *Toxicological Sciences*, 200(2), 235–240.
- 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.
- Kadac-Czapska, K., Knez, E., & Grembecka, M. (2022). Food and human safety: The impact of microplastics. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Advance online publication.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks—Are they immune from microplastics contamination? *Science of the Total Environment*, 714, 136823.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status.

- Food Chemistry*, 397, 133771.
- Naz, S., Chatha, A. M. M., Khan, N. A., Ullah, Q., Zaman, F., Qadeer, A., Khan, I. M., Danabas, D., Kiran, A., & Skalickova, S. (2024). Unraveling the ecotoxicological effects of micro and nano-plastics on aquatic organisms and human health. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1390510.
- Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST). (2024). *Les impacts des plastiques sur la santé humaine* (Rapport n° XXX, XVIIe législature / Sénat n° XXX, 2024-2025). Assemblée nationale & Sénat. <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/17/organes/delegations-comites-offices/opepst>
- Olmo, L., & Holman, B. W. B. (2025). The sources and impact of microplastic intake on livestock and poultry performance and meat products: A review. *Animal Production Science*, 65, AN25022.
- Oßmann, B., Schymanski, D., Ivleva, N. P., Fischer, D., Fischer, F., Dallmann, G., & Welle, F. (2019). Comment on “Exposure to microplastics (<10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study by Zuccarello et al. [Water Research 157 (2019) 365–371]”. *Water Research*, 162, 516–517.
- Pourebrahimi, S., & Pirooz, M. (2023). Microplastic pollution in the marine environment: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100327.
- Ragusa, A., Svelato, G., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274.
- Rodríguez-Seijo, A., & Pereira, R. (2019). Microplastics in agricultural soils: Are they a real environmental hazard? In J. C. Sanchez-Hernandez (Ed.), *Bioremediation of agricultural soils* (pp. 45–60). CRC Press.
- Saijo, Y., Hasegawa, Y., Okamura, T., Ono, Y., Ichikawa, T., Nakanishi, N., Tsuchimura, Y., Morioka, T., Tanaka, S., Takano, H., Hamaguchi, M., & Fukui, M. (2025). Negative impact of oral exposure to polystyrene microplastics on glucose tolerance and intestinal environment in mice is independent of particle size. *Environmental Sciences Europe*, 37(125),

1–16.

- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162.
- Sharma, P., & Vidyarthi, V. K. (2024). Impact of microplastic intake via poultry products: Environmental toxicity and human health. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 14, 100426.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of the Total Environment*, 909, 168512.
- Siddiqui, S. A., Singh, S., Bahmid, N. A., Shyu, D. J. H., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2023). Polystyrene microplastic particles in the food chain: Characteristics and toxicity – A review. *Science of the Total Environment*, 892, 164531.
- Solayman, H. M., Robby, M. D. A., Satriaji, F. V., Hossain, M. K., Kang, K., Abd Aziz, A., Shiu, R.-F., & Jiang, J.-J. (2026). *Mapping global microplastic pollution: Integrating advanced detection and monitoring in aquatic ecosystems*. *Marine Pollution Bulletin*, 222, 118685.
- Toussaint, B., Raffael, B., Angers, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio Echevarria, I. M., & Van den Eede, G. (2019). Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain. Joint Research Centre (European Commission). *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(5), 639–673.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study* (Report EH22-01). Vrije Universiteit Amsterdam.
- Wiesinger, H. (2024). *Produits chimiques du plastique – un problème en médecine?* *Écoscope*, 2024, 12–14.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Yıldırım, A., & Buhan, E. (2025a). Çiftlik hayvanlarında mikroplastik

- kaynakları ve maruziyet yolları. In H. Erdem, A. Yıldırım, N. Yeşilayer, & C. Ç. Gence (Eds.), *Tarım Ekosistemlerinde Mikroplastik* (in press).
- Yıldırım, A., & Buhan, E. (2025b). Hayvansal ürünlerde mikroplastikler. In H. Erdem, A. Yıldırım, N. Yeşilayer, & C. Ç. Gence (Eds.), *Tarım Ekosistemlerinde Mikroplastik* (in press).
- Zhang, Q., Zhang, Y., Jing, L., & Zhao, H. (2024). *Microplastics induced inflammation in the spleen of developmental Japanese quail (Coturnix japonica) via ROS-mediated p38 MAPK and TNF signaling pathway activation*. *Environmental Pollution*, 341, 122891.
- Ziajahromi, S., Slynkova, N., Dwyer, J., Griffith, M., Fernandes, M., Jaeger, J. E., & Leusch, F. D. L. (2024). Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*, 250, 121071.