

# TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

Editörler

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE



IKSAD  
Publishing House

# TARIM EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK

## **Editörler**

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Doç. Dr. Halil ERDEM

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

## **Yazarlar**

Prof. Dr. Arda YILDIRIM

Prof. Dr. Nihat YEŞİLAYER

Prof. Dr. Yakup BUDAK

Doç. Dr. Ayşe YEŞİLAYER

Doç. Dr. H. Sibel GÜLSE BAL

Doç. Dr. Halil ERDEM

Doç. Dr. Özgür Doğan ULUÖZLÜ

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem BUHAN

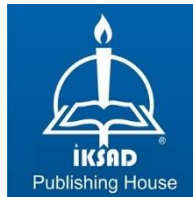
Dr. Öğr. Üyesi Elif AKTÜRK BOZDEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Saniye DEMİR

Dr. Cabir Çağrı GENÇE

Dr. Ercan MEVLİYAOĞULLARI

Dr. Saliha DİRİM BUHAN



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

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

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

**ISBN: 978-625-378-481-2**

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

## İÇİNDEKİLER

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

Doç. Dr. Halil ERDEM<sup>2</sup>

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

Dr. Cabir Çağrı GENÇE<sup>4</sup>

---

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

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

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

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

## BÖLÜM 11

### HAYVANSAL ÜRÜNLERDE MİKROPLASTİKLER

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

<https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18048962>

---

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

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



## GİRİŞ

Plastik kirliliği, insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan en ciddi çevresel tehditlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Güncel tahminlere göre küresel plastik üretimi yıllık 430 milyon tonu aşmakta olup, bu miktarın büyük bölümü kısa ömürlü ürünlerden oluştuğu için hızla atığa dönüşmektedir (Naz ve ark., 2024). Çevreye kontrolsüz şekilde yayılan bu plastik atıkların önemli bir kısmı zaman içerisinde parçalanarak mikroplastiklere dönüşmekte ve nihayetinde hayvansal üretim sistemlerine ve gıda zincirine kadar ulaşabilmektedir. Sistematik incelemeler, her yıl 5–13 milyon ton plastiğin deniz ekosistemlerine karıştığını ortaya koymakta; tatlı su, toprak ve okyanuslar dâhil olmak üzere çok çeşitli habitatlarda mikroplastik birikiminin hızla arttığını göstermektedir (Al Nahian ve ark., 2023; Pourebrahimi ve Pirooz, 2023; Sharma ve Vidyarthi, 2024).

Mikroplastikler; kuşlar, balıklar, omurgasızlar ve memeliler gibi çok farklı hayvan gruplarında tespit edilerek geniş bir maruziyet spektrumuna ve biyobirikim potansiyeline işaret etmektedir. Mikroplastik tüketiminin bağırsak mikrobiyotasını bozduğu, besin emilimini azalttığı ve sindirim verimini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Ayrıca bu partiküller, yüzeylerine adsorbe olabilen kimyasal kirleticiler için taşıyıcı görevi görerek oksidatif stres, inflamasyon ve endokrin sistem bozuklukları gibi fizyopatolojik süreçleri tetikleyebilir (Khan ve ark., 2024; Abd El Hack ve ark., 2025).

Tarımsal üretim ortamlarında mikroplastik kaynaklarının çeşitliliği maruziyeti önemli ölçüde artırmaktadır. Sera ve silaj örtüleri, plastik malçlar, atık çamuru gibi organik gübre kaynakları, sulamada kullanılan geri kazanılmış atık su, plastik boru ve vanalar, çiftlik ekipmanlarının parçaları ve kontamine yemler, çiftlik hayvanları ve kanatlılar için başlıca mikroplastik giriş kapılarıdır (Rodríguez-Seijo ve Pereira, 2019; Beriot ve ark., 2021; Wu ve ark., 2021; Ziajahromi ve ark., 2024; Olmo ve Holman, 2025). Bu plastik malzemeler UV ışınları, mekanik aşınma ve çevresel koşullar nedeniyle parçalanarak çevrede mikroplastik yükünün hızla artmasına yol açmaktadır (Siddiqui ve ark., 2023).

EFSA (2016), 150 µm'den büyük partiküllerin çoğunun dışkıyla atıldığını; buna karşılık daha küçük boyuttaki partiküllerin gastrointestinal bariyeri aşarak dokulara taşınabildiğini bildirmiştir. Nitekim doğal maruziyet çalışmalarında sığır dışkısında 74 MP/kg, tavuk dışkısında 667 MP/kg ve

domuz dışkısında 900 MP/kg düzeylerinde mikroplastik tespit edilmiştir (Wu ve ark., 2021). Taşlık, bağırsak, karaciğer ve hatta kas dokusunda birikim gösteren mikroplastikler de rapor edilmiş; etlik piliçlerde 2.2–1751.4 mg/kg aralığında birikim düzeyleri bildirilmiştir (Chen ve ark., 2023). Perakende et örneklerinde bile 53–7700 mg/kg mikroplastik saptanmış olması, gıda zinciri açısından önem taşımaktadır (van der Veen ve ark., 2022).

Bu bulgular, mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerine potansiyel etkilerinin ihmal edilemeyeceğini göstermektedir. Mikroplastik partiküllerinin hücre düzeyinde inflamasyon, oksidatif stres ve apoptoza yol açtığı; üretkenlik, bağışıklık fonksiyonları ve genel fizyolojik denge üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu ortaya konmuştur (Blackburn ve Green, 2022). Ayrıca et ürünlerinde mikroplastik bulunması, yalnızca gıda güvenliği değil, aynı zamanda insan üreme sistemi ve gelişimi açısından potansiyel toksisite nedeniyle halk sağlığı için de risk oluşturmaktadır.

Toplum genelinde mikroplastik maruziyeti giderek artmaktadır. ABD’de yapılan bir tahmine göre yetişkin bir birey, yalnızca belirli gıda gruplarından yıllık 46.000–52.000 mikroplastik tüketmektedir; bu hesaplama tüm hayvansal ürünleri kapsamamakla birlikte, et ve et ürünlerinin maruziyete katkısına ilişkin verilerin hâlen sınırlı olduğu vurgulanmaktadır (Cox ve ark., 2019). Bu durum, hayvansal ürünlerde mikroplastik düzeylerinin belirlenmesi ve maruziyetin niceliksel olarak daha iyi anlaşılması gereksinimini ortaya koymaktadır.

Düzenleyici çerçeve henüz küresel ölçekte tam olarak oluşmuş değildir. Avrupa Birliği’nde gıdayla temas eden plastiklerde 60 mg/kg’dan fazla madde geçişine izin verilmezken (European Commission, 2011), Birleşik Krallık gıda atıklarının yem olarak kullanımında plastik ambalajı ağırlıkça %0.15 ile sınırlamaktadır (Parfitt ve ark., 2016). Hollanda ise yemlerde plastik ambalaj kalıntılarının tamamen uzaklaştırılmasını zorunlu kılarak hayvanlardaki plastik alımını azaltmayı hedeflemektedir (van der Veen ve ark., 2022). Bu düzenlemeler, gelecekte et ürünlerinde mikroplastik limitlerinin belirlenmesi yönünde küresel bir eğilim gelişeceğine işaret etmektedir (Olmo ve Holman, 2025).

Kanatlı endüstrisi de bu çevresel baskıdan doğrudan etkilenmektedir. Mikroplastiklerin üretim ortamına çok sayıda kanal üzerinden girmesi (yem, su hattı boruları, ekipman aşınması, altlık materyalleri vb.) nedeniyle

maruziyet riski yüksektir. Alınan partiküllerin bir kısmı dışkıyla atılsa da partikül boyutu, polimer yapısı, yük yoğunluğu, maruziyet süresi ve eşlik eden kimyasal kirleticiler gibi faktörler, sistemik etki potansiyelini artırmaktadır.

Öte yandan gıda geri kazanım süreçlerinde ağır metaller, mikotoksinler, biyojen aminler, mikroplastikler ve anti-besinsel faktörler gibi kontaminantların tamamen uzaklaştırılması çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle geri kazanılmış gıdaların hayvan beslemede kullanımı sırasında kirleticilerin düzeylerinin belirlenmesi ve bunların azaltılmasına yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Simmons ve ark., 2023).

Son yıllarda mikroplastiklerin giderilmesine yönelik çevresel açıdan sürdürülebilir yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bakteriler, mantarlar ve alglerin rol aldığı mikrobiyal biyobozunma stratejileri, mikroplastiklerin parçalanmasını hızlandırma potansiyeli nedeniyle önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Kotova ve ark., 2021; Qin ve ark., 2021; Chen ve ark., 2022; Cholewinski ve ark., 2022). Bu bağlamda mikroplastiklerin çevresel kalıcılığı, biyo birikim kapasitesi ve hayvansal üretimden insan tüketimine uzanan çok yönlü etkileri, sorunun yalnızca “çevresel kirlilik” boyutunda değil, aynı zamanda gıda güvenliği, yem hijyeni, hayvan refahı ve sürdürülebilir üretim başlıklarında da değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Mikroplastik krizinin azaltılması; plastik kullanımının düşürülmesi, etkili atık yönetimi, geri dönüşüm sistemlerinin iyileştirilmesi ve biyobozunur alternatiflerin geliştirilmesi gibi bütüncül politikaları gerektirmektedir.

Bu kitap bölümünün amacı, mikroplastiklerin çeşitli hayvansal ürünlerde nasıl ortaya çıktığını, bu kontaminasyonun hayvan sağlığı ve nihai ürün kalitesi üzerindeki olası etkilerini bilimsel veriler ışığında değerlendirmek ve hayvansal ürünlerde mikroplastik yükünü azaltmaya yönelik uygulanabilir kontrol ve iyileştirme stratejilerini kapsamlı bir çerçeve içinde ele almaktır.

## 1. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE MİKROPLASTİKLER

Son yıllarda mikroplastiklerin (MP) yalnızca deniz ürünlerinde değil, karasal kökenli hayvansal ürünlerde de giderek daha fazla rapor edilmesi, et ve et ürünlerinde maruziyetin gerçek boyutunu değerlendirmeyi zorunlu hâle

getirmiştir. Et dokusu, hayvan yaşamı boyunca karşılaşılan çevresel mikroplastik girişlerinin (yem, su, toprak–toz, barınak ekipmanları) yanı sıra kesim, işleme ve ambalajlama basamaklarındaki eksojen kaynaklarla da kontamine olabilir. Bu nedenle kas dokusunda saptanan mikroplastiklerin kökeni çoğu zaman çok etmenlidir ve hem endojen (hayvanın gerçekten absorbe ettiği) hem de eksojen (süreçten gelen) katkıların birlikte değerlendirilmesini gerektirir.

Hayvanın yaşam döngüsü boyunca karşılaştığı yem, su, barınak tozu, plastik kaplamalı ekipmanlar veya silaj örtüsü parçacıkları gibi çevresel girdiler, özellikle polietilen (PE), polipropilen (PP) ve poliamid (PA) temelli mikropartiküllerin sindirim sistemi aracılığıyla organizmaya girmesine neden olabilir. Bununla birlikte mevcut veriler, bu tür endojen geçişlerin genellikle düşük düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Buna karşın kesim ve işleme ortamlarında kullanılan plastik eldivenler, kesme yüzeyleri, taşıma kasaları, bant sistemleri, vakum torbaları ve özellikle ekstrüde polistiren (XPS) tepsiler, sürtünme ve mekanik aşınma yoluyla ete mikrolif ve kırıntı aktarabilmektedir. Bu mekanizma, literatürde farklı ülkelerden raporlanan polimer profilleriyle uyumludur; kırmızı ve beyaz etlerde en sık tespit edilen polimerlerin PE, PET, PS ve PVC olması, bu materyallerin hem üretim zinciri hem de tüketici ambalajı boyunca yoğun kullanımını yansıtmaktadır.

Ambalaj–gıda etkileşiminin mikroplastik geçişindeki rolü özellikle dikkat çekicidir. Paketleme filmlerinin ve tepsilerinin aşınma kaynaklı mikrokırıntı salımı hem laboratuvar ölçekli hem de saha çalışmalarında doğrulanmıştır. Kas dokusunun yağ ve protein içeriği yüksek olduğundan, polimerlerin yüzeye bağlanma eğilimi artmakta ve basit yıkamayla uzaklaştırılmayan bir kontaminasyon formu ortaya çıkmaktadır. İşlenmiş et ürünlerinde ise temas yüzeyi sayısı daha yüksek olduğundan (kıyma makinesi burguları, karıştırıcılar, dolum kılıfları, vakum tünelleri vb.) plastik kökenli partikül girişinin daha fazla olabileceği değerlendirilmektedir.

Analitik çalışmalar arasında yöntem farklılıkları bulunmakla birlikte, çoğu incelemede enzimatik veya alkali sindirim sonrası  $\mu$ FTIR, Raman veya pyrolysis-GC/MS gibi spektroskopik tekniklerle polimer doğrulaması yapılmıştır. Ancak farklı araştırmalarda ölçüm birimlerinin (adet/kg vs.  $\mu$ g/kg), sindirim protokollerinin ve algılama sınırlarının değişken olması, verilerin doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle et

dokusunda mikroplastik yükünü güvenilir biçimde değerlendirmek için, temiz oda koşullarında örnek hazırlama, kör/kontaminasyon kontrolleri ve matrise özgü yöntem doğrulamasının standardize edilmesi gereklidir.

Bugüne kadar yapılan çalışmaların genel çerçevesi, et ve et ürünlerinde mikroplastiklerin düşük ila orta düzeyde fakat yaygın olarak saptandığını göstermektedir. Kaynak açısından bakıldığında, çiftlik aşamasındaki yem–su–çevre temasının yanı sıra, kesim–işleme hattındaki sürtünme kaynaklı plastik aşınmasının ve nihai ambalaj materyallerinin önemli bir paya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle et üretim zincirinde mikroplastik kontrolü, yalnızca hayvanın yetiştirme koşullarını değil, gıda işleme teknolojilerinin tasarımını, ekipman seçimini, bakım protokollerini ve ambalaj materyallerinin özelliklerini birlikte değerlendiren bütüncül bir yaklaşım gerektirir.

### 1.1. Kırmızı Et

Hayvansal gıdalar içinde et ve et ürünleri, mikroplastik bulaşması açısından hem hayvanın yaşam boyu maruziyetine hem de kesim sonrası işlemlere bağlı riskler taşır. Mevcut araştırmalar, sığır ve domuz eti gibi kırmızı etlerde mikroplastik saptandığını; ancak bu plastiklerin bir kısmının hayvan dokularından gelmekle birlikte bir kısmının da paketlenme süreçlerinde bulaşabileceğini göstermektedir.

Hayvansal gıdalar arasında et ve et ürünleri, mikroplastik (MP) bulaşmasına hem yaşam boyu maruziyet (yem–su–çevresel çökelim) hem de kesim/işleme–ambalaj aşamalarındaki temaslar nedeniyle açıktır. Bugüne kadarki kanıtlar, sığır ve domuz etinde MP varlığını doğrulamakla birlikte, ölçülen parçacıkların bir bölümünün hayvanın dokularına endojen geçişle, bir bölümünün ise süreç ve ambalajdan eksojen bulaşmayla açıklanabileceğini göstermektedir (Akanda ve ark., 2025; Kedzierski ve ark., 2020).

Hollanda’da yayımlanan pilot çalışmada plastik ambalajlı 8 sığır eti ve 8 domuz eti örneği incelenmiş; sığır etlerinin 7/8’inde, domuz etlerinin 5/8’inde en az bir polimer türünde MP saptanmıştır (van der Veen ve ark., 2022). Bulguların çekirdeğini PE (polietilen) oluşturmuş; sığır etinde 150–7700 µg/kg, domuz etinde 88–690 µg/kg PE aralığı rapor edilmiştir. Bazı sığır eti örneklerinde PS ve PVC de bulunmuş; örneğin organik etiketli bir dana burgerde yaklaşık yaklaşık olarak 200 µg/kg PS ve 2600 µg/kg PVC ölçülmüştür. Domuz örneklerinde PS saptanmazken, tekil örneklerde PVC

(yaklaşık olarak 130 µg/kg) ve PP (63 µg/kg) rapor edilmiştir. Organik statünün “düşük plastik” anlamına gelmediği; tersine, en yüksek PE yüklerinden birinin organik etiketli işlenmiş üründe gözlenebildiği dikkat çekicidir. Elde edilen bu sonuçlar, ambalaj/süreç kaynaklı katkının önemine işaret etmektedir. Çalışmadaki tüm etler kesim sonrası plastik filmle paklettiğinden araştırmacılar, yüzey parçalarının uzaklaştırılması için dış tabakayı ayırmalarına karşın iç kısımda dahi MP bulunmasını, ambalajdan nüfuz eden veya işleme sırasında karışan partiküllerle uyumlu değerlendirmiştir (van der Veen ve ark., 2022). Benzer şekilde paketli gıdalarda MP salımı ve işlenmiş et ürünlerinde ambalaj/ekipman temasının rolü daha önce de vurgulanmıştır (Kedzierski ve ark., 2020). Kesimhane ve işleme hatlarında plastik eldiven, kesme tahtası, palet/kap gibi materyallerin sürtünme-aşınma ile mikro-kırıntı bırakabildiğini gösteren bulgular, et ürünlerinin zincirin geç safhalarında da kontaminasyona maruz kalabileceğini desteklemektedir (Chen ve ark., 2023; Habib ve ark., 2022). Öte yandan endojen katkı açısından aynı pilot çalışmada incelenen sığır ve domuzların tüm kan örneklerinde başta PVC, PE ve PS olmak üzere MP sinyalleri ölçülmüştür. Yem ve su üzerinden kronik maruziyet, düşük de olsa sistemik geçiş ve dokuya ulaşım olasılığını güçlendirmektedir (van der Veen ve ark., 2022). Bu çerçeve, kanatlı etinde dokusal MP varlığını gösteren deneysel çalışmalarla da uyumludur (Chen ve ark., 2023). Hayvanın türü, yaşı, beslenme deseni ve yetiştirme koşulları; maruziyetin dozu/süresi ve parçacığın boyut-morfoloji-polimer özellikleriyle birleşerek, kas dokusunda saptanabilir yükün geniş aralıkta değişmesine neden olabilir (Shelver ve ark., 2024; Monclús ve ark., 2022; Akanda ve ark., 2025). İran’ın farklı bölgelerinde kesilen sığır ve koyunlardan alınan et, karaciğer ve işkembe örneklerinde mikroplastik varlığını ayrıntılı şekilde inceleyen Bahrani ve ark. (2024), raman spektroskopisi ile yapılan analizlerde, her iki hayvan türünün tüm dokularında mikroplastiklerin bulunduğu belirlemişlerdir. En sık görülen polimer türlerinin polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) olduğu rapor edilmiştir. Mikroplastik miktarları dokuya göre değişmiş; özellikle işkembe ve karaciğer dokularında, kas dokusuna kıyasla daha yüksek MP seviyeleri tespit edilmiştir. Çocuklar ve yetişkinler için yapılan tahmini günlük MP alımı hesaplamalarında, vücut ağırlığına göre çocukların daha yüksek maruziyet gösterdiği bulunmuştur. Örneğin, sığır eti tüketiminde

günlük MP alımı çocuklarda 0,64 adet/kg canlı ağırlık/gün iken yetişkinlerde 0,48 adet/kg canlı ağırlık/gün olarak hesaplanmıştır. Araştırma; kesim hijyeni, çevresel toz, hayvanların yediği yemler ve barınak koşulları gibi faktörlerin dokulardaki mikroplastik miktarını etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Elde edilen bulgular, çiftlik hayvanlarının yalnızca çevreden değil, aynı zamanda yem ve barınak materyallerinden de düzenli olarak mikroplastiklere maruz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle et, sakatat ve diğer hayvansal ürünlerdeki mikroplastik varlığının gıda güvenliği ve halk sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Kırmızı ette raporlanan polimerler çoğunlukla PE, PVC, PS, PET ve PP gibi yaygın ambalaj/süreç plastikleridir; bu durum hem hammaddeden hem de işleme–ambalajdan gelen çoklu girdilerle uyumludur (Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Saha verileri ayrıca, ruminant ve domuz gübrelerinde lif–film–fragment morfolojilerinde MP çeşitliliğini göstermekte; hayvanların üretim ortamında (yem torbası lifleri, silaj örtüsü kırıntıları, toz-aerosol) çoklu kaynaklara temas ettiğini düşündürmektedir (Beriot ve ark., 2021; Mohammadi ve ark., 2025). Bu bağlamda, kırmızı ette ölçülen MP'nin tek kaynağa indirgenemeyeceğini; çok-etmenli bir kontaminasyon tablosunun söz konusu olduğunu ortaya koymaktadır.

Metodolojik olarak çalışmalar; örnek hazırlamada enzimatik/kimyasal sindirim, polimer tanımlamada  $\mu$ FTIR/Raman veya pyrolysis-GC/MS yaklaşımlarına dayanmaktadır. Bir kısmı kütle ( $\mu$ g/kg), bir kısmı sayı (adet/kg) temelli raporlama yaptığından, sonuçların karşılaştırılması sınırlıdır; ayrıca örnekleme hijyeni ve “kör” kontrolleri özellikle düşük yüklerde belirleyici rol oynamaktadır (Toto ve ark., 2023; Abid ve ark., 2025). Bu nedenle, kırmızı ette MP'nin prevalans ve yüküne ilişkin güvenilir kıyaslamalar için standardizasyon gereklidir. Genel tablo, kırmızı ette MP'nin düşük–orta düzeyde fakat yaygın bir olgu olabileceğini; yükün hayvandan hayvana ve ürün tipine göre geniş aralıkta değiştiğini; işlenmiş/paketli ürünlerde ambalaj–süreç katkısının belirginleşebildiğini göstermektedir. Üretici ve denetim açısından, yem ve su hijyeninin yanı sıra kesim–işleme ekipmanı ve ambalaj materyallerinde aşınmayı azaltan seçimler, yüzey yenileme/bakım protokolleri ve MP-odaklı örnekleme/izleme planları anlamlı fayda sağlayacaktır (van der Veen ve ark., 2022; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025).

## 1.2. Beyaz Et

İnsan beslenmesinde gıdalar yoluyla maruziyet en önemli bulaşma yolu olup, deniz ürünleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına karşın (Smith ve ark., 2018; Xu ve ark., 2020), kırmızı et ve özellikle kümes hayvanları etindeki durum uzun süre ihmal edilmiştir. Oysa tavuk, dünya genelinde en fazla tüketilen et kaynağıdır (Whitton ve ark., 2021). Yakın zamanda, tavuk gübresinde MP varlığına işaret eden çalışmalar (Wu ve ark., 2021) ile tavuk etinde kesim tahtalarından kaynaklanan polietilen bazlı MP bulaşmasının ortaya konması (Habib ve ark., 2022), kanatlı etinde mikroplastik varlığının insan sağlığı açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Etlik piliç, yumurta tavuğu, hindi ve benzeri kanatlı türleri; kısa yaşam döngüleri, yüksek yemden yararlanma oranları ve yoğun yetiştirme koşulları nedeniyle mikroplastiklerin (MP) vücutta birikimi açısından kendine özgü bir maruziyet profili sergilemektedir. Kanatlılarda özgün bir maruziyet profili oluşmasının temelinde ise kısa fakat yoğun yaşam döngüsü boyunca yüksek miktarda yem tüketmeleri, sindirim kanalındaki hızlı geçiş süreleri ve metabolik hızlarının diğer çiftlik hayvanlarına kıyasla belirgin şekilde yüksek olması yatmaktadır. Sahadan elde edilen bulgular ve kontrollü deneysel modeller, mikroplastiklerin (MP) kanatlılarda başlıca sindirim sistemi yoluyla alındığını ve daha sonra kas dokusu da dâhil olmak üzere çeşitli organ ve dokularda izlenebildiğini ortaya koymaktadır. Pakistan'da sekiz farklı çiftlikten toplanan 24 etlik tavuğun kursak ve taşlık içeriklerinde toplam 1227 mikroplastik (MP) parçacığı tespit edilmiştir. Ortalama olarak bir tavuğun kursağında yaklaşık olarak 18, taşlığında ise yaklaşık olarak 33 adet MP parçacığı bulunmuştur. Partiküllerin çoğunluğu 300–500 µm boyut aralığında yer almakta olup, baskın morfolojiyi kırıntılar oluşturmaktadır (kursakta %64, taşlıkta %53). Polimer bileşimi açısından en yüksek oranı polivinil klorür (PVC, %51.2) göstermiş, bunu düşük yoğunluklu polietilen (LDPE, %30.7), polistiren (PS, %13.6) ve polipropilen homopolimer (PPH, %4.5) izlemiştir. Araştırmacılar, bu bulguları büyük ölçüde yem kaynaklı kontaminasyonla ilişkilendirmiştir (Bilal ve ark., 2023). Benzer biçimde, sahadan gelen gözlemler ve deneysel çalışmalar, tarımsal üretim alanlarında kullanılan plastik film ve bağ materyali kırıntılarının mer'a ve kaba yem akışına karışabildiğini ortaya koymuştur. Meksika'daki saha verileri,

mikroplastiklerin topraktan solucanlara ve oradan da tavuklara geçişini gösterirken (Huerta Lwanga ve ark., 2017), İspanya'daki gözlemler ise sebze tarlalarında malç film kalıntılarıyla beslenen koyunların dışkılarında yoğun mikroplastik varlığına işaret etmiştir (Beriot ve ark., 2021). Bu bulgular, hayvanların doğrudan plastik kalıntılarını tüketebildiğini ve sindirimsel maruziyetin süreklilik gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kas dokusunda mikroplastik birikimine dair kanıtlar hem saha verileri hem de kontrollü deneysel çalışmalarla desteklenmektedir. Büyük ölçekli bir piliç işletmesinden alınan göğüs ve but etlerinde tüm numunelerde mikroplastikler saptanmış; polimer kimliklendirmesi özellikle polistiren (PS) ve poliamid (PA6/PA66, naylon) lehine sonuçlanmıştır. Deneysel olarak, etlik piliçlere 21–35 gün boyunca PS-MP verilmesi göğüs kasında anlamlı düzeyde birikimi doğrulamıştır. Bu maruziyet, canlı ağırlık ve kas kütlesinde artışa yol açarken, et kalitesini belirleyen parametrelerde bozulma, enerji ve yağ metabolizmasında düzensizlikler, oksidatif stres belirteçlerinde yükselme ve nörotoksinite ile ilişkili genlerin ekspresyonunda değişiklikler ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, dokuya giren poliamidlerin kimyasal parmak izinin bir bölümünün PA6/PA66 olması, yem torbalarının iç astarlarının olası bir kaynak olabileceğini düşündürmektedir (Chen ve ark., 2023).

Kesim sonrası zincir, kanatlı etindeki mikroplastik yükünü artırabilecek ikinci bir eksen oluşturmaktadır. Fransa'da yapılan bir çalışmada, ekstrüde polistiren (XPS) tepsilerde paketlenen tavuk etlerinde 4.0–18.7 adet/kg düzeyinde mikroplastik saptanmış; FTIR analizleri bu parçacıkların doğrudan paketleme materyali kaynaklı polistiren olduğunu doğrulamıştır. Ortalama 300–450 µm boyutunda olan bu partiküller, et yüzeyine sıkıca yapıştıkları için basit yıkama ile uzaklaştırılmamış ve ambalaj–gıda temasında sürtünme/aşınma yoluyla kalıcı bir transferin gerçekleşebildiğini ortaya koymuştur (Kedzierski ve ark., 2020).

Ambalaj–gıda arasındaki potansiyel mikroplastik transferinin kaynağını geriye doğru izlemek için Raman tabanlı polimer kimliklendirmesi kullanılmakta; bu yaklaşımda ambalaj polimeri ile gıda matrisinde saptanan polimerlerin eşleşmesi, belirli korelasyon eşikleri üzerinden doğrulanabilmektedir (Devilliers ve ark., 2024). Tarama ve izleme açısından yapılan fizibilite çalışmalarında, ATR-MIR spektroskopisinin yüksek katkı düzeylerini (%1–10 arası) güvenilir biçimde ayırt edebildiği, ancak düşük

düzeylede (%0.02–1) doğru saptama oranlarının sınırlı kaldığı ve bu nedenle yöntem hassasiyetinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir (Huang ve ark., 2020). Kas gibi protein ve yağ bakımından zengin gıda matrislerinde ise polimer bütünlüğünü koruyarak matrisi uzaklaştırmaya yönelik ılımlı sıcaklık prensibine dayalı örnek hazırlama protokolleri öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, %10 KOH çözeltisinde 40 °C’de 48 saat sindirim ve ardından %30 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>’nin oda sıcaklığında kademeli eklenmesiyle gerçekleştirilen çift sindirim yöntemi, polimerlerin yapısını bozmadığı gibi, matrisi etkin biçimde ortadan kaldırarak mikroplastiklerin güvenilir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır (Devilliers ve ark., 2024).

Piyasada satılan kanatlı ürünlerinde bölgesel ölçekte de mikroplastik varlığı doğrulanmıştır. Orta Doğu’da marketlerden alınan bütün tavuk örneklerinde 0,03–1,19 parça/gram aralığında mikroplastik saptanmış; bu yük aynı çalışmadaki balık örneklerinde raporlanan 0,014–2,6 parça/gram düzeyleriyle benzer bulunmuştur (Akanda ve ark., 2025). Güncel derlemeler, kanatlıların kas, karaciğer ve gastrointestinal dokularında mikroplastik birikimlerinin yaygın biçimde raporlandığını ortaya koymaktadır (Corte Pause ve ark., 2024). Ayrıca, tavuklarda yapılan [<sup>14</sup>C]-polistiren deneyleri, alınan dozun büyük kısmının hızla dışkıyla atıldığını, ancak eser miktarda polistirenin kana ve yumurta bileşenlerine geçtiğini göstermiştir. Bu bulgular, sindirim yoluyla alınan mikroplastiklerin sınırlı da olsa dolaşıma taşınabileceğini ve kas gibi periferik dokularda düşük düzeyde birikimle uyumlu olduğunu düşündürmektedir (Shelver ve ark., 2024).

Milne ve ark. (2024) tarafından yapılan analizlerde, tavuk göğsünde kilogram başına 100 adet mikroplastik parçacığı bulunurken, tavuk nugget örneklerinde bu değer kilogram başına 310 parçacığa ulaşmıştır. Nuggetlerde gözlenen daha yüksek mikroplastik yoğunluğu, özellikle işleme aşamalarında oluşabilecek ek kontaminasyon riskine işaret etmektedir. Nitekim, ruminantlarda bildirilen bulgulara paralel olarak, kanatlı etinin yüzeyine mikroplastiklerin yapışabildiği ve et işleme süreçlerinin hayvansal ürünlerde önemli bir mikroplastik kaynağı olabileceği çeşitli çalışmalar tarafından yeniden vurgulanmıştır.

Kanatlı etlerinde saptanan polimer tayfi, üretim zincirinin farklı aşamalarını yansıtan çok yönlü bir kontaminasyon desenine işaret etmektedir. Yem ve çiftlik kaynaklı polipropilen (PP), polietilen (PE) ve poliamid (PA) ile

ambalaj, tepsi/film ve proses yüzeyleriyle ilişkili polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS) ve polivinil klorür (PVC) bu tayfin başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır (Chen ve ark., 2023; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Bu çoklu giriş yolları, kontaminasyonu tek bir kaynağa indirgemeyi güçleştirmekte, dolayısıyla gıda güvenliği değerlendirmesinde yalnızca 'parçacık varlığına' değil, maruziyetin biyolojik işlevsel sonuçlarına da odaklanmayı gerekli kılmaktadır. Nitekim, polietilen mikroplastiklerle yapılan M-ARCOL adlı yapay insan kalın bağırsak modelinde, bağırsakta normalde düşük miktarda bulunan bazı zararlı bakterilerin (Enterobacteriaceae ve Desulfovibrionaceae) çoğaldığı belirlenmiştir. Ayrıca kötü kokuya neden olan skatol isimli bileşiğin üretimi artmış ve bağırsak mikrobiyotasının ürettiği metabolitlerin genel yapısında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Kısa vadede bağırsak bariyer bütünlüğünde anlamlı bir değişiklik görülmemekle birlikte, bu mikrobiyota ve metabolit değişimleri, kanatlı ürünleri ve ambalajı kaynaklı mikroplastik maruziyetinin değerlendirilmesinde özellikle mikrobiyota bileşimi ve skatol gibi belirli metabolitlerin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır (Fournier ve ark., 2023).

Toplam bulgular, kanatlı etlerinde mikroplastik (MP) varlığının hem endojen (yem, çevresel maruziyet) hem de eksojen (işleme ve ambalaj) girdilerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yükün düzeyi; hayvanın üretim koşulları, kullanılan yem ve ambalaj materyali ile kesim ve işleme hattındaki hijyen uygulamalarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kaynak kontrolü için yem ambalajlarında aşınmaya dirençli malzemelerin tercih edilmesi ve kapalı transfer sistemlerinin uygulanması, kesim–işleme zincirinde plastik temasını en aza indiren ekipman seçimi ve düzenli bakım önlemleri, ayrıca ambalaj–gıda polimer eşleşmesini Raman tabanlı kimliklendirme ve korelasyon eşikleri ile iz sürme yaklaşımları önerilmektedir (Devilliers ve ark., 2024; Chen ve ark., 2023; Kedzierski ve ark., 2020; Akanda ve ark., 2025). Kanatlı etlerinde mikroplastik kirliliği artık çeşitli saha ve deneysel çalışmalarla kesin olarak gösterilmiştir. Bununla birlikte, bu yükün baskın kaynağının yem ve çevresel maruziyet gibi endojen girdilerden mi, yoksa kesim ve ambalaj süreçleri gibi eksojen girdilerden mi kaynaklandığı henüz netlik kazanmamıştır. Mevcut veriler, paketlenmiş tavuk etlerinde saptanan lif formundaki partiküllerin ambalajdan geçtiğini

gösterirken, tavukların sindirim sisteminde yüksek sayıda mikroparçacık bulunması içsel bulaş potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekte karkas ve kas dokularına yönelik ayrıntılı araştırmalar, bu kaynak katkılarının görece önemini aydınlatmada kritik rol oynayacaktır.

### 1.3. İşlenmiş Et Ürünleri ve Diğer Gıdalar

Sucuk, sosis, salam/jambon gibi işlenmiş et ürünleri, ham maddeden (et) gelebilecek içsel mikroplastik (MP) izlerine ek olarak, üretim hattındaki çok sayıda plastik temas yüzeyi nedeniyle eksojen kontaminasyona açıktır. Kıyma makinelerinin hazne ve burguları, plastik kaplı karıştırıcı kanatlar, taşıma bantları, tezgâh ve kesme tahtaları, koruyucu eldivenler ile dolum–vakum–kaplama aşamalarında kullanılan kılıf, tepsi ve film materyalleri sürtünme/aşınma yoluyla ürüne mikrolif ve mikrokırıntı bırakabilmektedir. Nitekim, paketlenmiş tavuk etlerinde polistiren esaslı ekstrüde köpük (XPS) tepsilerden lif/kırıntı salımının yüzeye geçtiği deneysel olarak gösterilmiştir (Kedzierski ve ark., 2020). Benzer şekilde, vakum paketlenmiş salam, bacon ve mortadella örneklerinde düşük yoğunluklu polietilenin (LDPE) depolanmanın 9–28. günleri arasında et yüzeyine geçtiği Raman spektroskopisi ile doğrulanmıştır (Katsara ve ark., 2022). Ayrıca, plastik kesme tahtalarından polietilen parçacıklarının tavuk etine transferi belgelenmiş, bunun işlenmiş/kırmızı et ürünleri için de olası bir risk olduğu vurgulanmıştır (Habib ve ark., 2022; Chen ve ark., 2023). İran’da yapılan güncel bir çalışmada, piyasadaki en çok tüketilen sosis markalarında 10–175 partikül/kg düzeyinde MP bulunmuş; partiküllerin çoğunluğu lif formunda olup başlıca polimerler polietilen (PE) ve polistiren (PS) olarak belirlenmiştir (Pirsaheb ve ark., 2024). Bu bulgular, işlenmiş et ürünlerinde MP yükünün yalnızca hammadde değil, aynı zamanda proses ve ambalaj kaynaklı çoklu girişlerle şekillendiğini göstermektedir. Dolayısıyla gıda güvenliği değerlendirmelerinde, hem ekipman/ambalaj kaynaklı sürtünme-aşınma transferleri hem de ürünün depolama koşulları dikkate alınmalıdır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Oyedun ve Lawal, 2023).

İşlenmiş et ürünlerinde bulunan yağ, protein ve baharatlar ile ambalajdan gelebilecek plastik kalıntıları, mikroplastik analizlerinde yanlış sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle güvenilir analiz yapabilmek için temiz oda koşullarında çalışmak, ayrıca mikroplastik içermemesi gereken kontrol

örnekleri (blank) ve işlem boşları kullanmak gerekir. Böylece sahte pozitif sonuçların önüne geçilebilir (Toto ve ark., 2023). Ambalajdan gıdaya olası geçişleri izlemek için, üründe bulunan polimer ile ambalaj polimerinin Raman veya FTIR spektrumları karşılaştırılarak korelasyon eşikleri üzerinden eşleştirme yapılabilir (Devilliers ve ark., 2024). Hızlı tarama için ATR-MIR yöntemi yüksek düzeydeki katkıları güvenilir biçimde tanıyabilmektedir ( $\geq\%1$ ), ancak düşük düzeylerin ( $<\%1$ ) doğru şekilde saptanabilmesi için yöntem hassasiyetinin artırılması gerekmektedir (Huang ve ark., 2020). Bu nedenle, kimyasal ve enzimatik sindirim protokollerinin doğrulanması ve birden fazla spektroskopik yöntemle teyit yapılması, işlenmiş ürünlerde mikroplastiklerin güvenilir biçimde belirlenmesi için temel yaklaşımlar arasında yer almaktadır.

Diğer gıdalar içinde hayvansal kökenli bal ve süt gibi ürünlerde de mikroplastik raporları artmaktadır. Balda, arıların çevreden taşıdığı lif formundaki parçacıklar başat olup Almanya'da market ballarında ortalama yaklaşık olarak 166 parça/kg düzeyi bildirilmiştir (Liebezeit ve Liebezeit, 2013). Tuz ve şeker gibi bileşenlerdeki MP'ler de işlenmiş et ürünlerine dolaylı giriş kapısı olabilir (Peixoto ve ark., 2019). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), gıda zinciri boyunca MP tespitlerine ilişkin kanıt birikimi nedeniyle konuyu izlemektedir (EFSA, 2016). Bu çerçevede, işlenmiş et ürünlerinde MP riskinin, ham madde kalitesi + işlem hijyeni + ambalaj seçimi üçlüsünün bileşkesiyle belirlendiği söylenebilir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020).

## 2. SÜT ve SÜT ÜRÜNLERİNDE MİKROPLASTİKLER

Çiğ süt, hayvandan elden edildiği haliyle, herhangi bir işleme tabi tutulmamış süttür. Süt ve ondan üretilen peynir, yoğurt, tereyağı, krema, sade yağ (ghee), ayran ve dondurma gibi ürünler, insan beslenmesinde temel bir yere sahiptir (Ahmad ve Aleem, 2023). Besin zincirinin kritik bir bileşeni olan süt, kalsiyum, protein ve çeşitli vitaminler başta olmak üzere birçok temel besin öğesinin doğal kaynağıdır ve aynı zamanda çok sayıda süt ürününün ana hammaddesini oluşturur. Bununla birlikte, süt üretiminde ortaya çıkabilecek her türlü kontaminasyon hem bu ürünlerin besinsel bütünlüğünü hem de tüketici sağlığını olumsuz yönde etkileyebileceğinden dikkatle değerlendirilmelidir (Górska-Warsewicz ve ark., 2019; Anika ve ark., 2025).

Süt; endojen (hayvan dolaşımından sınırlı geçiş) ve eksojen (sağım–toplama–işleme–ambalaj) olmak üzere iki ana yoldan MP içerebilir. Hayvan çalışmalarının bir kısmı, belirli senaryolarda süte geçen fraksiyonun %1’in altında kalabileceğine işaret eder; ancak bu oran tür, yem ve polimer tipine göre değişebilir ve saha doğrulaması gerektirir (Abid ve ark., 2025). Pratikte sütün MP yükünü çoğu kez ekipman ve ortam belirler: sağım başlıkları, hortum/contalar, vana–filtre elemanları, tank ve dolum hatları ile hava-toz yükü başlıca kaynaklardır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Toto ve ark., 2023).

Son yıllarda dünya genelinde yapılan çalışmalar, süt ve süt ürünlerinde mikroplastik (MP) kontaminasyonunun yaygın ve giderek önem kazanan bir gıda güvenliği sorunu olduğunu ortaya koymaktadır. Bangladeş’in Dakka bölgesinde beş farklı süt türü üzerinde yürütülen çalışmada 130–1666.73 MP/L düzeyinde mikroplastik saptanmış; parçacık boyutlarının  $>100 \mu\text{m}$  olduğu ve parçacıkların çoğunun lif, fragment ve pellet formunda olup polipropilen (PP), düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen (LDPE, HDPE) kaynaklı olduğu belirlenmiştir (Anika ve ark., 2025). Bangladeş’in güneybatı bölgesinde markalı sütlerde yapılan bir diğer araştırma ise 120–570 MP/kg ve 95–250 MP/L düzeylerinde kontaminasyon bildirmiş; parçacıkların  $>50 \mu\text{m}$  boyutunda olduğu ve özellikle poliamid, polietilen, polistiren, naylon 6 ve polipropilen gibi polimerlerin ağırlıkta olduğunu göstermiştir (Chakraborty ve ark., 2024). Meksika’da tam yağlı, yarım yağlı, hafif ve laktozsuz sütleri kapsayan çalışmada 3–11 MP/L düzeylerinde mikroplastik saptanmış; partiküllerin  $>11 \mu\text{m}$  boyutunda, mavi, kırmızı, kahverengi, yeşil ve pembe renklerde lif ve fragment formunda olduğu ve polifenilsülfon (polysulfone) polimerinin baskın olarak tespit edildiği rapor edilmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Avrupa’nın sekiz ülkesinde yağsız süt tozu üzerinde yapılan çalışmada 536 MP/kg düzeyinde mikroplastik bulunmuş; partiküllerin  $>60.50 \mu\text{m}$  boyutunda olduğu, siyah, mavi, kahverengi, fuşya, yeşil ve gri renklerde fiber, küresel ve düzensiz fragman formunda bulunduğu ve bunların polipropilen, polietilen, polistiren ve polietilen tereftalat kökenli olduğu belirlenmiştir (Visentin ve ark., 2024). İsviçre’de bütün sıvı süt, yağsız süt ve süt tozlarını kapsayan çalışmada 204–1004 MP/100 mL arasında mikroplastik rapor edilmiş; partikül boyutlarının  $\geq 5 \mu\text{m}$  olduğu, çok farklı renklerde lifsi fragmentlerden oluştuğu ve polipropilen, polietilen, polistiren,

poliamid ve polimetilmetakrilat gibi polimerleri içerdiği açıklanmıştır (Da Costa Filho ve ark., 2021). Ekvador'da yağsız sütlerde yapılan araştırmada MP düzeyinin 16–53 MP/L arasında değiştiği; parçacık boyutlarının 2.48–183.37 µm aralığında olduğu ve polipropilen, düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen ile poliakrilamid polimerlerinin tespit edildiği bildirilmiştir (Díaz-Basantes ve ark., 2020). Çin'de süt tozu üzerine yapılan bir başka çalışma, 1–11 MP/100 g düzeyinde mikroplastik varlığını ortaya koymuş; parçacıkların >50 µm boyutunda, şeffaf, beyaz ve mavi renklerde olup lif ve fragment formunda bulunduğu belirlenmiştir. Polietilen, polipropilen ve polietilen tereftalat bu ürünlerde baskın polimerlerdir (Zhang ve ark., 2023). İtalya'da anne sütü örneklerinde 3–11 MP/L düzeyinde mikroplastik tespit edilmiş; parçacık boyutlarının 2–12 µm olduğu, özellikle mavi ve turuncu–sarı renklerde fragmentler içerdiği ve polietilen, polivinil klorür ile polipropilenin öne çıktığı görülmüştür (Ragusa ve ark., 2022). Çin'de bebek beslenmesinde kullanılan mama şişelerinde yapılan çalışmada 2080–8220 MP/L gibi son derece yüksek düzeylerde mikroplastik bulunmuş; partiküllerin 20–50 µm aralığında olduğu ve polietilen tereftalat ile akrilat türevi polimerlerin yoğun olarak tespit edildiği rapor edilmiştir (Liu ve ark., 2023). Hindistan'da markalı süt ürünlerinde yapılan iki farklı çalışmada ise 25–30 MP/200 mL ve 164–427 MP/L arasında mikroplastik düzeyleri bildirilmiş; partiküllerin 2–12 µm ve <500 µm aralıklarında olduğu, kırmızı, mavi, mor, pembe ve yeşil renklerde lif, fragment ve pellet formunda bulunduğu ve polietilen glikol, polibütadien, polivinil klorür, polietilen, polipropilen ve poliakrilamid gibi polimer tiplerinin belirgin olduğu görülmüştür (Badwanache ve Dodamani, 2024; Kiruba ve ark., 2022).

Bu veriler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, süt ve süt ürünlerinde mikroplastik varlığının küresel ölçekte yaygın ve değişken bir sorun olduğu; ürün tipi, üretim süreci, paketlenme materyali ve bölgesel faktörlere bağlı olarak MP düzeylerinin ve polimer bileşimlerinin geniş bir aralıkta değiştiği anlaşılmaktadır. Bulgular, özellikle polietilen, polipropilen, polistiren, poliamid ve PET gibi yaygın sanayi polimerlerinin süt zincirine farklı aşamalarda karışabildiğini göstermekte ve bu durumun gıda güvenliği ile hayvansal üretimde halk sağlığı açısından önemli bir araştırma alanı oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nden alınan 588 çiğ süt örneğinin

incelendiği çalışmada örneklerin %89’unda mikroplastik tespit edilmiştir. Parçacıkların %52’si lif formundadır; boyutları 50 µm–mm aralığındadır. ATR-FTIR analizinde yedi polimer tipi belirlenmiş, bunların içinde etilen-propilen kopolimer (EPC) %77 ile en baskın bileşen olmuştur. Bunu PTFE, poliamid ve akrilik türevler izlemiştir. EPC’nin modern sağım sistemlerindeki hortum ve contaların aşınmasından; PTFE’nin ise valf ve kaplama malzemelerinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Sanayi bölgelerinden (İstanbul, Bursa, Kocaeli) alınan sütlerdeki MP miktarı kırsal örneklere göre belirgin biçimde yüksektir; bu durum ekipman profili ve çevresel toz yüküyle ilişkilendirilmiştir (Rbaibi Zipak ve ark., 2024).

Hollanda’da yapılan pilot bir çalışmada ise elle sağılmış beş örnekten birinde PMMA (polimetil metakrilat) 0,5 µg/g düzeyinde saptanırken, tank sütlerinde ölçümlerin çoğu LOQ (Limit of Quantification) yani kantitatif tayin sınırının altında kalmıştır. Buna karşılık, perakende tam yağlı pastörize sütlerde PVC (13 µg/g) ve PE (21 µg/g) tespit edilmiştir. Araştırmacılar, yağ fazının mikroplastikleri askıda tutma eğiliminin bu farklılığa katkı sağlayabileceğini belirtmiştir (van der Veen ve ark., 2022). Farklı araştırmalarda, çiğ ve ticari sütlerde PP, PE, PA, PET, PTFE, PES, PSU, EVA ve PU gibi çok çeşitli polimer türleri bildirilmiştir. Bu çeşitlilik, sütün birden fazla plastik yüzeyle temas ettiğini ve üretim süreçlerinin her tesis için kendine özgü “polimer imzası” oluşturabileceğini göstermektedir (Pironti ve ark., 2021; Basaran ve ark., 2023; Corte Pause ve ark., 2024; Ragusa ve ark., 2022). Bazı bölgelerde çiğ süte su eklenmesi uygulaması, suyun kendi MP yükü nedeniyle ikincil bir bulaşma kaynağı oluşturabilir. Ayrıca filtrelerin düzenli temizlenmemesi veya değiştirilmemesi, gözeneklerde biriken parçacıkların akışla süte karışmasına yol açabilir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). İşleme sonrası ürünlerde (pastörize/UHT süt, yoğurt, peynir vb.) üretim hattı ve ambalaj kaynaklı kontaminasyon devam edebildiğinden, hat–su–ambalaj etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir (Toto ve ark., 2023; Mondal ve ark., 2024).

İtalya’da gerçekleştirilen ve beş ticari markaya ait farklı tiplerde toplam 20 süt ürününün incelendiği çalışmada, örneklerin üçte ikisinden fazlasında mikro lif (MF) kontaminasyonu tespit edilmiştir. Ürünlerdeki lif seviyeleri %67,5’inde 1–27 lif/100 mL aralığında değişmiş olup, hem sentetik (polietilen, polyester, akrilik) hem de doğal/rejenere selülozik lifler

doğrulanmıştır. Süt zincirindeki kontaminasyonun kaynağı olarak filtreler, işleme hatları, membran sistemleri, çalışan kıyafetleri ve ortam havası gibi üretim zinciri unsurlarının öne çıktığı belirtilmiştir. Çalışmada özellikle “kan-süt bariyerinin” bu tür liflerin doğrudan meme dokusundan süte geçişini sınırladığı vurgulanmakta; dolayısıyla tespit edilen liflerin büyük ölçüde çevresel ve teknolojik süreçlerden kaynaklanan dış bulaşmalar olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca UHT sütlerde ve özellikle yağsız ürünlerde lif sayılarının daha yüksek bulunması, süt işleme süreçlerinin karmaşıklığı ve termal-mekanik etkilerin kontaminasyonu artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, sütteki mikroplastik ve mikro lif varlığının daha çok işlem zincirindeki ekipman kaynaklı fiziksel yıpranma ve çevresel döküntülerle ilişkili olduğunu ve üretim tesislerinde bütüncül kontrol önlemlerinin önemini ortaya koymaktadır (Santonicola ve ark., 2025). Süt tüketiminden kaynaklanan mikrofiber (MF) maruziyet düzeyi, bireylerin tüketim alışkanlıklarına ve yaş gruplarına göre değişiklik gösterebildiğinden, özellikle çocukların daha yüksek düzeyde maruziyete sahip olabileceği değerlendirilmektedir. Araştırmada tespit edilen 350–1000 µm boyutundaki MF’lerin yaygınlığı, bir yandan tüketici açısından nispeten daha güven verici olabilir; zira bu büyüklükteki liflerin normal koşullarda bağırsak epitelinden geçerek emilmesi beklenmemektedir. Ancak diğer yandan, bu liflerin sindirim sürecinde daha küçük parçalara ayrılabilmesi ve böylece vücudun farklı organlarına taşınma potansiyeli taşıdığı da göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, süt üretim zincirinin tamamının detaylı biçimde incelenmesi, MP ve MF kontaminasyonuna yol açabilecek kritik proses aşamalarının belirlenmesi ve buna yönelik etkili azaltma ile kontrol stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Mevcut bulguların sınırlılığı göz önünde bulundurulduğunda, konuya ilişkin daha kapsamlı araştırmalara duyulan ihtiyaç devam etmektedir.

İtalya’da yürütülen ve süt, taze peynir ve olgun peynir örneklerinde mikroplastik (MP) varlığını değerlendiren çalışmada, toplam 28 ürün ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve MP kontaminasyonunun hem niteliksel hem de niceliksel özellikleri ortaya konmuştur. Çalışmada 20 farklı polimer sınıfı tanımlanmış olup en sık rastlanan türün polietilen tereftalat (PET) olduğu, bunu polietilen (PE) ve polipropilen (PP) polimerlerinin izlediği bildirilmiştir. Tespit edilen MP’lerin büyük çoğunluğu 150 µm’den küçük boyutlarda, özellikle de 51–100 µm aralığında (%33,8) yoğunlaşmıştır. Parçacıkların

önemli bir kısmı irregüler (düzensiz) şekilli (%77,4) ve gri renkte (%68,4) bulunmuş, bu morfoloji işlem hatları, plastik ekipman yüzeyleri ve ambalaj materyallerinin mekanik aşınmasıyla ilişkili olası kaynakları desteklemiştir. Ürün türüne göre bakıldığında olgun peynirde 1857 MP/kg, taze peynirde 1280 MP/kg ve sütte 350 MP/kg düzeylerinde kontaminasyon saptanmıştır. Peynirlerdeki yüksek değerler, peynir yapım sürecinin (süzme, pıhtı oluşturma, presleme, olgunlaştırma) katı madde oranını artırarak mevcut MP'leri yoğunlaştırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bulgular genel olarak, farklı süt ürünlerinde plastik temelli ekipman, ambalaj ve işlem yüzeylerinin MP kontaminasyonunda temel rol oynadığını ve işleme adımlarının yoğunluğu arttıkça MP seviyelerinin de yükseldiğini göstermektedir (Visentin ve ark., 2025)

Türkiye'de bir süt işletmesinde ayran üretim hattı boyunca yapılan proses-içi izlemeler, mikroplastik (MP) yükünün yalnızca hammaddeden değil, üretim adımlarının kendisinden de önemli ölçüde kaynaklandığını göstermiştir. Çalışmada en yüksek MP yoğunluğu, salamura suyu (43 MP/100 mL), tuz (33 MP/100 g) ve pastörizasyon–homojenizasyon aşaması (26 MP/100 mL) gibi yardımcı girdiler ve ısı-mekanik aşamalarla ilişkili noktalarda tespit edilmiştir. Final ürün olan ayranda ise 18 MP/100 mL düzeyinde kontaminasyon belirlenmiştir. Araştırmacılar, günler arası hammadde (süt) varyasyonunun bulunmasına rağmen MP yükünü asıl belirleyen unsurların kullanılan suyun kaynağı, tuzun kalitesi, polimer esaslı contalar, hortumlar, vana ve filtre yüzeyleri gibi ekipman elemanları olduğunu vurgulamaktadır. Bu sonuçlar, özellikle ayran gibi fermente süt ürünlerinde yardımcı malzemelerin (su, tuz, salamura) ve metal–plastik temas yüzeylerinin düzenli olarak izlenmesinin ve kontrol edilmesinin, proses kaynaklı MP bulaşmasını azaltmak açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Buyukunal ve ark., 2023).

Süt ve süt ürünlerinde mikroplastiklerin güvenilir biçimde tespit edilmesi uzun süre mümkün olmamış, özellikle 20 µm'den küçük parçacıkların ayrıştırılması ve polimer yapısının doğrulanması metodolojik sınırlıklar nedeniyle güçlük yaratmıştır. Da Costa Filho ve ark. (2021), enzimatik–kimyasal sindirim ile mikro-Raman spektroskopisini birleştiren analitik bir protokol geliştirerek bu boşluğu dolduran ilk çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Bu bütünleşik yöntem, süt matrisinin kontrollü şekilde

parçalanmasını sağlarken polimer bütünlüğünü korumakta ve  $\geq 5$   $\mu\text{m}$  boyutundaki mikroplastiklerin yüksek uzaysal hassasiyetle tanımlanmasına imkân vermektedir. Araştırmacılar, yöntemin ham süt, pastörize süt ve toz süt dâhil farklı ürünlerde güvenilir şekilde çalıştığını doğrulamış ve böylece süt ürünlerinde küçük boyutlu mikroplastiklerin analitik olarak kanıtlanabilir hale geldiğini göstermiştir. Bu yaklaşım, özellikle daha önceki  $\mu\text{FTIR}$  veya görsel taramaya dayalı çalışmaların tespit edemediği küçük boyutlu parçacıkların ortaya konması açısından önemli bir metodolojik ilerleme olarak değerlendirilmektedir.

Rbaibi Zipak ve ark. (2022) İstanbul'da orta ölçekli bir yoğurt üretim tesisinde yürüttüğü çalışmada, üretim hattındaki 12 proses aşamasından/örnekleme noktasından alınan numunelerde toplam 171 mikroplastik (MP) parçacığı belirlenmiş ve MP yoğunluğunun 20–580 parçacık/L aralığında değiştiği gösterilmiştir. En yüksek kontaminasyon düzeyi yoğurt kaplarının doldurulması aşamasında saptanmış; süt kabul, pastörizasyon ve homojenizasyon basamakları da görece yüksek MP yükü taşıyan kritik noktalar olarak dikkat çekmiştir. Mikroskopi, SEM ve ATR-FTIR analizleriyle tanımlanan polimer türleri arasında etilen-propilen, neopren, polikrilamid ve polietrafloroetilen (PTFE) gibi endüstriyel polimerler yer almakta; tartışma bölümünde bu bileşiklerin işletmede kullanılan contalar, boru ve hortum sistemleri, filtrasyon membranları, valfler ve diğer plastik temas yüzeyleriyle ilişkili muhtemel kaynaklar olabileceği belirtilmektedir. Çiğ süt ve yoğurt kaplarında özellikle yüksek MP konsantrasyonları bildirilmiş; bu durumun süt taşımada kullanılan tankerler, depolama tankları, lastik aksamlar ve temizlik işleminde kullanılan su ve kimyasallar gibi süreç bileşenlerinden kaynaklanabileceği vurgulanmıştır. Parçacıkların önemli bir kısmı 1–150  $\mu\text{m}$  boyut aralığında olup farklı renk ve morfolojik özellikler (lif, fragment, film, küre) sergilemektedir. Türk Beslenme Rehberi'nde önerilen yoğurt tüketim miktarları esas alınarak, çocuklar, ergenler, gebeler ve emzirenler ile postmenopozal kadınlar için yaklaşık 134–268 MP/gün, yetişkin bireyler için ise yaklaşık 200 MP/gün düzeyinde potansiyel maruziyet hesaplanmış ve bu maruziyetin insan sağlığı açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Genel olarak çalışma, yoğurt üretiminde mikroplastik kontaminasyonunun yalnızca hammadde süttten değil, proses hattındaki çok sayıda plastik temas yüzeyinden

kaynaklanabileceğini göstermekte ve süt ürünlerinde MP risk değerlendirmesi için proses içi kontrol ve ekipman yönetiminin kritik önemini ortaya koymaktadır. Öte yandan Banica ve ark. (2024) yapmış oldukları araştırmasında hem konvansiyonel hem de organik yoğurt örneklerinde doğal ve sentetik kökenli mikropartiküllerin varlığı doğrulanmış, bu partiküller optik mikroskopi ve mikro-FTIR ile morfolojik ve kimyasal açıdan detaylı biçimde karakterize edilmiştir. Toplam 17 yoğurt örneğinde mikropartikül yükü konvansiyonel ürünlerde 400–4600 MP/kg, organik ürünlerde ise 800–4400 MP/kg aralığında değişmiş ve tüm örneklerde toplam 38.200 mikropartikül tespit edilmiştir. FTIR ile analiz edilen 236 partikülün yaklaşık yarısının pamuk, selüloz, keten veya yün gibi doğal lifler; diğer yarısının ise polyester, naylon, akrilik, elastan, polietilen veya poliüretan içeren sentetik partiküller olduğu belirlenmiştir. Kirlilik yük indeksine göre örneklerin önemli bir bölümü ‘orta’, ‘yüksek’ ve ‘çok yüksek tehlike’ kategorilerinde sınıflandırılmıştır. Çalışmada ayrıca mikropartiküllerin kaynağının çiğ sütün toplanması, taşınması, üretim hattındaki ekipman ve proses adımları, işçi kıyafetleri, kişisel koruyucu ekipmanlar ve ambalaj materyalleri gibi geniş bir zincir boyunca ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır. Araştırmacılar, süt ürünlerinde mikroplastik tespitine yönelik standart bir analitik protokol bulunmamasının önemli bir eksiklik olduğunu belirtmiş ve çalışmanın süt bazlı gıda ürünlerinde mikroplastik maruziyetinin anlaşılmasına yönelik gelecekteki araştırmalar için temel oluşturması gerektiğini ifade etmişlerdir.

### 3. YUMURTALARDA MİKROPLASTİKLER

Yumurta, oluşumu bütünüyle tavukların iç ortamına dayanan bir biyolojik üründür; bu nedenle yenilebilir fraksiyonunda (ak ve sarı) saptanan mikroplastiklerin (MP) temel kaynağı, hayvanın endojen maruziyeti ve dolaşım transferidir. Dışsal bulaş çoğunlukla kabuk yüzeyiyle sınırlıdır ve içerik analizlerinde kabuğun ayrılması/temizlenmesiyle büyük ölçüde kontrol edilebilir.

Pazardan temin edilen yumurtalar üzerinde yapılan ilk nicel çalışmalar, düşük de olsa tutarlı MP varlığına işaret etmektedir. Çin’de yapılan bir çalışmada, bir adet yumurtada ortalama 11–12 mikroplastik parçası bulunduğu belirlenmiştir. Bu parçaların büyük kısmı yumurta sarısında (yaklaşık 8.95 adet) görülürken, yumurta akında ise ortalama 3.40 adet

mikroplastik tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2022). Baskın polimerin polietilen (PE) olması ve sarı fraksiyonunda sayımın daha yüksek çıkması, lipofilik matrisin (yumurta sarısı) hidrofobik mikroparçacıkları daha kolay tutmasıyla uyumludur (Liu ve ark., 2022). Aynı çalışmada buharda pişirmenin yumurtadaki MP sayısını anlamlı biçimde azaltmadığı, evsel pişirmenin MP'leri uzaklaştırmadığı bildirilmiştir (Liu ve ark., 2022).

Bu konuda en net mekanizma kanıtı, yumurtacı tavuklarda yapılan ve radyoaktif işaretli polistiren mikroplastiklerin takip edildiği bir çalışmadan elde edilmiştir. Tek bir doz verildikten sonra, mikroplastiklerin yaklaşık %96,8'i ilk 24 saatte dışkıyla atılmıştır. Ancak dozun çok küçük bir kısmı (yüzde 1'den az) kana geçebilmiş ve zaman içinde hem yumurta akında hem de sarısında izlenebilir seviyelere ulaşmıştır (Shelver ve ark., 2024). Çalışmada, uygulamadan sonraki ilk günlerde gelişmekte olan yumurta foliküllerinde sinyal görülürken, 2-4. günlerde bu işaretin olgun yumurta sarısına taşındığı belirlenmiştir. Bu bulgular, mikroplastiklerin bağırsaktan kana, oradan da ovaryuma sınırlı düzeyde de olsa geçebildiğini göstermektedir ve pazardan alınan yumurtalarda tespit edilen mikroplastiklerle uyumludur (Liu ve ark., 2022). Saha çalışmalarında elde edilen sonuçlar değerlendirilirken, yumurtalara üretim sonrası süreçlerden gelebilecek dış kaynaklı plastik katkılarının da olabileceği unutulmamalıdır. Özellikle polietilenden (PE) üretilen ambalaj malzemeleri, taşıma kapları veya yıkama hattındaki plastik fırça kılları yumurta kabuğu üzerinde lif bırakabilir. Yumurta kırılırken bu liflerin iç kısma geçmesi de teorik olarak mümkündür. Ancak Liu ve ark. (2022), bu olası dış karışımları azaltmak için yumurta içeriğini kabuktan tamamen ayırıp sindirerek analiz ettiği bir yöntem kullanmıştır. Buna rağmen, büyük ölçekli ticari üretimlerde ambalajlama ve yıkama süreçleri az da olsa ikincil bir kontaminasyon kaynağı olmaya devam edebilir. Tavuğun gastrointestinal maruziyeti yumurtaya giden endojen yükün temel belirleyicisidir. Serbest dolaşım/zemin temaslı sistemlerde toprak-omurgasız-kanatlı zinciriyle MP geçişi belgelenmiş; tavukların taşlık/kursak içeriklerinde PVC, PE, PS, PP türü çok sayıda parçacık sayılmıştır (Huerta Lwanga ve ark., 2017; Bilal ve ark., 2023). Bu durum, tavukların yem, su ve çevresel tozlar yoluyla mikroplastiklere sürekli olarak maruz kaldığını ve bu nedenle kanda az miktarda da olsa taşınan bir mikroplastik fraksiyonunun bulunduğunu göstermektedir. Kontrollü deney sonuçları da, yumurtaya geçen

miktarda çok küçük olduğunu ancak tamamen sıfır olmadığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Shelver ve ark., 2024).

Gıda güvenliği perspektifinde, yumurta başına birkaç parçacık düzeyi “düşük” görünse de düzenli tüketimle kümülatif alıma katkıda bulunabilir; farklı gıdaların toplamından yıllık on binler mertebesinde MP alımı olabileceği öngörülmüştür (Cox ve ark., 2019). Ayrıca parçacık boyutu da önemli bir etkidir. Mikrometre büyüklüğündeki mikroplastiklerin vücutta ilerlemesi oldukça sınırlıdır; buna karşılık nano boyuttaki çok daha küçük parçacıklar daha kolay emilir ve dokulara ya da yumurta gibi hayvansal ürünlere geçme ihtimalleri daha yüksektir. Bu nedenle özellikle nano boyut aralığı, mikroplastiklerin yumurtaya geçişi açısından hâlâ daha fazla araştırılması gereken kritik bir bölge olarak görülmektedir (Shelver ve ark., 2024). Pratikte mikroplastik kontrolü için üç temel nokta önemlidir.

(i) Yem ve su kalitesinin iyileştirilmesi: Yem torbalarındaki plastik astarlar, naylon lifler ve içme suyu hatlarındaki plastik parçalar gibi kaynakların azaltılması gerekir.

(ii) Yumurta işleme alanında hijyen: Yıkama sularının filtrelenmesi, plastik fırçaların aşınmasının kontrol edilmesi ve polietilen (PE) tabanlı iç kartuşlar yerine daha güvenli alternatiflerin kullanılması önerilir.

(iii) Analiz sürecinde kalite kontrol: Yumurta kabuğu ile içeriğinin doğru şekilde ayrılması, saha ve laboratuvar boş örneklerinin kullanılması ve laboratuvar ortamındaki hava kaynaklı lif karışımlarının pamuklu tekstillerle izlenmesi gerekir.

Mevcut bulgular, yumurtanın mikroplastik geçişini izlemek için uygun bir biyogösterge olduğunu ve geçişin düşük düzeyde de olsa gerçekleştiğini göstermektedir (Liu ve ark., 2022; Shelver ve ark., 2024). Daha geniş kapsamlı ve farklı bölgeleri kapsayan çalışmalar, yetiştirme sistemi, yem kalitesi ve ambalaj uygulamalarının etkilerini daha net ortaya koyacak ve riskin nasıl yönetilebileceğini daha açık biçimde gösterecektir.

#### **4. MİKROPLASTİKLERİN HAYVAN SAĞLIĞI ve ÜRÜN KALİTESİNE ETKİLERİ**

Mikroplastiklerin (MP) çiftlik hayvanları üzerindeki etkileri, ekotoksikoloji ve hayvan besleme bilimlerinin kesişim noktasında hızla gelişen bir araştırma alanıdır. Bugüne kadar elde edilen deneysel ve saha

verileri, MP maruziyetinin hayvan organizmasını yalnızca mekanik bir irritan olarak etkilemediğini; aynı zamanda hücresel düzeyde biyokimyasal, immünolojik ve metabolik yanıtları tetikleyen çok katmanlı bir stres etmeni olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Bu yanıtlar, hayvan sağlığı-refahı ekseninde önemli sonuçlar doğurmakta ve nihayetinde elde edilen hayvansal ürünlerin (et, süt, yumurta) kalitesini dolaylı veya doğrudan etkileyebilmektedir.

MP'lerin biyolojik etkisini belirleyen temel faktörler partikül boyutu, şekli, polimer türü, yüzey yükü, maruziyet süresi ve eşlik eden kimyasal kirlenicilerdir. Özellikle 150 µm'den küçük parçacıklar, gastrointestinal bariyeri aşarak sistemik dolaşıma geçme potansiyeli taşımaktadır. Nanoplastik boyutuna yaklaştıkça hücre düzeyindeki biyoyararlanım artmakta; hücre membranıyla doğrudan etkileşim, endositoz ile alım ve lizozomal fonksiyonlarda bozulma gibi mekanizmalar daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum literatürde "membran-stres yanıtı" olarak tanımlanan süreci tetiklemekte; iyon dengesi, mitokondriyal fonksiyon ve hücre içi redoks yapıları üzerinde baskı oluşturmaktadır.

Oksidatif stres, MP maruziyetinin en tutarlı biyobelirteçlerinden biridir. Polistiren, polietilen ve polipropilen gibi yaygın polimerlerle yapılan deneylerde; süperoksit üretimi, glutasyon tüketimi, lipid peroksidasyonu ve DNA hasarı belirgin biçimde artmıştır. Oksidatif stresin kronikleşmesi durumunda hücre membranı bütünlüğü zayıflamakta, bağırsak epitel bariyeri geçirgenliği artmakta ("leaky gut" benzeri tablolar) ve bağışıklık sisteminde sapmalar meydana gelmektedir. Bu mekanizmalar hem ruminantlarda hem de kanatlılarda bildirilen subklinik inflamasyon, bağırsak mikrobiyotasında dengesizlik ve besin emiliminde azalma gibi bulgularla uyumludur. Ayrıca MP yüzeylerinin hidrofobik yapısı, dioksin, PCB, PAH, ftalatlar ve ağır metaller gibi toksik maddelerin adsorpsiyonuna izin verdiğinden, bu partiküller hayvan dokusunda bir "kimyasal taşıyıcı" niteliği kazanabilmektedir.

Sindirim fizyolojisi açısından bakıldığında MP'ler, mekanik aşındırıcı etkileri nedeniyle taşlık zedelenmesi, bağırsak mukozasında irritasyon ve epitel yüzeyinde mikroerozyonlar oluşturabilir. Kanatlılarda taşlık içeriğinde yoğun MP varlığının saptanması, özellikle yem torbaları, altlık materyalleri ve çevresel toz yüküyle ilişkili sürekli bir alım döngüsüne işaret etmektedir. Bu

durum, büyüme performansı üzerinde iki yönlü etki yaratabilir: (i) düşük dozlarda enerji metabolizmasında düzensizlik, büyümede yavaşlama ve yemden yararlanma oranında bozulma; (ii) bazı deneysel modellerde görüldüğü gibi, oksidatif stres kaynaklı “hiperkompansasyon” ile kısa dönemli canlı ağırlık artışı. Ancak bu ikinci durum çoğunlukla kalitesiz karkas kompozisyonu, su tutma kapasitesinde azalma, pH dengesinin bozulması ve göğüs eti miyopatilerinde (ör. wooden breast) artış gibi kalite sorunlarıyla birlikte görülmektedir.

MP maruziyetinin bağışıklık sistemi üzerine etkileri de giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Özellikle makrofaj ve heterofil gibi fagositik hücrelerde MP birikimi, lizozomal stabilitenin bozulmasına ve inflamatuvar sitokin üretiminin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, hayvanın enfeksiyonlara verdiği yanıtı değiştirebilir, aşılama başarısını etkileyebilir ve metabolik stres dönemlerinde (ör. pik laktasyon, hızlı büyüme) bağışıklık sistemini daha kırılgan hale getirebilir. Ruminantlarda rapor edilen rumen mikrobiyota değişimleri, uçucu yağ asitlerinin üretiminde kaymalara neden olabilir ve sonuçta süt verimi–kompozisyonu üzerinde etkiler gösterebilir.

Reprodüktif fizyoloji açısından MP’lerin potansiyel etkileri henüz başlangıç aşamasında olsa da, in-vitro modellerde gonad hücrelerinde oksidatif stres, steroidogeneze bozulma ve spermatozoa fonksiyonlarında azalma bildirilmiştir. Kanatlılarda yapılan radyoaktif izleme çalışmaları ise MP’lerin çok küçük bir fraksiyonunun ovaryuma ulaşabildiğini, yumurtanın gelişim dönemine göre sarı ve hatta albümine geçebildiğini göstermektedir. Bu bulgular, MP’lerin yem kaynaklı maruziyetinin, özellikle yoğun yumurta verimi beklentisi olan sürülerde potansiyel bir reprodüktif stres bileşeni olabileceğini düşündürmektedir.

Hayvansal ürün kalitesi bakımından MP’ler, içsel (doku içi) ve dışsal (işleme–ambalaj süreçleri) kaynaklı olmak üzere iki yönlü risk oluşturur. Doku içinde birikim, ürünün güvenilirliğini ve tüketici algısını zedeleyebilir; dışsal bulaşma ise özellikle kesim ve işleme zincirinde kullanılan plastik yüzeylerin aşınmasına bağlıdır. Kas dokusunda MP varlığının etin renk stabilitesi, oksidatif raf ömrü ve tekstürel özellikler üzerinde dolaylı etkileri olabileceğine dair hipotezler giderek güçlenmektedir. Benzer şekilde süt ürünlerinde ekipman kaynaklı MP yükünün artması, peynir altı suyu proteinlerinin oksidasyonunu, yağ globül membranının bozulmasını ve ürünün

raf ömrünü etkileyebilir.

Nitekim mevcut veriler, mikroplastiklerin çiftlik hayvanlarında çok boyutlu fizyolojik stres oluşturduğunu, bağırsak mikrobiyotasından immün sisteme, metabolik dengeden ürün kalitesine kadar uzanan geniş bir etki alanına sahip olduğunu göstermektedir. Mikroplastiklerin hayvan sağlığı üzerindeki etkileri, klasik toksikolojik yaklaşımlarla tam olarak açıklanamamaktadır; çünkü MP'ler hem fiziksel partikül hem de kimyasal kontaminant taşıyıcısı olarak "ikili bir stresör" niteliği taşımaktadır. Bu nedenle gelecekte, yem hijyeni-çevresel maruziyet-işleme ekipmanları üçlüsünü birlikte değerlendiren bütüncül risk modelleri geliştirilmesi; ayrıca MP ve nanoplastiklerin biyoyararlanımı, toksikodinamik etkileri ve ürün kalitesine uzun vadeli yansımalarını ele alan disiplinler arası çalışmaların artırılması gerekmektedir.

## 5. SONUÇ

Mikroplastikler, günümüz hayvancılık sistemlerinin öngörmediği ölçüde yaygın ve giderek büyüyen bir çevresel stres faktörü hâline gelmiştir. Çevreye karışan milyonlarca ton plastik atığın zaman içinde parçalanmasıyla oluşan bu mikroskobik parçacıklar, artık yalnızca denizel canlılarda değil; sığır, koyun, domuz ve özellikle kanatlılar gibi karasal çiftlik hayvanlarında da düzenli biçimde tespit edilmektedir. Bu durum, hayvan üretim zincirinin tamamını—yem tedarikinden kesim ve işleme süreçlerine kadar—ilgilendiren çok boyutlu bir gıda güvenliği ve hayvan refahı sorununu gündeme getirmektedir.

Bölüm boyunca sunulan kanıtlar, mikroplastiklerin hayvan organizmasını yalnızca "yabancı partiküller" olarak değil, çok yönlü bir fizyolojik stresör olarak etkilediğini göstermektedir. Partikül boyutu küçüldükçe ve yüzey kimyası daha reaktif hâle geldikçe; oksidatif stres, inflamasyon, bağışıklık yanıtının baskılanması, bağırsak bariyer disfonksiyonu, hormonal dengesizlik ve enerji metabolizmasında düzensizlik gibi çok katmanlı biyolojik etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu etkilerin bir kısmı kısa vadede performans parametrelerine yansiyabilirken, bir kısmı ise yalnızca moleküler düzeyde başlayıp uzun süre gözden kaçabilecek kronik hasarlara dönüşebilmektedir.

Kanatlılarda taşlık ve bağırsak içeriğinde yüksek sayıdaki

mikroplastiklerin rapor edilmesi, maruziyetin sürekliliğini ve çevresel girdilerin (yem torbaları, altlık materyalleri, toz yükü, su hattı boruları) önemini açıkça ortaya koymaktadır. Deneysel veriler, kas dokusunda birikebilen mikroplastiklerin et kalitesini; renk stabilitesi, pH dengesi, su tutma kapasitesi ve oksidatif bozulma gibi önemli kalite ölçütleri üzerinden olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu durum, hem üreticiler hem de tüketiciler açısından giderek daha dikkat çeken bir konu hâline gelmektedir. Özellikle paketli beyaz et ve kırmızı et ürünlerinde saptanan lif formundaki plastik parçacıkların, işleme ve ambalaj aşamalarındaki sürtünme-aşınma kaynaklı “eksojen bulaşma” yoluyla ete geçebilmesi, gıda zincirinde ekipman ve ambalaj yönetiminin kritik rolünü vurgulamaktadır.

Süt ve süt ürünlerinde bildirilen veriler, mikroplastik kontaminasyonunun yalnızca hayvansal dokulara sınırlı olmadığını; sağım sistemleri, hortumlar, filtreler, membranlar ve ambalaj materyallerindeki aşınmanın da önemli bir paya sahip olduğunu göstermiştir. Yoğurt üretim hatlarında süreç içi örnekleme yüksek MP yüküne işaret etmesi, bu kontaminasyonun kaynağının büyük ölçüde hammadde dışı faktörlerden (su, tuz, ekipman yüzeyleri, hava kaynaklı lifler) kaynaklanabileceğini daha da belirgin hâle getirmiştir. Benzer şekilde yumurtada saptanan düşük düzeyli fakat tutarlı mikroplastik varlığı, gastrointestinal maruziyetin küçük bir fraksiyonunun kan dolaşımı üzerinden ovaryuma ve gelişen yumurta bileşenlerine taşınabildiğini göstermektedir.

Bu bulguların tamamı, hayvansal ürünlerde saptanan mikroplastiklerin tek bir kaynağa indirgenemeyeceğini, aksine hem endojen (hayvanın absorbe ettiği) hem de eksojen (işleme/ambalaj süreçlerinden gelen) girdilerin birlikte katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle mikroplastiklerin risk değerlendirmesi, yalnızca “üründe partikül var mı?” sorusuna indirgenemeyecek kadar karmaşıktır; maruziyetin biyolojik sonuçları, partikülün polimer türü, boyutu, şekli, yaşlanma derecesi ve yüzeyindeki kimyasal kirleticiler de dikkate alınmalıdır.

Bu alandaki en önemli sınırlılıklardan biri, hayvanların gerçek üretim koşullarında karşılaştıkları maruziyet düzeyleri ile laboratuvar modellerindeki maruziyet arasındaki ciddi farklılıktır. Çoğu deneyde hayvanlar, doğal koşullarda maruz kalmayacakları derecede yüksek dozda ve tek tip polimerle karşılaştırılmakta, bu da sonuçların ticarî üretim koşullarına doğrudan

uyarlanmasını güçleştirmektedir. Üstelik mikroplastiklerin çevredeki yaşlanma derecesi, oksidatif bozunma ürünleri ve ağır metal-organik kirleticileri adsorbe etme kapasitesi gibi gerçek hayata özgü özellikler, deneysel tasarımlarda yeterince temsil edilmemektedir.

Bir diğer bilgi boşluğu, mikroplastiklerin yemden hayvana ve oradan insana taşınma mekanizmalarının hâlen tam olarak aydınlatılamamış olmasıdır. Özellikle 10–100 µm boyutundaki parçacıkların bağırsak duvarından hangi mekanizmalarla geçtiği, dolaşımında ne kadar süre kaldığı ve farklı dokularda birikim dinamiklerinin nasıl şekillendiği konusu daha fazla araştırmayı gerektirmektedir. Aynı şekilde nanoplastik boyutuna inildiğinde biyoyararlanımın daha da arttığı bilinmekle birlikte, bu parçacıkların dokular ve ürünler üzerinden insan sağlığına taşınması hâlen büyük ölçüde belirsizdir.

Mevcut veriler ışığında, çiftlik ortamlarında mikroplastik maruziyetini azaltmak için geliştirilebilecek stratejiler; yem ambalajı ve ekipman aşınmasının en aza indirilmesi, su hattı borularında polimer türevli materyaller yerine alternatiflerin tercih edilmesi, altlık materyallerinin düzenli izlenmesi, temizlik süreçlerinde mikroplastik yükü düşük su kaynaklarının kullanılması ve plastik bazlı ekipmanların kullanım ömrü-aşınma davranışlarının izlenmesi gibi çok yönlü yaklaşım gerektiren adımları içermektedir. Buna ek olarak, mikrobiyal biyobozunma potansiyeli üzerine yapılan araştırmaların hızlanması, çevresel kalıcılığı azaltmaya yönelik sürdürülebilir biyoteknolojik stratejilerin geliştirilmesi açısından umut vericidir; ancak endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik henüz sınırlıdır.

Sonuç olarak, mikroplastiklerin hayvan sağlığına, üretim performansına ve hayvansal ürünlerin güvenilirliğine yönelik etkileri artık göz ardı edilemeyecek kadar açık bir bilimsel gündem oluşturmuştur. Bu krizin etkili yönetimi, yalnızca hayvan besleme veya gıda hijyeni disiplinlerinin sınırlarını aşmakta; çevre bilimleri, toksikoloji, analitik kimya, veteriner hekimlik, biyomühendislik ve gıda teknolojisinin birlikte ele alması gereken kapsamlı bir araştırma alanı hâline gelmektedir. Mikroplastiklerin hayvansal üretim sistemlerindeki davranışını, toksisite mekanizmalarını ve insan sağlığına olası uzun vadeli etkilerini tam olarak anlayabilmek için çok merkezli, standardize edilmiş, disiplinler arası araştırmaların önümüzdeki yıllarda hızla artması zorunluluktur.

Mikroplastiklerin yükünü azaltmaya yönelik etkili ve sürdürülebilir

stratejiler geliştirilmedikçe hem hayvan sağlığı hem de insan sağlığı açısından risklerin büyümeye devam edeceği açıktır. Bu nedenle, plastik kullanımının azaltılması, ileri analitik yöntemlerle düzenli izleme sistemlerinin kurulması, yem ve gıda zincirinde kritik kontrol noktalarının belirlenmesi ve bilim temelli düzenlemelerin güçlendirilmesi; hayvansal üretimin geleceği ve toplum sağlığı açısından stratejik bir öncelik olmalıdır.

## KAYNAKÇA

- Abd El-Hack, M. E., Ashour, E. A., AlMalki, F., Khafaga, A. F., Moustafa, M., Alshahrani, M. O., Youssef, I. M., Elolimy, A. A., & Świątkiewicz, S. (2025). Harmful impacts of microplastic pollution on poultry and biodegradation techniques using microorganisms for consumer health protection: A review. *Poultry Science*, *104*, 104456.
- Abid, K., Aroua, M., Barbera, S., Petrucco, S. G., Kaihara, H., Mahouachi, M., Ben Saïd, S., & Tassone, S. (2025). Effect of microplastic contamination on in vitro ruminal fermentation and feed degradability. *Animal Science Journal*, *96*, e70063.
- Ahmad, U., & Aleem, K. (2023). A review exploring the incorporation of microalgae to enhance the nutritional profile and health benefits of dairy products. *Agrobiological Records*, *13*, 92–100.
- Akanda, M. R., Kawsar, M. A., Sabuj, M. S. S., Ashik-Uz-Zaman, M., Siddiqui, M. S. I., & Hossain, M. A. (2025). Microplastic pollution in livestock farming in Bangladesh: a critical review of its key findings and mitigation strategies to address public health. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(7), 732.
- Al Nahian, S., Rakib, M. R. J., Kumar, R., Haider, S. M. B., Sharma, P., & Idris, A. M. (2023). Distribution, characteristics, and risk assessments analysis of microplastics in shore sediments and surface water of Moheshkhali channel of Bay of Bengal, Bangladesh. *Science of the Total Environment*, *855*, 158892.
- Anika, F., Rahman, M. A., Anik, A. H., & Tareq, S. M. (2025). Dairy under the microscope: A study on microplastic pollution in commercially available milk in Bangladesh. *Journal of Food Composition and Analysis*, *147*, 108037.
- Badwanache, P., & Dodamani, S. (2024). Qualitative and quantitative analysis of microplastics in milk samples. *Indian Journal of Health Sciences and Biomedical Research (KLEU)*, *17*(2), 150–154.
- Bahrani, F., Mohammadi, A., Dobaradaran, S., De-la-Torre, G. E., Arfaeinia, H., Ramavandi, B., Saeedi, R., & Tekle-Röttering, A. (2024). Occurrence of microplastics in edible tissues of livestock (cow and

- sheep). *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 22145–22157.
- Banica, A. L., Radulescu, C., Dulama, I. D., Bucurica, I. A., Stirbescu, R. M., & Stanescu, S. G. (2024). Microplastic debris in yogurt: Occurrence, characterization, and implications for human health. *Journal of Science and Arts*, 24(1), 223–248.
- Basaran, B., Özçifçi, Z., Akcay, H. T., & Aytan, Ü. (2023). Microplastics in branded milk: Dietary exposure and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 106511.
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., & Huerta Lwanga, E. (2021). Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of the Total Environment*, 755, 142653.
- Bilal, M., Taj, M., Ul Hassan, H., Yaqub, A., Shah, M. I. A., Sohail, M., Rafiq, N., Atique, U., Abbas, M., & Sultana, S. (2023). First report on microplastics quantification in poultry chicken and potential human health risks in Pakistan. *Toxics*, 11(10), 612.
- Blackburn, K., & Green, D. (2022). The potential effects of microplastics on human health: What is known and what is unknown. *Ambio*, 51, 518–530.
- Buyukunal, S. K., Rbaibi Zipak, S., & Muratoglu, K. (2023). Microplastics in a traditional Turkish dairy product: Ayran. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(2), 139–150.
- Chakraborty, T. K., Hasan, M. J., Netema, B. N., Rayhan, M. A., Asif, S. M. H., Biswas, A., Sarker, S., Ahmmed, M., Nice, M. S., Islam, K. R., Debnath, P. C., Chowdhury, P., Rahman, M. S., Zaman, S., Ghosh, G. C., & Hasibuzzaman, M. (2024). Microplastics in the commercially available branded milk in Bangladesh: An emerging threat for human health. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135374.
- Chen, C. C., Dai, L., Ma, L., & Guo, R. T. (2020). Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers. *Nature Reviews Chemistry*, 4, 114–126.
- Chen, J., Chen, G., Peng, H., Qi, L., Zhang, D., Nie, Q., Zhang, X., & Luo, W. (2023). Microplastic exposure induces muscle growth but reduces

- meat quality and muscle physiological function in chickens. *Science of the Total Environment*, 882, 163305.
- Cholewinski, A., Dadzie, E., Sherlock, C., Anderson, W. A., Charles, T. C., Habib, K., & Zhao, B. (2022). A critical review of microplastic degradation and material flow analysis towards a circular economy. *Environmental Pollution*, 315, 120334.
- Corte Pause, F., Urli, S., Crociati, M., Stradaoli, G., & Baufeld, A. (2024). Connecting the Dots: Livestock Animals as Missing Links in the Chain of Microplastic Contamination and Human Health. *Animals*, 14(2), 350.
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074.
- Da Costa Filho, P. A., Andrey, D., Eriksen, B., Peixoto, R. P., Carreres, B. M., Ambühl, M. E., Descarrega, J. B., Dubascoux, S., Zbinden, P., Panchaud, A., & Poitevin, E. (2021). Detection and characterization of small-sized microplastics ( $\geq 5 \mu\text{m}$ ) in milk products. *Scientific Reports*, 11(1), 212046.
- Devilliers, M., Lhomme, S., Tempez, M., Viudes, F., Chaïb, I., & Doyen, P. (2024). Les alternatives végétales à la viande : Potentielles sources de microplastiques pour nos estomacs. In *Congrès National de la Recherche des IUT, Université de Haute-Alsace (UHA), Mulhouse–Colmar, France*. <https://hal.science/hal-04619742>
- Díaz-Basantes, M. F., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2020). Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants. *Sustainability*, 12(12), 5514.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 14(6), e04501.
- European Commission. (2011). *Commission Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food*.
- Fournier, E., Leveque, M., Ruiz, P., Ratel, J., Durif, C., Chalancon, S., Amiard, F., Edely, M., Bézirard, V., Gaultier, E., Lamas, B., Houdeau, E., Lagarde, F., Engel, E., Etienne-Mesmin, L., Blanquet-Diot, S., & Mercier-Bonin, M. (2023). Microplastics: What happens in the human

- digestive tract? First evidences in adults using in vitro gut models. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130010.
- Górska-Warsewicz, H., Rejman, K., Laskowski, W., & Czczotko, M. (2019). Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average Polish diet. *Nutrients*, 11(8), 1771.
- Habib, R. Z., Poulouse, V., Alsaïdi, R., Al Kendi, R., Iftikhar, S. H., Mourad, A. H. I., Kittaneh, W. F., & Thiemann, T. (2022). Plastic cutting boards as a source of microplastics in meat. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(3), 609–619.
- Huang, Y., Chapman, J., Deng, Y., & Cozzolino, D. (2020). Rapid measurement of microplastic contamination in chicken meat by mid infrared spectroscopy and chemometrics: A feasibility study. *Food Control*, 113, 107187.
- 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.
- Katsara, K., Kenanakis, G., Alissandrakis, E., & Papadakis, V. M. (2022). Low-density polyethylene migration from food packaging on cured meat products detected by micro-Raman spectroscopy. *Microplastics*, 1(3), 428–439.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Khan, A., Qadeer, A., Wajid, A., Ullah, Q., Rahman, S. U., Ullah, K., Safi, S. Z., Ticha, L., Skalickova, S., Chilala, P., Bernatova, S., Samek, O., & Horky, P. (2024). Microplastics in animal nutrition: Occurrence, spread, and hazard in animals. *Journal of Agricultural and Food Research*, 17, 101258.
- Kiruba, R., Preethi, M., Aganasteen, R., Rithick Raj, M., Thabitha, C. H., Monica, P., Sakthivel, J., Levince, C., & Naseera Banu, I. (2022). Identification of microplastics as emerging contaminant in branded milk of Tamil Nadu State, India. *Asian Journal of Biological and Life Sciences*, 11(1), 181–187.

- Kotova, I. B., Taktarova, Y. V., Tsavkelova, E. A., Egorova, M. A., Bubnov, I. A., Malakhova, D. V., & Bonch-Osmolovskaya, E. A. (2021). Microbial degradation of plastics and approaches to make it more efficient. *Microbiology*, *90*, 671–701.
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? *Science of The Total Environment*, *714*, 136823.
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, *30*(12), 2136–2140.
- Liu, H., Grist, E. P., Xu, X., Lo, H., Wong, A., & Cheung, S. (2023). Microplastics pollution in the rivers of a metropolitan city and its estimated dependency on surrounding developed land. *Science of the Total Environment*, *880*, 163268.
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2022). Microplastics contamination in eggs: Detection, occurrence and status. *Food Chemistry*, *397*, 133771.
- Milne, M. H., De Frond, H., Rochman, C. M., Mallos, N. J., Leonard, G. H., & Baechler, B. R. (2024). Exposure of U.S. adults to microplastics from commonly consumed proteins. *Environmental Pollution*, *343*, 123233.
- Mohammadi, M., Dargahi, A., Almasi, A., Mousavi, S. A., & Mohammadi, P. (2025). Occurrence of microplastic, antibiotics, hormones, and heavy metals in livestock and poultry manure in west Iran. *Scientific Reports*, *15*, 27228.
- Monclús, L., McCann Smith, E., Ciesielski, T. M., Wagner, M., & Jaspers, V. L. B. (2022). Microplastic ingestion induces size-specific effects in Japanese quail. *Environmental Science & Technology*, *56*(24), 15902–15911.
- Mondal, S., Das, P., Mondal, A., Paul, S., Pandey, J. K., & Das, T. K. (Eds.). (2024). *Remediation of plastic and microplastic waste*. CRC Press.
- Naz, S., Chatha, A. M. M., Khan, N. A., Ullah, Q., Zaman, F., Qadeer, A., Khan, I. M., Danabas, D., Kiran, A., & Skalickova, S. (2024). Unraveling the ecotoxicological effects of micro and nano-plastics on aquatic organisms and human health. *Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1390510.

- Olmo, L., & Holman, B. W. B. (2025). The sources and impact of microplastic intake on livestock and poultry performance and meat products: A review. *Animal Production Science*, 65, AN25022.
- Oyedun, A. O., & Lawal, L. O. (2023). Microplastics as a threat to meat consumption, review. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(4), 712–718.
- Parfitt, J., Stanley, C., & Thompson, A. (2016). *Guidance for food and drink manufacturers and retailers on the use of food surplus as animal feed (Version 1.0)*. WRAP.
- Peixoto, D., Pinheiro, C., Amorim, J., Oliva-Teles, L., Guilhermino, L., & Vieira, M. N. (2019). Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, 161–168.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Pirsaheb, M., Nouri, M., Massahi, T., Makhdoumi, P., Baban, N. A., & Hossini, H. (2024). Microplastics contamination in the most popular brands of Iranian sausages and evaluation of its human exposure. *Heliyon*, 10(14).
- Pourebrahimi, S., & Pirooz, M. (2023). Microplastic pollution in the marine environment: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100327.
- Qin, Z. H., Mou, J. H., Chao, C. Y. H., Chopra, S. S., Daoud, W., Leu, S. Y., & Lin, C. S. K. (2021). Biotechnology of plastic waste degradation, recycling, and valorization: Current advances and future perspectives. *ChemSusChem*, 14, 4103–4114.
- Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., Belloni, A., Gioacchini, G., Blondeel, C., Zucchelli, E., De Luca, C., D'Avino, S., Gulotta, A., Carnevali, O., & Giorgini, E. (2022). Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk. *Polymers*, 14(13), 2700.
- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2022). Evaluation of microplastic presence in yogurt production process. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 28(5), 633–641.

- Rbaibi Zipak, S., Muratoglu, K., & Buyukunal, S. K. (2024). Microplastics in raw milk samples from the Marmara region in Turkey. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 19(2), 175–186.
- Rodríguez-Seijo, A., & Pereira, R. (2019). Microplastics in agricultural soils: Are they a real environmental hazard? In J. C. Sanchez-Hernandez (Ed.), *Bioremediation of agricultural soils* (pp. 45–60). CRC Press.
- Santonicola, S., Volgare, M., Cocca, M., & Colavita, G. (2025). Study of fibrous microplastic and natural microfiber levels in branded milk samples from Italy. *Italian Journal of Food Safety*, 14(2), 13523.
- Sharma, P., & Vidyarthi, V. K. (2024). Impact of microplastic intake via poultry products: Environmental toxicity and human health. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 14, 100426.
- Shelver, W. L., McGarvey, A. M., Billey, L. O., & Banerjee, A. (2024). Fate and disposition of [14C]-polystyrene microplastic after oral administration to laying hens. *Science of The Total Environment*, 909, 168512.
- Siddiqui, S. A., Singh, S., Bahmid, N. A., Shyu, D. J. H., Domínguez, R., Lorenzo, J. M., Pereira, J. A. M., & Câmara, J. S. (2023). Polystyrene microplastic particles in the food chain: Characteristics and toxicity – A review. *Science of the Total Environment*, 892, 164531.
- Simmons, C. W., Duan, F., Pitesky, M. E., Liu, Y., & Tobar, Z. (2023). Incorporation of recovered food and food scraps into poultry feed: A systematic review. *CABI Reviews*, 18, 1.
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386.
- Toto, B., Refosco, A., Dierkes, J., & Kögel, T. (2023). Efficient extraction of small microplastic particles from rat feed and feces for quantification. *Heliyon*, 9, e12811.
- van der Veen, I., van Mourik, L. M., van Velzen, M. J. M., Groenewoud, Q., & Leslie, H. A. (2022). *Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood – A pilot study (Report EH22-01)*. Vrije Universiteit Amsterdam.

- Visentin, E., Niero, G., Benetti, F., O'Donnell, C., & De Marchi, M. (2025). Assessing microplastic contamination in milk and dairy products. *NPJ Science of Food*, 9(1), 135.
- Whitton, C., Bogueva, D., Marinova, D., & Phillips, C. J. C. (2021). Are we approaching peak meat consumption? Analysis of meat consumption from 2000 to 2019 in 35 countries and its relationship to gross domestic product. *Animals*, 11(12), 3466.
- Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, G., & Xu, R. (2021). Microplastic ingestion by farmed animals: A critical review. *Environmental Pollution*, 285, 117664.
- Xu, X., Zhang, L., Li, Y., Lu, Y., & Li, W. (2020). Microplastics in aquatic products and the potential risks to human health. *Science of the Total Environment*, 703, 134681.
- Zhang, Q., Liu, L., Jiang, Y., Zhang, Y., Fan, Y., Rao, W., & Qian, X. (2023). Microplastics in infant milk powder. *Environmental Pollution*, 323, 121225.
- Ziajahromi, S., Slynkova, N., Dwyer, J., Griffith, M., Fernandes, M., Jaeger, J. E., & Leusch, F. D. L. (2024). Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems. *Water Research*, 250, 121071.