
VETERİNER HEKİMLİKTE BİLİMSEL YAKLAŞIMLAR 1

Editör

Doç. Dr. Hakan TAVŞANLI

Dr. Öğr. Üyesi Nisanur EKTİK SEZEN

yaz
yayınları

Veteriner Hekimlikte Bilimsel Yaklaşımlar 1

Editör

Doç. Dr. Hakan TAVŞANLI

Dr. Öğr. Üyesi Nisanur EKTİK SEZEN

yaz
yayınları

2025

**Veteriner Hekimlikte Bilimsel
Yaklaşımlar 1**

Editör: Doç. Dr. Hakan TAVŞANLI

Dr. Öğr. Üyesi Nisanur EKTİK SEZEN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8508-92-5

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

KÜNYE BİLGİLERİ

İÇİNDEKİLER

GÖRÜNMEZ TEHDİT: GIDA ZİNCİRİNDE MİKROPLASTİKLER.....	1
<i>Tevhide Elif GÜNER, Hakan TAVŞANLI, Nisanur EKTİK SEZEN</i>	
ULTRASON VE GIDA TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI.....	36
<i>Beril SERTER, Osman İrfan İLHAK</i>	
SERT VE YARI SERT PEYNİRLERDE GEÇ ŞİŞME KUSURU: CLOSTRIDIUM SPORLARININ ROLÜ, SİLAJ KAYNAKLI RİSKLER VE KORUYUCU STRATEJİLER.....	70
<i>Ezgi TEGÜN, Tevhide Elif GÜNER, Rahim AYDIN</i>	
İNEKLERDE POSTPARTUM DÖNEM HASTALIKLARIN SIKLIK AKTİVİTE VE FERTİLİTE ÜZERİNE ETKİLERİ	95
<i>Barış GÜNER, Aslıhan AYALP ERKAN</i>	
RUMİNANT BESLEMEDE BİYİYAKIT YAN ÜRÜNLERİ: TOLERANS VE TOKSİKOLOJİ PERSPEKTİFİ	127
<i>Oğuz Koray BACAKSIZ, Murat ÇELEBİ</i>	
SÜRDÜRÜLEBİLİR İKLİM ADAPTASYONU İÇİN DİJİTAL DESTEKLİ AKILCI TARIM VE HAYVAN BESLEME UYGULAMALARI.....	147
<i>Oğuz Koray BACAKSIZ</i>	

**GIDA ENDÜSTRİSİNDE BİYOKORUYUCU
KÜLTÜRLERİN KULLANIMI: LAKTİK ASİT
BAKTERİLERİ.....170**

Enise Begüm GÖÇMEZ, Nisanur EKTİK SEZEN

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

GÖRÜNMEZ TEHDİT: GIDA ZİNCİRİNDE MİKROPLASTİKLER

Tevhide Elif GÜNER¹

Hakan TAVŞANLI²

Nisanur EKTİK SEZEN³

1. GİRİŞ

Mikroplastikler, 5 mm'den küçük plastik parçacıkları için kullanılan terim olup günümüzde çevrede yaygın bir kirleticisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda denizlerden tatlı sulara, topraklardan atmosfere kadar hemen her ortamda tespit edilmeleri, gıda güvenliği ve insan sağlığı açısından önemli endişelere yol açmıştır (Baby ve Revathy, 2025). Deniz ekosistemlerinde biriken mikroplastikler, deniz ürünleri aracılığıyla insan besin zincirine girerken; atmosferde taşınan lifler tarım ürünlerinin üzerine çökerek kara kökenli gıdalara da bulaşabilmektedir (Beygi, 2025). Gerçekleştirilen çok sayıda araştırma, midye ve balık gibi pek çok deniz ürününün yanı sıra sofraya tuzu, içme suyu ve hatta meyve-sebze gibi çeşitli gıdalarda dahi mikroplastik bulunabildiğini ortaya koymuştur (Conti ve ark., 2020; Manimozhi ve ark., 2022; Koelmans ve ark., 2019; Novotna ve ark., 2019; Pan ve ark., 2022; Das ve ark., 2021; Mason ve ark., 2018). Mikroplastiklerin çevresel yaygınlığı ve potansiyel toksik etkilerinin giderek daha iyi anlaşılmasıyla

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Besin/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-8706-1417.

² Doç. Dr., Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Besin/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-5124-3702.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Besin/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0001-9389-4362.

birlikte, bu kirleticilerin gıdalara geçişi ve insan maruziyetinin olası sonuçları son yıllarda bilimsel ilginin odağı haline gelmiştir. Bu kitap bölümünde, plastik üretiminin tarihsel gelişiminden başlayarak mikroplastiklerin tanımı, sınıflandırılması, kaynakları, çevresel dağılımı, gıdalara bulaşma yolları ve geçiş mekanizmaları ele alınacaktır. Bunun yanı sıra farklı gıdalardaki mikroplastik düzeyleri, insan sağlığına etkileri, tespit yöntemleri, kontaminasyonu önleme stratejileri ve mevcut mevzuat kapsamlı bir biçimde incelenecektir.

2. PLASTİK ÜRETİMİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Modern plastiklerin endüstriyel ölçekte üretimi, 20. yüzyılın ortalarından itibaren hızla artmış ve özellikle 1940'lardan sonra düşük maliyeti, dayanıklılığı ve çok yönlülüğü sayesinde günlük yaşamın temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. 1950'lerde küresel plastik üretimi yaklaşık 1,5 milyon ton iken, 2019 yılına gelindiğinde bu miktar 368 milyon ton seviyesine ulaşmıştır. Üretimdeki artış eğilimi 2000'li yıllarda belirginleşmiş; yıllık üretimin 2025'te 500 milyon tonu aşacağı öngörülmüştür (Ahmad ve ark., 2024; Beygi, 2025).

1950'den bu yana dünya genelinde yaklaşık 8,3 milyar ton plastik üretilmiş; bunun önemli bir kısmı çevreye karışmıştır (Geyer ve ark., 2017). Üretilen plastiklerin yalnızca küçük bir kısmı geri dönüştürülebilmüş; büyük bir bölümü düzenli depolama alanlarına gömülmüş veya doğrudan çevreye bırakılmıştır (Bostan ve ark., 2023). Günümüze kadar biriken plastik atığın 6,3 milyar tondan fazlasının çevreye dağılmış olduğu tahmin edilmektedir (Brooks ve ark., 2018). Doğada son derece kalıcı olan bu atıklar, zaman içinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerle parçalanarak mikroplastiklere dönüşmekte ve giderek daha yaygın, kontrolü güç bir kirlilik sorununa yol açmaktadır.

Dolayısıyla plastik üretiminin tarihsel gelişimi yalnızca modern tüketim alışkanlıklarını şekillendirmekle kalmamış, aynı zamanda günümüzde karşı karşıya olduğumuz mikroplastik kontaminasyonunun temelini oluşturarak bu küresel sorunun kökenini anlamada kritik bir çerçeve sunmuştur.

3. MİKROPLASTİKLERİN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Mikroplastikler, genellikle 5 mm'den küçük plastik parçacıkları olarak tanımlanır. Bu tanım, alt boyut sınırı belirtilmeksizin tüm küçük plastik parçacıkları kapsar; ancak 1 µm'den daha küçük partiküller, literatürde ayrı bir kategori olarak “nanoplastikler” şeklinde değerlendirilmektedir (Athanasopoulou ve ark., 2025).

Oluşum biçimlerine göre mikroplastikler birincil ve ikincil olmak üzere iki ana gruba ayrılır:

- **Birincil mikroplastikler:** üretim aşamasında mikro boyutta üretilen parçacıklardır. Kozmetik ürünlerde peeling amaçlı katılan mikro boncuklar, diş macunu gibi bakım ürünlerindeki tanecikler, endüstriyel temizlik ajanlarındaki plastik tozlar ve sentetik tekstillerden kopan lifler bu gruba örnek verilebilir. Ayrıca plastik üretiminde hammadde olan pelet adı verilen pirinç tanesi büyüklüğündeki reçine parçacıkları da doğada doğrudan birincil mikroplastik kirliliği yaratabilmektedir. Birincil mikroplastikler, genellikle yanlış atık yönetimi veya endüstriyel kazalar sonucu doğrudan çevreye karışabilir (Bhattacharjee ve ark., 2025; Bostan ve ark., 2023).
- **İkincil mikroplastikler:** daha büyük plastik materyallerin fiziksel, kimyasal veya biyolojik ayrışma süreçleri sonucunda parçalanmasıyla oluşur. Güneş

ışığının UV etkisiyle gerçekleşen fotodegradasyon, dalga ve rüzgârın mekanik aşındırması ve sıcaklık veya oksidasyon gibi kimyasal süreçler, zamanla makro boyuttaki plastiklerin ufalanarak mikro boyuta inmesine yol açar (Ahmad ve ark., 2024; Beygi, 2025). Örneğin terk edilmiş plastik poşetler, pet şişeler, naylon balık ağları veya araba lastiklerinden kopan parçalar, yıllar içinde kırılıp ufalanarak ikincil mikroplastiklere dönüşürler. Bu grup çevrede en yaygın bulunan mikroplastik türünü oluşturur (Bhattacharjee ve ark., 2025).

Mikroplastikler boyut, şekil ve kimyasal bileşim açısından oldukça heterojen bir kirlilik grubudur. Şekil bakımından en yaygın olan form lif (elyaf) tipidir; özellikle sentetik tekstil ürünlerinden kopan mikrofiberlerin, okyanuslardaki toplam mikroplastik yükünün yaklaşık %35'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Athanasopoulou ve ark., 2025). Bunun yanı sıra parçacık (kırık sert plastikler), film (ince poşet ve folyo kalıntıları) ve köpük (örneğin strafor parçacıkları) şeklinde mikroplastikler de sıkça gözlenmektedir (Liu ve ark., 2019).

Kimyasal bileşim açısından mikroplastikler, polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC) ve naylon gibi farklı polimerlerden oluşabilir. Bu çeşitlilik, onların yoğunluk, yüzey özellikleri ve reaktivlik gibi çevresel davranışlarını belirler. Örneğin, yoğunluğu düşük polimerlerden oluşan mikroplastikler su yüzeyinde yüzme eğilimindeyken, yoğunluğu yüksek olanlar batıp sedimanlara gömülür. Bu durum, mikroplastiklerin çevredeki dikey ve yatay dağılımını şekillendirir ve onların biyolojik sistemlerle etkileşim yollarını etkiler (Baby ve Revathy, 2025).

4. MİKROPLASTİKLERİN ÇEVREYE YAYILIMI VE KAYNAKLARI VE OLUŞUM MEKANİZMALARI

Mikroplastiklerin çevreye yayılımı, çok çeşitli kaynaklar ve birbirine bağlı süreçler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu kirleticilerin en önemli çıkış noktası karasal kökenli plastik atıklardır. Özellikle yoğun nüfuslu kentlerde, doğaya kontrolsüz biçimde bırakılan ambalaj malzemeleri, depolama alanlarından rüzgârla taşınan plastikler ve yasa dışı şekilde dökülen endüstriyel plastik atıklar zamanla fiziksel ve kimyasal ayrışmaya uğrayarak mikroplastiklere dönüşür. Bu küçük parçacıklar, yağmur ve yüzey akış suları aracılığıyla nehir sistemlerine taşınır ve nihayetinde denizel ekosistemlere ulaşır (Bostan ve ark., 2023). Nehirler ve kanalizasyon sistemleri, karasal mikroplastiklerin sucul ortamlara geçişinde başlıca iletim yollarıdır. Ancak mevcut atık su arıtma tesisleri, büyük plastikleri tutabilmekle birlikte mikroplastiklerin tamamını filtreleyememektedir. Özellikle evsel atık sularda bulunan sentetik mikrofiberler ve kozmetik ürün kaynaklı mikro boncuklar, arıtma süreçlerinden kısmen kaçarak çıkış suları ile birlikte akarsulara ve oradan da deniz ortamına taşınmaktadır (Barboza ve ark., 2018; Ahmad ve ark., 2024).

Günlük yaşamda kullanılan birçok ürün, doğrudan mikroplastik salınımının önemli kaynakları arasında yer almaktadır. Özellikle kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde bir dönem yaygın biçimde kullanılan plastik mikro tanecikler, kullanım sonrası kanalizasyona karışarak birincil mikroplastik kirliliği oluşturmuştur. Bu mikro boncuklar, lavabolar aracılığıyla atık su sistemine ulaşır ve arıtma tesislerinde tam olarak tutulamadıkları için akarsular ve denizler yoluyla çevreye yayılır. Her ne kadar birçok ülke bu tür plastik mikrokürelerin kozmetiklerde kullanımını yasaklamış olsa da geçmişte çevreye

salınan partiküller hâlen ekosistemlerde kalıcılığını sürdürmektedir (Rhodes, 2018).

Sentetik tekstil ürünleri de mikroplastiklerin başlıca kaynaklarından biridir. Yıkama işlemleri sırasında kumaşlardan kopan mikrofiberler, atık suya karışır ve bunların önemli bir bölümü arıtma sistemlerinden geçerek sucul ortamlara ulaşır. Yapılan araştırmalar, evsel çamaşır makinelerinden her yıl milyarlarca sentetik lifin suya karıştığını ortaya koymaktadır (De Falco ve ark., 2019; Vassilenko ve ark., 2021). Bu lifler yalnızca su ortamlarını değil, kuruma ve rüzgâr yoluyla havaya karışarak atmosferik mikroplastik yüküne de katkı sağlayabilmektedir (De Falco ve ark., 2020). Buna ek olarak, araç lastiklerinin aşınması sonucunda ortaya çıkan lastik tozları da mikroplastik bileşenler içerir. Bu parçacıklar, yağış ve yüzey akışıyla karasal ortamlardan su sistemlerine taşınabilir veya rüzgârla havaya yayılarak atmosferde birikim gösterebilir (Beygi, 2025). Kent içi hava kalitesi üzerine yapılan çalışmalar, bu lastik kaynaklı mikroplastiklerin kentsel partikül madde kirliliği içinde dikkate değer bir paya sahip olduğunu göstermektedir (Giechaskiel ve ark., 2024).

Deniz ortamları, mikroplastik kirliliğinin yalnızca alıcısı değil, aynı zamanda önemli bir kaynağı konumundadır. Denizcilik faaliyetleri sırasında kaybolan, hasar gören veya kasıtlı olarak denize bırakılan balık ağıları, halatlar, ambalaj malzemeleri ve diğer plastik gereçler, zamanla fiziksel ve kimyasal ayrışma süreçlerine maruz kalarak mikroplastiklere dönüşmektedir. Özellikle sentetik materyallerden üretilen balık ağıları ve misinalar, UV ışınlarının ve dalgaların etkisiyle kırılarak çok sayıda küçük parçaya ayrılmakta; bu parçalar deniz canlıları tarafından istenmeden yutulabilmektedir. Ayrıca gemilerden denize bırakılan atıklar, sahil turizmi sırasında çevreye saçılan plastik ürünler ve tek kullanımlık malzemeler, doğrudan deniz

ortamına karışarak mikroplastik yükünü artırmaktadır (Barboza ve ark., 2018).

Tarımsal ve karasal kaynaklar da mikroplastik kirliliğinin önemli bir bileşenidir. Tarımda sıkça kullanılan polietilen malç filmler, sera örtüleri ve sulama hortumları, kullanım ömürleri sona erdiğinde çevresel koşulların etkisiyle ufalanarak toprağa karışır. Bu plastiklerin zamanla toprak profiline karışması, yağış ve yüzey akışıyla taşınarak akarsulara ulaşması mümkündür (Sa'adu ve Farsang, 2022). Ayrıca atıksu arıtma tesislerinden elde edilen biyokatıların (kanalizasyon çamurları) gübre olarak tarım alanlarına uygulanması, mikroplastiklerin toprak ortamına geçişinde önemli bir rol oynamaktadır (Büks ve Kaupenjohann, 2020). Arıtma süreçlerinde tutulan plastik lifler ve parçacıklar, bu yolla tarım topraklarına taşınarak birikim yaratmakta; yapılan çalışmalar, biyokatı uygulamalarının toprak kökenli mikroplastik yükünün başlıca nedenlerinden biri olduğunu göstermektedir (Aydin ve ark., 2025; Pérez-Reverón ve ark., 2022).

Mikroplastiklerin oluşum mekanizmaları makroplastiklerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda parçalanması süreçlerine dayanmaktadır. Güneş ışığındaki ultraviyole (UV) radyasyonu, plastik polimer zincirlerinin kimyasal bağlarını zayıflatır; bu süreç, fotodegradasyon olarak adlandırılır ve özellikle açıkta kalan plastiklerin kırılma hızına yol açar. Fotodegradasyonla yapısal bütünlüğü bozulan plastikler, dalga hareketleri, akıntılar, rüzgâr veya aşınma gibi mekanik etkilerle küçük parçalara ayrılır. Bu mekanik parçalanma, başlangıçta bütün halde olan plastik materyalin zamanla binlerce mikro parça hâline gelmesine neden olur (Beygi, 2025).

Bunun yanı sıra, çevresel kimyasal süreçler de mikroplastik oluşumuna katkı sağlar. Bazı plastik polimerler deniz suyundaki tuz iyonları, oksijen ve reaktif kimyasal

bileşenlerle etkileşime girerek oksidatif bozunmaya uğrar ve polimer zincirleri kısalır. Toprak ortamında, benzer şekilde oksidanlar ve metal iyonları plastiklerin kimyasal yapısını zayıflatır. Buna ek olarak, biyolojik etkenler de plastiklerin parçalanma sürecine dolaylı biçimde katkıda bulunabilir. Mikroorganizmalar plastik yüzeylerinde biyofilm tabakası oluşturarak polimerlerin oksijenle temasını artırır ve malzemenin yüzey özelliklerini değiştirir. Bazı bakteriler ve mantarlar ise belirli polimerleri düşük verimlilikle de olsa doğrudan parçalayabilir (Bostan ve ark., 2023).

Tüm bu fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin birleşimiyle, çevreye karışan büyük plastikler giderek daha küçük parçalara ayrılır ve mikroplastik formuna ulaşır. Gerek doğrudan endüstriyel veya evsel faaliyetlerle çevreye salınan birincil mikroplastikler, gerekse makroplastiklerin çevrede zaman içinde parçalanmasıyla oluşan ikincil mikroplastikler, günümüzde gözlenen küresel mikroplastik kirliliğinin temelini oluşturmaktadır.

5. MİKROPLASTİKLERİN ÇEVRESEL DAĞILIMI VE TAŞINIMI

Mikroplastikler; son derece küçük boyutları, düşük yoğunlukları ve yüksek taşınabilirlikleri nedeniyle çevresel ortamlarda geniş bir dağılım göstermektedir. Bu parçacıklar, rüzgâr, akıntı ve yağış gibi doğal süreçlerle kolayca taşınabilmekte; bu da onların küresel ölçekte yayılmasına zemin hazırlamaktadır. Nitekim yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin yalnızca sanayileşmiş bölgelerde değil, kutuplardan ekvatora kadar tüm ekosistemlerde varlık gösterdiğini ortaya koymuştur (Solomon ve Palanisami, 2016). Çevresel gözlemler, mikroplastiklerin dünyanın en uzak ve el değmemiş bölgelerinde dahi birikim gösterdiğini kanıtlamaktadır. Arktik Okyanusu'nun

yüzey sularında, Antarktika deniz buzlarında, Everest Dağı'nın zirvesinde ve Mariana Çukuru'nun derinliklerinde dahi mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Obbard ve ark., 2014; Lusher ve ark., 2015; Napper ve ark., 2020; Peng ve ark., 2018). Bu bulgular, mikroplastiklerin yalnızca yerel bir kirlilik türü olmadığını, aksine küresel atmosferik ve okyanus dolaşım sistemleriyle taşınan bir kirletici sınıfına dönüştüğünü göstermektedir.

Mikroplastiklerin çevredeki taşınımında su akıntıları ve rüzgârlar temel rol oynamaktadır. Nehirler, karasal kökenli mikroplastikleri denizel ortamlara taşıyan birer konveyör bant gibi işlev görür. Özellikle sanayi bölgeleri ve büyük yerleşim alanlarından geçerek denize ulaşan nehirlerde mikroplastik yoğunluklarının oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir (Lebreton ve ark., 2017; Schmidt ve ark., 2017). Bu nehirler aracılığıyla okyanuslara ulaşan mikroplastikler, deniz akıntılarıyla küresel ölçekte taşınarak farklı coğrafi bölgelerde birikim gösterir. Açık okyanuslarda mikroplastikler, akıntıların kesiştiği gyre olarak adlandırılan girdap bölgelerinde yoğunlaşma eğilimindedir. Örneğin Büyük Pasifik Çöp Alanı, bu süreçlerin çarpıcı bir örneğidir; burada yüzeyde biriken plastik ve mikroplastik miktarları çevredeki açık deniz alanlarına kıyasla çok daha yüksektir (Lebreton ve ark., 2018).

Yarı kapalı denizler ve yoğun nüfuslu kıyı bölgeleri de mikroplastik kirliliği açısından kritik alanlardır. Akdeniz ve Kuzey Denizi gibi sınırlı su değişimine sahip denizlerde, mikroplastik konsantrasyonlarının kıyı sularında açık denizlere göre katbekat fazla olduğu rapor edilmiştir (Baby ve Revathy, 2025). Bu durum, mikroplastik dağılımının yalnızca fiziksel süreçlerden değil, aynı zamanda insan yerleşimlerine yakınlık, akıntı rejimleri ve coğrafi koşullar gibi etkenlerden de büyük ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

Mikroplastiklerin atmosferik taşınımı ise son yıllarda giderek daha fazla dikkat çeken bir süreçtir. Küçük boyutlu ve düşük yoğunluklu mikroplastik parçacıkları, rüzgârın etkisiyle havaya karışarak uzun mesafeler boyunca taşınabilmektedir. ABD’deki koruma altındaki bölgelerde yapılan çalışmalarda, yağmur suları ve atmosferik çökelti içinde kayda değer miktarda mikroplastik tespit edilmiş; bu olgu, “plastik yağmuru” olarak adlandırılmış ve mikroplastiklerin atmosfer aracılığıyla küresel dolaşımına işaret etmiştir (Brahney ve ark., 2020). Benzer şekilde, Avrupa’nın dağlık bölgelerinde ve Alp Dağları’nın zirvelerinde dahi rüzgârla taşınmış mikroplastik parçacıkları belirlenmiştir (Bergmann ve ark., 2019). Bu bulgular, mikroplastik kirliliğinin yalnızca sucul ekosistemlerle sınırlı kalmadığını; aksine, atmosferik taşınım yoluyla en uzak ve bakir ekosistemlere bile ulaşabildiğini göstermektedir.

Mikroplastiklerin yatay dağılımlarının yanı sıra dikey dağılımları da çevresel davranışlarının anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Düşük yoğunluklu polimerlerden, örneğin polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi maddelerden üretilen mikroplastikler başlangıçta su yüzeyinde yüzme eğilimindedir. Ancak zamanla bu parçacıkların yüzeylerinde biyolojik birikim (biyofouling) meydana gelir; mikroorganizmalar, algler ve organik maddeler plastik yüzeye tutunarak parçacığın özgül ağırlığını artırır. Bu süreç sonucunda mikroplastikler batma eğilimi gösterir ve su kolonu boyunca aşağıya doğru taşınabilir. Böylece başlangıçta yüzeyde bulunan bir mikroplastik parçacık, kimyasal ve biyolojik etkileşimlerin bir sonucu olarak derin deniz ortamlarına ve sedimanlara ulaşabilir. Ayrıca deniz karı (marine snow) olarak bilinen organik partikül kümelerine tutunan mikroplastikler, daha hızlı bir şekilde deniz tabanına çöker. Nitekim okyanus tabanı sedimentlerinde ve derin deniz canlılarının sindirim sistemlerinde mikroplastik varlığının saptanması, bu dikey taşınımın en somut kanıtlarından biridir.

Benzer şekilde tatlı su ekosistemlerinde de mikroplastiklerin bir kısmı yüzeyde askıda kalırken, bir kısmı zamanla çökelerek taban tortularına karışmaktadır (Baby ve Revathy, 2025; Barboza ve ark., 2018).

Karasal ortamlarda mikroplastiklerin dağılımı ise yalnızca doğal süreçlerle değil, insan faaliyetleriyle de belirlenmektedir. Tarım arazilerine uygulanan kanalizasyon çamurları (biyokatılar) ve kullanılan plastik malç filmleri nedeniyle, özellikle yoğun tarım yapılan bölgelerde toprak mikroplastik birikiminin oldukça yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bazı çalışmalar, tarım topraklarındaki mikroplastik yoğunluğunun okyanus yüzey sularındakinden daha fazla olabileceğini öne sürmektedir. Toprakta biriken mikroplastikler, rüzgâr erozyonu veya yağış suları aracılığıyla yeniden hareketlenebilir; bu süreçler sonucunda parçacıklar atmosfere taşınabilir ya da yeraltı sularına sızarak daha derin katmanlara geçebilir (Piehl ve ark., 2018; Qi ve ark., 2020).

Sonuç olarak mikroplastikler bugün yeryüzünün hemen her ekosisteminde (kentsel alanlardan tarım arazilerine, yüksek dağlardan kutup buzullarına kadar) tespit edilmektedir. Bu geniş mekânsal yayılım, mikroplastiklerin yalnızca kalıcı değil, aynı zamanda küresel ölçekte döngüsel bir kirletici haline geldiğini göstermektedir.

6. GIDALARDA MİKROPLASTİK VARLIĞI VE BULAŞMA YOLLARI

Mikroplastiklerin çevreden gıdalara geçişi hem doğal ekosistem süreçleri hem de insan kaynaklı üretim, işleme ve depolama uygulamaları yoluyla gerçekleşmektedir. Bu geçiş mekanizmaları, deniz ürünleri, içme suları ve diğer içecekler, tuz ve baharatlar, tarımsal ürünler ile gıda işleme ve ambalajlama aşamalarını kapsayan geniş bir yelpazede karşımıza çıkar.

Gıdalarda tespit edilen mikroplastik düzeyleri ise ürünün türüne, coğrafi bölgesine, çevresel kirlilik yoğunluğuna ve üretim koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.

6.1.Deniz Ürünleri

Denizel besin zinciri, mikroplastiklerin gıdalara geçişindeki en iyi bilinen yoldur. Balıklar, kabuklular (midye, istiridye, karides vb.) ve diğer deniz organizmaları bulundukları ortamdan mikroplastikleri filtreleme veya beslenme sırasında istemeden yutabilmektedir. Bu organizmalarda biriken parçacıklar, deniz ürünlerinin insan tüketimine sunulmasıyla doğrudan insanlara geçebilmektedir. Özellikle bütün olarak yenilen küçük balıklar ile midye ve istiridye gibi filtreci türler yüksek risk oluşturur (Barboza ve ark., 2018; Beygi, 2025).

Meta-analizler, ticari deniz ürünlerinin büyük kısmında mikroplastik bulunduğunu ve bu değerlerin çoğunlukla <1 parçacık/g aralığında olduğunu göstermektedir (Danopoulos ve ark., 2020). Güncel araştırmalar, pazarlanan deniz ürünlerinin yaklaşık %94'ünde mikroplastik tespit edildiğini bildirmektedir (Süssmann ve ark., 2025). Örneğin Birleşik Krallık'ta işlenmiş 100 g midye porsiyonunda yaklaşık 70 parçacık, bazı bölgelerde ise 109 parçacığa kadar mikroplastik bulunmuştur (Fraissinet ve ark., 2024). Deniz balıklarında da bölgesel farklılıklar görülmekte; İtalya'da 23 parça/kg, ABD'de 13 parça/kg, Çin'de ise 7 parça/kg düzeyleri rapor edilmiştir (Aslam ve ark., 2023). Deniz ürünlerinin düzenli tüketimi nedeniyle bireylerin yıllık mikroplastik alımının 39.000–52.000 parçacığa ulaşabileceği öne sürülmektedir (Cox ve ark., 2019).

6.2. İçme Suyu ve Diğer İçecekler

Mikroplastik kontaminasyonu sıvı gıdalarda da yaygın olarak görülmektedir. Mason ve ark. (2018), 11 markadan 259 şişe suyu incelemiş ve örneklerin %93'ünde mikroplastik tespit etmiştir. Şebeke sularında da düşük yoğunluklarda parçacıklar

bulunmuş; Avrupa'daki musluk suyu örneklerinde litre başına 0–10 parçacık saptanmıştır (Schymanski ve ark., 2018). Her ne kadar bu seviyeler deniz ürünlerine kıyasla düşük olsa da suyun günlük ve sürekli tüketimi nedeniyle mikroplastik maruziyeti süreklilik kazanmaktadır.

Çay, kahve, meşrubat ve bira gibi içecekler üretim sırasında kullanılan suya, plastik ekipmanlara veya ambalaj malzemelerine bağlı olarak mikroplastik bulaşmasına maruz kalabilmektedir (Vitali ve ark., 2023). Ayrıca naylon bazlı çay poşetlerinde demlenme sırasında milyarlarca mikro- ve nanoplastik parçacığın suya geçebildiği bildirilmiştir (Hernandez ve ark., 2019). Hayvansal ve bitkisel içeceklerde de benzer bulgular mevcuttur; süt örneklerinde litre başına ortalama $6,5 \pm 2,3$ mikroplastik belirlenmiştir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Bu parçacıkların, üretim ekipmanlarından, ambalajlama sırasında havadan ya da hayvanların yem ve sularından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

6.3. Tuz ve Baharatlar

Tuz, üretim şekli gereği mikroplastik taşıma riski yüksek ürünlerden biridir. Deniz suyunun buharlaştırılmasıyla elde edilen sofr tuzu, kaynak sudaki mikroplastik parçacıklarını bünyesine alabilmektedir (Kim ve ark., 2018). Farklı coğrafyalarda yapılan çalışmalar, sofr tuzlarında mikroplastik varlığının yaygın olduğunu ve kirlilik düzeyinin, tuzun elde edildiği su kaynağının kirlilik derecesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Sofra tuzu üzerine yapılan geniş kapsamlı taramalarda Çin'de 718 parça/kg, Birleşik Krallık'ta 136 parça/kg ve ABD'de 32 parça/kg mikroplastik bulunduğu rapor edilmiştir (Aslam ve ark., 2023). Karabiber, şeker ve benzeri ürünlerde ise üretim ve paketleme sırasında havadan çöken liflerin birikebildiği gösterilmiştir (Liebezeit ve Liebezeit, 2013).

6.4. Tarımsal Ürünler (Meyve ve Sebzeler)

Mikroplastikler sadece sucul değil, karasal ekosistemlerde de yaygın olarak bulunduğu için tarımsal ürünlere doğrudan ve dolaylı yollardan bulaşabilmektedir. Atmosferik taşıyım ile yaprak yüzeylerine çöken lifler yüzey kontaminasyonuna neden olabilir. Ayrıca sulama suları ve topraktaki birikimler yoluyla mikroplastikler bitki kök bölgesine ulaşarak kök alımıyla bitki dokularına taşınabilmektedir. Elma, havuç ve marul gibi ürünlerde mikroplastik tespit edildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Conti ve ark., 2020). Bu bulgular, bitkisel gıdaların da mikroplastik maruziyeti açısından önemli bir vektör olabileceğini göstermektedir.

6.5. Gıda İşleme, Ambalajlama ve Depolama

Gıdalara mikroplastik bulaşmasının en önemli insan kaynaklı yollarından biri işleme ve ambalajlama aşamalarıdır. Plastik ekipmanlar, boru sistemleri ve kap yüzeylerinden aşınma sonucu mikroplastik salınımı gerçekleşebilir. Örneğin polipropilen (PP) veya polietilen tereftalat (PET) kaplarda saklanan ya da ısıtılan yiyecek ve içeceklerde, ambalaj malzemesinden gıdaya mikroplastik geçişi saptanmıştır (Schymanski ve ark., 2018; Cella ve ark., 2022). Tek kullanımlık plastik kapların açılıp kapanması bile yüzeylerinden küçük parçacıkların kopmasına neden olabilir. Ayrıca üretim tesislerindeki havada asılı mikroplastik liflerin paketleme ve depolama sırasında gıdalar üzerine çökmesi ikincil kontaminasyona yol açmaktadır. Bu durum özellikle un ve şeker gibi toz ürünlerde daha belirgin olup, işleme sırasında havadaki liflerin kolayca tutulduğu bildirilmiştir (Sharma, 2024). Bal örneklerinde de çevresel toz kaynaklı mikroplastik elyafların bulunduğu rapor edilmiştir (Liebezeit ve Liebezeit, 2013; Liebezeit ve Liebezeit, 2015).

Genel olarak deniz ürünleri ve içme suları mikroplastik maruziyetinde başlıca kaynaklar olmakla birlikte; tuz, baharatlar, işlenmiş gıdalar, toz ürünler, süt ve diğer içecekler de anlamlı düzeyde katkı sağlamaktadır. Böylece bireyler, çok çeşitli gıda kategorilerinden sürekli mikroplastik alımına maruz kalmaktadır.

7. GIDALARA MİKROPLASTİK GEÇİŞ MEKANİZMALARI

Mikroplastiklerin gıda zincirine karışması ve canlıların vücuduna ulaşması, oldukça karmaşık ve birçok farklı etkenin rol oynadığı bir süreçtir. Özellikle sucul ekosistemlerde gerçekleşen trofik transfer süreçleri, mikroplastiklerin besin zinciri boyunca taşınmasına neden olur. Planktonlar veya küçük balıklar tarafından yutulan mikroplastikler, bu canlıları avlayan daha büyük türlerin sindirim sistemine geçebilir (Bhattacharjee ve ark., 2025). Böylece zincirin üst basamaklarındaki yırtıcı balıkların sindirim sistemlerinde, avlarından kaynaklanan mikroplastiklerin biriktiği gösterilmiştir (Harikrishnan ve ark., 2023). Bununla birlikte mikroplastiklerin besin zincirinde biyomagnifikasyon (trofik düzey yükseldikçe artan birikim) yapıp yapmadığı henüz net olarak açıklığa kavuşmamıştır; çünkü birçok mikroplastik parçacık, üst düzey avcılarının sindirim sistemi aracılığıyla vücuttan atılabilmektedir (Hollerova ve ark., 2023).

Mikroplastiklerin canlı bünyesinde yalnızca sindirim kanalında kalmadığı, aynı zamanda dokulara geçebildiği de çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Özellikle 20 µm'den küçük parçacıkların bağırsak epiteline nüfuz ederek dolaşım sistemine geçebildiği bildirilmektedir. Nano ölçekteki plastik parçacıkların (<1 µm) ise bağırsak duvarı veya kan-beyin bariyeri gibi bazı biyolojik sınırları aşabildiği rapor edilmiştir (Parenti ve ark., 2019; Revel ve ark., 2018). İnsan kan örneklerinde farklı polimer türlerine ait mikroplastiklerin tespit edilmesi (Leslie ve ark.,

2022), bu translokasyonun insanlar için de geçerli olabileceğini göstermektedir. Dolaşım sistemine geçen mikroplastiklerin farklı organ ve dokulara taşınması mümkündür. Son yıllarda yapılan araştırmalarda insan plasentası ve akciğer dokularında mikroplastik parçacıklar saptanmıştır (Jung ve ark., 2022; Nicole, 2021). Bu bulgu, fetüsün bile mikroplastiklere maruz kalabileceği olasılığını gündeme getirerek ciddi endişelere yol açmıştır.

Mikroplastiklerin hayvansal gıdalar aracılığıyla dolaylı geçişi de giderek daha fazla araştırılmaktadır. Kutralam-Muniasamy ve ark. (2020), pazarlama aşamasındaki süt örneklerinde litre başına yüzlerce mikroplastik parçacığı belirlemiş ve bu kirliliğin hayvanların yem ve su tüketimi, ayrıca işleme ve ambalajlama süreçleri ile ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Benzer biçimde, tavuk ve diğer çiftlik hayvanlarının etlerinde de mikroplastik kalıntıları saptanmıştır (Sharma ve Vidyarthi, 2024). Tavukların yemlerinden veya çevresel temas yoluyla aldıkları mikroplastiklerin dolaşıma geçip kas dokularına kadar ulaşabildiği, dolayısıyla et, süt ve yumurta gibi hayvansal ürünlerde de mikroplastik birikiminin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, mikroplastiklerin yalnızca deniz ürünleriyle değil, karasal hayvansal gıdalar aracılığıyla da insanlara taşınabileceğini göstermektedir.

Bir diğer önemli geçiş yolu ise plastik ambalajlar ve gıda temas materyalleri üzerinden gerçekleşen fiziksel ve kimyasal aktarım süreçleridir. Plastik ambalajlarda saklanan gıdalar, ambalaj yüzeyiyle uzun süre temas ettiğinde veya ısıtıldığında, mikro ölçekte plastik parçacıklarının gıdaya geçişi mümkündür. Şişelenmiş su örneklerinde yapılan araştırmada, şişe kapağının her açılışında suya polimer parçacıklarının karıştığını ve bu miktarın şişe kullanım süresi boyunca arttığını göstermiştir (Schymanski ve ark., 2018). Öte yandan, plastik ambalajların yapısında yer alan boyar maddeler, stabilizatörler ve yumuşatıcılar gibi kimyasallar da zamanla gıdaya göç edebilir.

Özellikle su ve yağ geçirmezlik sağlamak amacıyla kullanılan per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS) ambalajdan gıdaya sızabildiği bildirilmiştir (Barhoumi ve ark., 2022). Mikroplastik parçacıkları, bu tür kimyasallar için taşıyıcı yüzey işlevi görerek toksik bileşiklerin gıdaya geçişini kolaylaştırabilir.

Mikroplastiklerin gıdaya geçiş mekanizmaları hem fiziksel parçacık aktarımı hem de kimyasal kirleticilerin taşınımı boyutlarını içermektedir. Bu çok yönlü süreçler, mikroplastiklerin yalnızca çevrede kalıcı kirleticiler olarak değil, aynı zamanda gıda zincirine çoklu yollarla entegre olabilen karmaşık kirleticiler olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

8. MİKROPLASTİK MARUZİYETİNİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mikroplastiklerin insan vücuduna girişi başlıca ağız, solunum ve deri yoluyla gerçekleşmektedir. Bu parçacıkların biyolojik sistemlerde kalıcılık ve taşınım yetenekleri, çok sayıda organ ve dokuda olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Nawab ve ark., 2024). Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin insan kanı, akciğer dokusu, plasenta, anne sütü ve dışkı örneklerinde saptandığını göstermektedir. Bu bulgular, mikroplastik maruziyetinin sistemik bir özellik kazandığını ve vücutta çoklu organ etkilerinin ortaya çıkabileceğini ortaya koymaktadır (Roslan ve ark., 2024).

8.1. Solunum Sistemi Üzerine Etkiler

Solunum, mikroplastiklere maruziyetin en önemli yollarından biridir. Atmosferde lif ya da partiküller hâlinde bulunan mikroplastikler, başlıca sentetik tekstil ürünlerinden dökülen lifler ve araç lastiklerinin yol yüzeyinde aşınması sonucu ortaya çıkar. Bu parçacıklar, büyüklüklerine bağlı olarak solunum

yollarının farklı bölgelerinde tutulabilir. Özellikle 10 µm'den küçük mikroplastiklerin, alveollere kadar ulaşabildiği gösterilmiştir (Winiarska ve ark., 2024).

Akciğer dokusu üzerinde yapılan mikroskopik incelemeler, mikroplastiklerin inflamatuvar hücrelerin birikmesine (infiltrasyonu), bağ dokusunda sertleşmeye (fibrozis) ve oksidatif strese neden olabileceğini ortaya koymuştur. Bu biyolojik tepkiler, dokularda uzun süreli tahrişe ve hücre hasarına yol açabilmektedir. Kronik maruziyet durumlarında, bronş yüzeyini kaplayan epitel tabakasının kalınlaştığı ve bağışıklık sisteminde yer alan sitokin adı verilen sinyal moleküllerinin üretiminin arttığı bildirilmiştir (Lee ve ark., 2023).

Ayrıca mikroplastikler, akciğerlerde biriken diğer hava kirleticilerle etkileşime girerek bu hasarı daha da artırabilir. İn vitro çalışmalar, özellikle polietilen ve polipropilen türü plastik parçacıkların bağışıklık sistemi hücrelerinden olan makrofajları uyardığını ve reaktif oksijen türleri (ROS) adı verilen zararlı moleküllerin üretimini artırdığını göstermiştir. Bu durum, hücresel düzeyde oksidatif stresin ve iltihaplanmanın güçlenmesine yol açar.

Uzun süreli solunum yoluyla maruziyetin, astım, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) ve akciğer fibrozisi gibi kronik solunum hastalıklarının ilerlemesini hızlandırabileceği düşünülmektedir. Ayrıca mikroplastikler yalnızca fiziksel etkiler değil, aynı zamanda taşıdıkları toksik katkı maddeleri (örneğin bisfenol A (BPA) ve ftalatlar) aracılığıyla da zarar verebilir. Bu maddelerin solunum yollarındaki hücrelerle doğrudan teması, hücresel toksisiteye ve doku bütünlüğünün bozulmasına neden olabilmektedir (Saha ve Saha, 2024).

8.2. Kardiyovasküler Sistem Üzerine Etkiler

Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroplastiklerin dolaşım sistemine geçebildiğini ve kan plazmasında tespit

edildiğini göstermektedir. Bu parçacıkların bir kısmı, 1 μm 'den daha küçük boyutlara sahip nanoplastik formundadır ve bu sayede kan-beyin bariyeri ya da kan-doku bariyeri gibi koruyucu yapıları aşabilecek kadar küçüktür. Mikroplastiklerin damar iç yüzeyini kaplayan endotel hücreleri ile doğrudan etkileşime girmesi, endotel fonksiyon bozukluğu (disfonksiyonu) ve iltihabi yanıt gelişimine yol açabilmektedir. Bu durum, ateroskleroz olarak bilinen damar sertliği sürecinin başlamasında veya hızlanmasında rol oynayabilir (Abbas ve ark., 2025).

Hayvan modelleri üzerinde yapılan deneyler, mikroplastik maruziyetinin kalp kası hücrelerinde mitokondri hasarı, lipid peroksidasyonu ve ritim bozukluklarına eğilim ile ilişkili olabileceğini göstermiştir (Zhu ve ark., 2023). Ayrıca polistiren nanopartiküller kullanılarak yapılan laboratuvar çalışmalarında, bu partiküllerin damar geçirgenliğini artırdığı ve bunun sonucunda tromboz eğilimini yükselttiği belirlenmiştir (Sivakumar ve ark., 2025). Bu bulgular, uzun vadede kardiyovasküler sistemin mikroplastiklerin etkilerine karşı oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

8.3. Gastrointestinal Sistem Üzerine Etkiler

Mikroplastiklerin insan vücuduna girişinde gastrointestinal sistem temel bir yol olarak öne çıkmaktadır. Gıda ve içeceklerle birlikte alınan bu parçacıklar, sindirim kanalında hem fiziksel hem de kimyasal stres yaratabilir. Özellikle 10 μm 'den daha küçük mikroplastiklerin, bağırsak epitel hücrelerinden geçerek sistemik dolaşıma ulaşabildiği gösterilmiştir. Bu süreç, bağırsak bariyerinin bütünlüğünü bozarak “geçirgen bağırsak sendromu” benzeri durumlara zemin hazırlayabilir (Donkers ve ark., 2022).

Mikroplastiklerin, sindirim sisteminde yaşayan yararlı mikroorganizmalar üzerinde de olumsuz etkileri olduğu belirlenmiştir. Özellikle polistiren ve polietilen partiküllerle

yapılan çalışmalarda, bağırsaktaki yararlı bakterilerin oranının azaldığı, buna karşılık iltihapla ilişkili türlerin (örn: *Enterobacteriaceae*) arttığı bildirilmiştir (Lee ve ark., 2023). Bu mikrobiyota değişimi, metabolik bozukluklar, obezite ve bağışıklık sistemi dengesizlikleri gibi ikincil sağlık sorunlarının gelişimine katkıda bulunabilir. Ayrıca mikroplastikler, sindirim sıvıları içinde kısmen çözünerek taşıdıkları toksik katkı maddelerini serbest bırakabilir. Bu maddeler arasında ağır metaller ve ftalatlar gibi kimyasallar yer alır. Vücuda geçen bu bileşiklerin, özellikle karaciğer ve böbreklerde biyokimyasal stres, enzim aktivitesinde bozulma ve apoptozis gibi zararlı süreçleri tetiklediği gösterilmiştir (Jayavel ve ark., 2024; Lee ve ark., 2023).

8.4. Üreme Sistemi Üzerine Etkiler

Mikroplastiklerin endokrin sistem üzerindeki bozucu etkileri, üreme sağlığı açısından önem kazanan bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir. Özellikle polikarbonat, PVC ve polistiren gibi yaygın polimerlerde bulunan ftalatlar ve bisfenol A (BPA) türevleri, östrojen benzeri biyolojik aktiviteler sergileyerek hormonal dengenin bozulmasına yol açabilmektedir. Bu durum, üreme fonksiyonlarının olumsuz etkilenmesi ve fertilite sorunlarının ortaya çıkmasıyla ilişkilendirilmektedir (Lee ve ark., 2023).

Deneyssel çalışmalar, nanoplastik boyutundaki parçacıkların plasenta bariyerini aşabildiğini göstermiştir (Fournier ve ark., 2020). Bu bulgu, mikroplastiklerin fetüs dokularında birikerek düşük doğum ağırlığı ve gelişimsel anormalliklere yol açabileceğini düşündürmektedir. İnsanlarda bu etkileşimi doğrudan gösteren veriler sınırlı olsa da plasenta ve akciğer dokularında mikroplastiklerin tespit edilmiş olması söz konusu riskin ciddiyetine işaret etmektedir (Ragusa ve ark., 2021; Wang ve ark., 2023).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, mikroplastiklerin hem plasenta dokusunda hem de anne sütünde saptanması, transplasental geçişin mümkün olduğunu ortaya koymuştur (Liu ve ark., 2023; Barceló ve ark., 2023). Bu bulgu fetüsün gelişim süreci boyunca mikroplastiklere doğrudan maruz kalabileceğini düşündürmektedir. Deneysel modellerde ise polistiren nanopartiküllerin, embriyonik hücre bölünmesini yavaşlattığı (Barbato ve ark., 2020) ve DNA metilasyon örüntülerini değiştirdiği saptanmıştır (Malinowska ve ark., 2024). Bu epigenetik değişiklikler, uzun vadede gelişimsel bozukluklar ve üreme fonksiyonlarında kalıcı etkiler oluşturma potansiyeline sahiptir.

8.5. Sinir Sistemi Üzerine Etkiler

Güncel araştırmalar, mikroplastiklerin nörotoksik etkiler gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu parçacıkların, özellikle nanoplastik boyutundakilerin, kan-beyin bariyerini geçebildiği ve sinir dokusunda birikebildiği belirlenmiştir (Abbas ve ark., 2025; Araújo ve ark., 2025). Bu durum, mikroplastiklerin merkezi sinir sistemi hücreleriyle doğrudan etkileşime girebileceğini ve sinir dokusunda mikroişinlamasyon, oksidatif stres ve hücre hasara neden olabileceğini göstermektedir.

Deneysel çalışmalar, mikroplastiklerin nöronlarda kalsiyum iyon dengesini bozabildiğini, mitokondriyal fonksiyonları zayıflattığını ve sinaptik iletimi olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur (Araújo ve ark., 2025). Hayvan modellerinde, uzun süreli mikroplastik maruziyetinin nöron ölümünü artırdığı, öğrenme ve hafıza performansını zayıflattığı ve nöroinflatuar yanıtları tetiklediği bildirilmiştir. Bu etkiler, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel olarak değil, aynı zamanda yüzeylerinde taşınan ağır metaller ve organik toksinler aracılığıyla da toksisite gösterebileceğini düşündürmektedir. Bu bileşikler, sinir hücrelerinde oksidatif stresin artmasına yol açarak

hücre zarına, mitokondriye ve DNA'ya zarar verebilir (Abbas ve., 2025; Prüst ve ark., 2020).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, uzun süreli mikroplastik maruziyetinin Parkinson ve Alzheimer gibi nörodejeneratif hastalıkların ilerleyişini hızlandırabileceğini öne sürmektedir. Her ne kadar bu ilişki insanlar üzerinde kesin olarak kanıtlanmamış olsa da mevcut bulgular mikroplastiklerin sinir sistemi sağlığı açısından ciddi bir çevresel risk oluşturduğunu göstermektedir (Abbas ve ark., 2025; Gao ve ark., 2025).

8.6. Bağışıklık Sistemi Üzerine Etkiler

Mikroplastiklerin bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri doğal ve kazanılmış bağışıklık yanıtlarını kapsamaktadır. Bu parçacıklar vücuda girdiğinde, bağışıklık hücreleri tarafından yabancı bir madde olarak algılanır ve inflamasyonu başlatan kimyasal sinyallerin (örneğin IL-6, TNF- α , IL-1 β gibi sitokinlerin) salgılanmasına yol açar. Bu süreç uzun süre devam ettiğinde, kalıcı inflamatuvar bir duruma neden olabilir (Mahmud ve ark., 2024).

Mikroplastiklerin makrofaj ve dendritik hücreler gibi bağışıklık sistemi hücrelerinde birikmesi, bu hücrelerin fagositoz yeteneğini azaltırken, serbest radikal üretimini artırır. Bu durum hücre içinde daha fazla hasara yol açar ve bağışıklık yanıtlarının dengesini bozar (Zeng ve ark., 2024). Ayrıca mikroplastiklerin bağırsak florası üzerindeki olumsuz etkileri, bağırsak ile bağışıklık sistemi arasındaki dengeyi zayıflatabilir; bu da otoimmün hastalıkların ortaya çıkma riskini artırabilir. Mikroplastiklerin bağışıklık sistemini bu şekilde sürekli uyarak kronik bir iltihap döngüsü oluşturması, uzun vadede kanser, alerjik hastalıklar ve diğer kronik sağlık sorunlarının gelişme riskini yükseltebilir (Mahmud ve ark., 2024).

Sonuç olarak, mevcut bulgular mikroplastiklerin yalnızca belirli bir organda değil, sistemik düzeyde çok yönlü toksik

etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu etkiler, inflamasyon, oksidatif stres, hormonal dengesizlik ve hücrel toksisite gibi ortak biyolojik mekanizmalar üzerinden ilerlemekte; sonuçta organizma genelinde metabolik, immünolojik ve nörolojik dengesizliklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla mikropplastik maruziyeti, sadece çevresel bir sorun değil, insan sağlığını çok boyutlu etkileyen küresel bir halk sağlığı problemidir.

9. SONUÇ

Mikropplastik kontaminasyonu, modern yaşamın bir yan ürünü olarak ortaya çıkan ve gıda güvenliğini tehdit eden bir çevre sorunudur. Çeşitli ekosistemlerde tespit edilmeleri, bu parçacıkların yalnızca çevresel değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve halk sağlığı açısından da ciddi bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir. Deniz ürünlerinden içme sularına, tuzdan tarım ürünlerine kadar birçok gıda grubunda mikropplastik varlığı doğrulanmış; bu da insan maruziyetinin kaçınılmaz bir düzeye ulaştığını ortaya koymuştur.

Mevcut bulgular, mikropplastiklerin solunum, sindirim ve dolaşım sistemleri başta olmak üzere çok sayıda biyolojik sistem üzerinde toksik etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, mikropplastiklerin uzun vadeli sağlık sonuçları ve hücrel düzeydeki etkileri henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmaların mikropplastiklerin biyolojik etkilerinin mekanizmalarını ve sınır değerlerini belirlemeye odaklanması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abbas, G., Ahmed, U., & Ahmad, M. A. (2025). Impact of Microplastics on Human Health: Risks, Diseases, and Affected Body Systems. *Microplastics*, 4(2), 23.
- Ahmad, M. F., Fauzi, M. A., Ahmad, M. H., Wider, W., & Lee, C. K. (2024). Are we eating plastic? Science mapping of microplastic pollution in the aquatic food chain. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(6), 1800-1811.
- Araújo, A. M., Mota, C., Ramos, H., Faria, M. A., Carvalho, M., & Ferreira, I. M. (2025). The neurotoxic threat of micro- and nanoplastics: evidence from In Vitro and In Vivo models. *Archives of Toxicology*, 1-21.
- Aslam, S., Khurram, A., Hussain, R., Qadir, A., & Ahmad, S. R. (2023). Sources, distribution, and incipient threats of polymeric microplastic released from food storage plastic materials. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 638.
- Athanasopoulou, E., Power, D. M., Flemetakis, E., & Tsironi, T. (2025). Towards the Rational Use of Plastic Packaging to Reduce Microplastic Pollution: A Mini Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1245.
- Aydin, S., Mucevher, O., Ulvi, A., Beduk, F., Aydin, M. E., Merken, O., & Uzun, C. (2025). Effects of long-term wastewater irrigation on microplastics pollution in agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(20), 12340-12359.
- Baby, A., & Revathy, V. S. (2025, May). Review on Microplastic Pollution in Marine Ecosystems: Sources, Distribution, Ecological Impacts, and Future Directions.

In *Proceedings of the Zoological Society* (pp. 1-14). New Delhi: Springer India.

- Barbato, V., Talevi, R., Gualtieri, R., Pallotta, M. M., Di Nardo, M., Costanzo, V., ... & Capriglione, T. (2020). Polystyrene nanoparticles may affect cell mitosis and compromise early embryo development in mammals. *Theriogenology*, 145, 18-23.
- Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R., Lundebye, A. K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine pollution bulletin*, 133, 336-348.
- Barceló, D., Picó, Y., & Alfthan, A. H. (2023). Microplastics: Detection in human samples, cell line studies, and health impacts. *Environmental toxicology and pharmacology*, 101, 104204.
- Barhoumi, B., Sander, S. G., & Tolosa, I. (2022). A review on per- and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in microplastic and food-contact materials. *Environmental Research*, 206, 112595.
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., & Gerdt, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science advances*, 5(8), eaax1157.
- Beygi, A. A. (2025). Microplastic Contamination in the Global Food Supply Chain: Detection, Implications, and Regulatory Recommendations. *Salamat Academic & Research Journal*, 2(1), 33-42.
- Bhattacharjee, U., Baruah, K. N., & Shah, M. P. (2025). Exploring sustainable strategies for mitigating microplastic contamination in soil, water, and the food chain: A

comprehensive analysis. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*.

- Bostan, N., Ilyas, N., Akhtar, N., Mehmood, S., Saman, R. U., Sayyed, R. Z., ... & Pandiaraj, S. (2023). Toxicity assessment of microplastic (MPs); a threat to the ecosystem. *Environmental Research*, 234, 116523.
- Büks, F., & Kaupenjohann, M. (2020). Global concentrations of microplastic in soils, a review. *Soil Discussions*, 2020, 1-26.
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, 368(6496), 1257-1260.
- Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science advances*, 4(6), eaat0131.
- Cella, C., La Spina, R., Mehn, D., Fumagalli, F., Ceccone, G., Valsesia, A., & Gilliland, D. (2022). Detecting micro-and nanoplastics released from food packaging: Challenges and analytical strategies. *Polymers*, 14(6), 1238.
- Conti, G. O., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., ... & Zuccarello, P. (2020). Micro-and nanoplastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental research*, 187, 109677.
- 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.
- Danopoulos, E., Jenner, L. C., Twiddy, M., & Rotchell, J. M. (2020). Microplastic contamination of seafood intended for human consumption: a systematic review and meta-

- analysis. *Environmental health perspectives*, 128(12), 126002.
- Das, P., Gabriel, J. C. P., Tay, C. Y., & Lee, J. M. (2021). Value-added products from thermochemical treatments of contaminated e-waste plastics. *Chemosphere*, 269, 129409.
- De Falco, F., Cocca, M., Avella, M., & Thompson, R. C. (2020). Microfiber release to water, via laundering, and to air, via everyday use: a comparison between polyester clothing with differing textile parameters. *Environmental science & technology*, 54(6), 3288-3296.
- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., & Avella, M. (2019). The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Scientific reports*, 9(1), 6633.
- Donkers, J. M., Höppener, E. M., Grigoriev, I., Will, L., Melgert, B. N., van der Zaan, B., ... & Kooter, I. M. (2022). Advanced epithelial lung and gut barrier models demonstrate passage of microplastic particles. *Microplastics and Nanoplastics*, 2(1), 6.
- Fournier, S. B., D'Errico, J. N., Adler, D. S., Kollontzi, S., Goedken, M. J., Fabris, L., ... & Stapleton, P. A. (2020). Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy. *Particle and Fibre Toxicology*, 17(1), 55.
- Fraissinet, S., De Benedetto, G. E., Malitesta, C., Holzinger, R., & Materić, D. (2024). Microplastics and nanoplastics size distribution in farmed mussel tissues. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 128.
- Gao, H. T., Zhou, H. Q., Ji, H. N., Shen, J. Z., Yin, D. M., & Wu, D. H. (2025). From exposure to neurotoxicity induced by micro-nanoplastics with brain accumulation and cognitive

- decline. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 304, 119114.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
- Giechaskiel, B., Grigoratos, T., Mathissen, M., Quik, J., Tromp, P., Gustafsson, M., ... & Dilara, P. (2024). Contribution of road vehicle tyre wear to microplastics and ambient air pollution. *Sustainability*, 16(2), 522.
- Harikrishnan, T., Janardhanam, M., Sivakumar, P., Sivakumar, R., Rajamanickam, K., Raman, T., ... & Singaram, G. (2023). Microplastic contamination in commercial fish species in southern coastal region of India. *Chemosphere*, 313, 137486.
- Hernandez, L. M., Xu, E. G., Larsson, H. C., Tahara, R., Maisuria, V. B., & Tufenkji, N. (2019). Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea. *Environmental science & technology*, 53(21), 12300-12310.
- Hollerova, A., Hodkovicova, N., Blahova, J., Faldyna, M., Franc, A., Pavloková, S., ... & Svobodova, Z. (2023). Polystyrene microparticles can affect the health status of freshwater fish—Threat of oral microplastics intake. *Science of The Total Environment*, 858, 159976.
- Jayavel, S., Govindaraju, B., Michael, J. R., & Viswanathan, B. (2024). Impacts of micro and nanoplastics on human health. *Bulletin of the National Research Centre*, 48(1), 110.
- Jung, Y. S., Sampath, V., Prunicki, M., Aguilera, J., Allen, H., LaBeaud, D., ... & Nadeau, K. (2022). Characterization and regulation of microplastic pollution for protecting

- planetary and human health. *Environmental Pollution*, 315, 120442.
- Kim, J. S., Lee, H. J., Kim, S. K., & Kim, H. J. (2018). Global pattern of microplastics (MPs) in commercial food-grade salts: sea salt as an indicator of seawater MP pollution. *Environmental science & technology*, 52(21), 12819-12828.
- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water research*, 155, 410-422.
- 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.
- Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature communications*, 8(1), 15611.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., ... & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific reports*, 8(1), 4666.
- Lee, Y., Cho, J., Sohn, J., & Kim, C. (2023). Health effects of microplastic exposures: current issues and perspectives in South Korea. *Yonsei medical journal*, 64(5), 301.
- Leslie, H. A., Van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment international*, 163, 107199.

- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136-2140.
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2015). Origin of synthetic particles in honeys. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 65(2), 143-147.
- Liu, S., Jian, M., Zhou, L., & Li, W. (2019). Distribution and characteristics of microplastics in the sediments of Poyang Lake, China. *Water Science and Technology*, 79(10), 1868-1877.
- Liu, S., Guo, J., Liu, X., Yang, R., Wang, H., Sun, Y., ... & Dong, R. (2023). Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study. *Science of the total environment*, 854, 158699.
- Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific reports*, 5(1), 14947.
- Mahmud, F., Sarker, D. B., Jocelyn, J. A., & Sang, Q. X. A. (2024). Molecular and cellular effects of microplastics and nanoplastics: focus on inflammation and senescence. *Cells*, 13(21), 1788.
- Malinowska, K., Tarhonska, K., Foksiński, M., Sicińska, P., Jabłońska, E., Reszka, E., ... & Bukowska, B. (2024). Impact of short-term exposure to non-functionalized polystyrene nanoparticles on DNA methylation and gene expression in human peripheral blood mononuclear cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12786.

- Manimozhi, N., Rani, V., Sudhan, C., Manimekalai, D., Shalini, R., & Abarna, K. M. (2022). Spatiotemporal occurrence, distribution, and characterization of microplastics in salt pans of the coastal region of the Gulf of Mannar, southeast coast of India. *Regional Studies in Marine Science*, 53, 102350.
- Mason, S. A., Welch, V. G., & Neratko, J. (2018). Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in chemistry*, 6, 389699.
- Napper, I. E., Davies, B. F., Clifford, H., Elvin, S., Koldewey, H. J., Mayewski, P. A., ... & Thompson, R. C. (2020). Reaching new heights in plastic pollution—preliminary findings of microplastics on Mount Everest. *One Earth*, 3(5), 621-630.
- Nawab, A., Ahmad, M., Khan, M. T., Nafees, M., Khan, I., & Ihsanullah, I. (2024). Human exposure to microplastics: A review on exposure routes and public health impacts. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100487.
- Nicole, W. (2021). Microplastics in seafood: How much are people eating?. *Environmental Health Perspectives*, 129(3), 034001.
- Novotna, K., Cermakova, L., Pivokonska, L., Cajthaml, T., & Pivokonsky, M. (2019). Microplastics in drinking water treatment—current knowledge and research needs. *Science of the total environment*, 667, 730-740.
- Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, 2(6), 315-320.

- Pan, Z., Liu, Q., Xu, J., Li, W., & Lin, H. (2022). Microplastic contamination in seafood from Dongshan Bay in southeastern China and its health risk implication for human consumption. *Environmental Pollution*, 303, 119163.
- Parenti, C. C., Ghilardi, A., Della Torre, C., Magni, S., Del Giacco, L., & Binelli, A. (2019). Evaluation of the infiltration of polystyrene nanobeads in zebrafish embryo tissues after short-term exposure and the related biochemical and behavioural effects. *Environmental Pollution*, 254, 112947.
- Peng, X., Chen, M., Chen, S., Dasgupta, S., Xu, H., Ta, K., ... & Bai, S. (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Perspect. Lett*, 9(1), 1-5.
- Pérez-Reverón, R., González-Sálamo, J., Hernández-Sánchez, C., González-Pleiter, M., Hernández-Borges, J., & Díaz-Peña, F. J. (2022). Recycled wastewater as a potential source of microplastics in irrigated soils from an arid-insular territory (Fuerteventura, Spain). *Science of The Total Environment*, 817, 152830.
- Piehl, S., Leibner, A., Löder, M. G., Dris, R., Bogner, C., & Laforsch, C. (2018). Identification and quantification of macro-and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific reports*, 8(1), 17950.
- Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. (2020). The plastic brain: neurotoxicity of micro-and nanoplastics. *Particle and fibre toxicology*, 17(1), 24.
- Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C. (2020). Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Science of the Total Environment*, 703, 134722.

- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment international*, 146, 106274.
- Revel, M., Châtel, A., & Mouneyrac, C. (2018). Micro (nano) plastics: a threat to human health?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 17-23.
- Rhodes, C. J. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science progress*, 101(3), 207-260.
- Roslan, N. S., Lee, Y. Y., Ibrahim, Y. S., Anuar, S. T., Yusof, K. M. K. K., Lai, L. A., & Brentnall, T. (2024). Detection of microplastics in human tissues and organs: A scoping review. *Journal of Global Health*, 14, 04179.
- Sa'adu, I., & Farsang, A. (2022). Greenhouse farming as a source of macroplastic and microplastics contamination in agricultural soils: a case study from Southeast-Hungary. *Agrokémia és Talajtan*.
- Saha, S. C., & Saha, G. (2024). Effect of microplastics deposition on human lung airways: A review with computational benefits and challenges. *Heliyon*, 10(2).
- Schmidt, C., Krauth, T., & Wagner, S. (2017). Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environmental science & technology*, 51(21), 12246-12253.
- 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. (2024). Microplastic contamination in food processing: Role of packaging materials. *Food Science and Engineering*, 271-287.

- 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.
- Sivakumar, R., Senghor Kadalangudi Aravaanan, A., Vellore Mohanakrishnan, V., & Kumar, J. (2025). From Environment to Endothelium: The Role of Microplastics in Vascular Aging. *Microplastics*, 4(3), 52.
- Solomon, O. O., & Palanisami, T. (2016). Microplastics in the marine environment: current status, assessment methodologies, impacts and solutions. *Journal of Pollution Effects & Control*, 1–13.
- Süssmann, J., Krause, T., Fischer, E. K., Walz, E., Greiner, R., Rohn, S., & Fritsche, J. (2025). Microplastics in fresh and processed seafood—A survey of products sold in Germany. *Food Control*, 111565.
- Vassilenko, E., Watkins, M., Chastain, S., Mertens, J., Posacka, A. M., Patankar, S., & Ross, P. S. (2021). Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles. *Plos one*, 16(7), e0250346.
- Vitali, C., Peters, R. J., Janssen, H. G., & Nielen, M. W. (2023). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages; part I. Occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 159, 116670.
- Wang, S., Lu, W., Cao, Q., Tu, C., Zhong, C., Qiu, L., ... & Liu, J. (2023). Microplastics in the lung tissues associated with blood test index. *Toxics*, 11(9), 759.
- Winiarska, E., Jutel, M., & Zemelka-Wiacek, M. (2024). The potential impact of nano-and microplastics on human

health: Understanding human health risks. *Environmental Research*, 251, 118535.

Zeng, W., He, S., Zhao, Y., Jiang, M., Wang, W., Yang, L., ... & Zhuang, W. (2024). Microplastics Exposure Aggravates Synovitis and Pyroptosis in SLE by Activating NF- κ B and NRF2/KEAP1 Signaling. *Toxics*, 12(12), 840.

Zhu, X., Wang, C., Duan, X., Liang, B., Xu, E. G., & Huang, Z. (2023). Micro-and nanoplastics: a new cardiovascular risk factor?. *Environment international*, 171, 107662.

ULTRASON VE GIDA TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI

Beril SERTER¹

Osman İrfan İLHAK²

1. GİRİŞ

Gıdaların işlenmesi, tarımsal ve hayvansal ürünleri, çeşitli işlem adımlarıyla insan tüketimine uygun hale getirilmiş ürünlere dönüştürme sürecidir. Bu süreçler sırasında, gıda güvenliğini korumak ön plandadır. Aynı zamanda, işlem görmüş gıda ürünlerinin istenilen tat, aroma ve lezzet özelliklerini kaybetmeden uzun raf ömrüne sahip olmaları beklenmektedir.

Son yıllarda, sağlığı destekleyici veya hastalık önleyici özellikler taşıdığı öne sürülen fonksiyonel gıdalara olan tüketici ilgisi de hızla artmıştır. Bu doğrultuda, gıdaların yalnızca besleyici özellikleri ve duyu kalitesini değil, aynı zamanda içerdikleri özel bileşenlerin biyoaktivitesini de koruyabilen işleme yöntemlerinin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Geleneksel gıda işleme yöntemleri genellikle yoğun ısı kullanımı veya kimyasal işlemler içermektedir. Ancak, bu termal işlemler, gıdaların bileşenlerini değiştirerek istenmeyen tat, doku veya görünüm bozuluklarına yol açabilir; fonksiyonel özelliklerini etkileyip besin değerini azaltabilir. Bu sorunları

¹ Yük. Gıda Müh., Balıkesir Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Veterinerlik Besin Hijyeni ve Teknolojisi Ana Bilim Dalı, ORCID: 0000-0001-8507-9894.

² Prof. Dr., Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-1769-6249.

aşmak için alternatif yöntem arayışı gıda endüstrisini termal olmayan teknolojilere yönlendirmektedir.

Farklı gıda ürünlerinde (meyve ve sebzeler, süt ürünleri, et ve tahıllar), temel gıda işlemlerinin (kurutma, fermentasyon, vb.) yeni teknolojilerle birlikte uygulanmasıyla işlemler daha verimli hale de getirilebilmektedir.

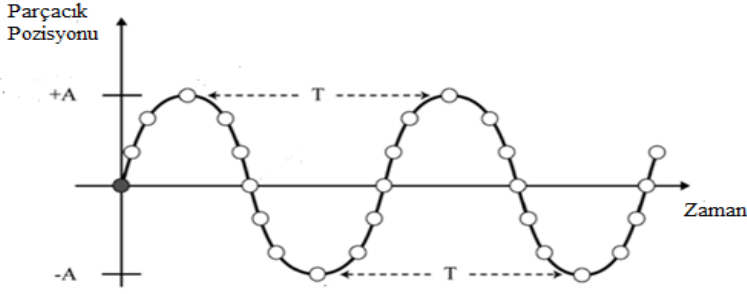
Genellikle tıbbi görüntüleme ve teşhisle ilişkilendirilen ultrason, özellikle ekonomik, basit ve enerji verimli bir yöntem olarak öne çıkan yenilikçi bir teknolojidir.

2. ULTRASON VE ÇEŞİTLERİ

Bir nesnenin titreşimiyle oluşan ve iletken bir ortamda yayılan mekanik dalgalara ses dalgası denir. Frekans, bir ses dalgasının birim zamanda oluşturduğu döngü sayısıdır (Hz) (Şekil 1). Ses dalgaları frekans aralıklarına göre üç grupta incelenir: infrason (<16 Hz), işitilebilir ses (16 Hz–16 kHz) ve ultrason (>16 kHz). İnsan kulağının duyamadığı ultrasonik dalgaların dalga boyu kısadır ve parçacıklar saniyede 20.000'den fazla titreşir.

Ultrason, kaynaklara göre farklılık göstermekle birlikte genel olarak 16–20 kHz ile 10 MHz/1 GHz aralığındaki frekanslar için kullanılır. İlk kez 1922'de tanımlanmış, 1950'lerden itibaren çeşitli alanlarda uygulanmaya başlanmıştır.

Ultrasonun temel parametreleri güç, yoğunluk ve enerji yoğunluğudur. Yoğunluk (W/cm^2), birim yüzeye aktarılan güçtür. Enerji yoğunluğu ise güç, frekans, uygulama süresi ve örnek hacminden hesaplanır. Genlik (μm), parçacıkların denge pozisyonundan sapmasını ifade eder. Ultrason cihazları genellikle 20–40 kHz sabit frekansta çalışır; güç ve enerji, genlik ayarlanarak kontrol edilir.



Şekil 1. Ultrason dalgası (Bermúdez-Aguirre ve ark., 2010).

Ultrason frekansa göre üç sınıfta değerlendirilir: Güç ultrasonu (16–100 kHz), Sonokimya için yüksek frekans (100 kHz–1 MHz), Tıbbi/diagnostik ultrason (1–10 MHz).

Gıda teknolojisinde hem düşük yoğunluklu (100 kHz–1 MHz, $<1 \text{ W/cm}^2$) hem de yüksek yoğunluklu (20–100 kHz, $10\text{--}1000 \text{ W/cm}^2$) ultrason kullanılır. Düşük yoğunluklu ultrason, üründe fiziksel/kimyasal değişime yol açmadığı için tahribatsız analizlerde (kompozisyon, olgunluk, sertlik, partikül büyüklüğü vb.) ve kalite kontrolünde yaygındır. Ayrıca yüzey temizliği, kristalizasyon, filtrasyon, dondurma ve enzim inaktivasyonu gibi işlemlerde de kullanılabilir.

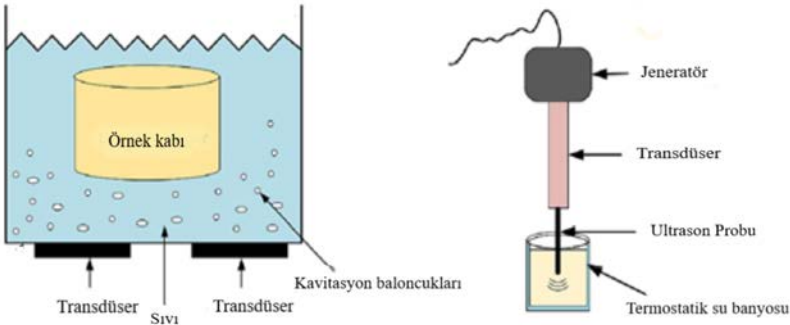
Yüksek yoğunluklu ultrason (HIUS) veya güç ultrasonu, akustik kavitasyon oluşturarak gıdanın fiziksel ve biyokimyasal özelliklerini değiştirir. Gıda işleme sırasında ısı ve kütle transferini artırır; örneğin etlerde bileşim analizinden olgunlaşma süresinin hızlandırılmasına ve tekstür iyileştirmeye kadar çeşitli amaçlarla kullanılır.

Ultrasonun etkinliği; örnek türü, hacmi, giriş gücü, frekans, genlik, uygulama süresi ve sıcaklık gibi birçok parametreye bağlıdır. Ayrıca ultrason tek başına uygulanabileceği gibi, termosonikasyon (ısı + ultrason), manosonikasyon (basınç + ultrason) ve manotermosonikasyon (ısı + basınç + ultrason) gibi kombinasyonlarla da kullanılabilir.

2.1. Ultrason Cihazları

Ultrason cihazları temel olarak jeneratör, transdüser ve prob (boynuz) olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Jeneratör sistemi besleyen elektrik enerjisini üretirken, transdüser (çevirici) bu enerjiyi ultrasonik dalgalara dönüştürür. Prob ya da reaktör ise bu dalgaların ortama aktarılmasını sağlar.

Ultrason uygulamalarında iki tip yayıcı kullanılır: ultrason banyoları ve prob sistemleri (Şekil 2). Ultrason banyoları, temizleme tankına benzer bir yapıya sahiptir; bir veya daha fazla transdüser tankın tabanına yerleştirilir ve ultrason dalgaları çözeltiye dolaylı olarak iletilir. Sıvı fazda homojen dalga dağılımı sağlar ve geniş hacimli uygulamalara uygundur.



Şekil 2. Ultrason banyosu ve ultrason probu (Zhang ve ark., 2023).

Prob cihazları ise doğrudan sıvı ortama daldırılarak çalışır. Kesikli veya sürekli modda kullanılabilir ve yüksek güç yoğunluğu gereken uygulamalarda tercih edilir. Prob çapları çalışma tipine göre değişir (3–19 mm arasında).

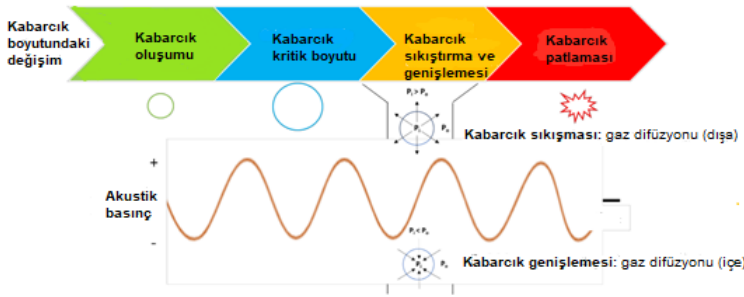
Ultrason termal olmayan bir işlem olarak sınıflandırılabilir, mekanik titreşimler nedeniyle ortam sıcaklığını yaklaşık 1–10 °C artırabilir. Bu nedenle birçok araştırmada numuneler, sıcaklık kontrolü sağlamak amacıyla soğuk su dolaşan çift cidarlı kaplarda tutulmaktadır.

2.2. Ultrason Teknolojisinin Genel Çalışma Prensipleri

Ultrason teknolojisi, yüksek frekanslı ses dalgalarının sıvı ortamda ilerlerken oluşturduğu sıkışma–genişleme döngüleri sonucunda ortaya çıkan akustik kavitasyon olgusuna dayanır. Kavitasyon, sıvı içinde mikro kabarcıkların oluşması, büyümesi ve ani şekilde çökmesiyle gerçekleşir (Şekil 3). Bu kabarcıkların çöküşü, ultrason dalgalarının neden olduğu ani basınç değişimleri nedeniyle ortaya çıkar ve sıvı jetlerinin saatte 400 km hızlara ulaşmasına, çevre yapıların (örneğin hücre zarlarının) zarar görmesine neden olabilir.

Kabarcıkların boyutu ve davranışı ultrason frekansı, basıncı, kabarcık yarıçapı, sıvının viskozitesi, gaz içeriği, sıcaklık ve diğer çevresel koşullara bağlıdır. Düşük frekanslarda (ör. 20 kHz) kabarcıklar daha büyük boyutlara ulaşır ve çöküşleri daha güçlü şok dalgaları üretir.

Ultrasonun temel etkisi, kavitasyon kabarcıklarının çökmesiyle oluşan şok dalgaları, türbülans, mikro akımlar ve lokal enerji yoğunluklarıdır. Bu süreç binlerce kabarcığın aynı anda davranmasıyla adeta mikro “fırtınalar” yaratır.

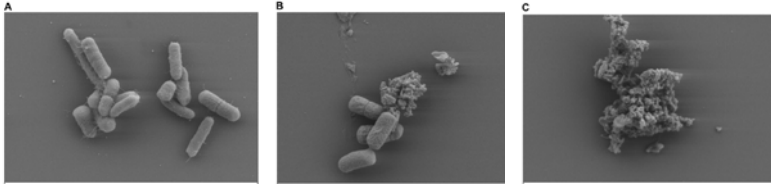


Şekil 3. Akustik kavitasyon sırasında kabarcık büyüme döngüsü (Carreira-Casais ve ark., 2021).

Akustik kavitasyon iki farklı biçimde görülür:

Kararlı (sabit) kavitasyon: Kabarcıklar birçok akustik döngü boyunca büyüyüp küçülür ancak çökmez. Mikro akımlar oluşturur ve karıştırma, emülsifikasyon gibi işlemleri destekler. Düşük düzeyde hücre zarında gözenek oluşumuna yol açabilir.

Geçici (şiddetli) kavitasyon: Ultrason yoğunluğu >10 W/cm² olduğunda ortaya çıkar. Kabarcıklar hızla büyür, ardından şiddetle çöker. Bu çöküş sırasında 2000–5000 K (1726–4726 °C) sıcaklık ve 50–100 MPa basınca ulaşan “sıcak noktalar” oluşur. Bu lokal etkiler hücre zarlarını parçalayabilir, enzimleri denatüre edebilir ve mikrosaniyeler içinde yüksek mekanik, termal ve sonokimyasal etki yaratır (Şekil 4).



Şekil 4. S. Enteritidis kültürlerinin Taramalı Elektron Mikroskopu altında görüntüleri (A) işlem uygulanmamış kontrol, (B) 5 dakikalık ultrasondan sonra ve (C) 30 dakikalık ultrasondan sonra (Techathuvanan ve ark., 2018).

Sonuç olarak ultrasonun gıdalar üzerindeki etkileri büyük ölçüde kavitasyonun şiddetine ve oluşma koşullarına bağlıdır; bu durum hem mikrobiyal inaktivasyon hem de çeşitli teknolojik işlemler açısından belirleyicidir.

3. ULTRASONUN GIDA ALANINDA KULLANIMI

Ultrason, gıda alanında giderek daha fazla uygulama alanı bulan, yüksek potansiyele sahip yenilikçi bir teknolojidir. Günümüzde ticari ölçekte de kullanılmaktadır. Örneğin süt

işleme tesislerinde, peynirin pürüzsüz şekilde kesilmesini sağlayan ultrasonik bıçaklar ve süt ürünlerinin ambalajlarında kullanılan ultrasonik kaynaklama işlemleri yaygın örneklerdir.

Bunlara ek olarak ultrason; dekontaminasyon, ekstraksiyon, düşük sıcaklıkta pastörizasyon, emülsifikasyon, homojenizasyon, kristalizasyon, dondurma ve çözündürme, kurutma, fermentasyon, olgunlaştırma, gaz giderme, köpük giderme, pestisit uzaklaştırma, yumuşatma, filtrasyon, enzim aktivasyonu/inaktivasyonu, pişirme, marinasyon ve salamura gibi pek çok işlem basamağında kullanılabilmektedir. Ayrıca polisakkarit ve proteinlerin biyoaktivitesi ile işlevsel özelliklerini iyileştirmede de etkili olduğu gösterilmiştir.

Gıda işleme uygulamaları genellikle 16–100 kHz frekans aralığında yürütülür. 20–25 kHz frekans aralığındaki ultrason daha çok fiziksel değişikliklere neden olurken, 2 MHz’e kadar yüksek frekanslar fiziksel etkilerden ziyade kimyasal reaksiyonları tetikler.

3.1. Etlerin Yumuşatılması ve Marinasyon

Ultrasonun et yumuşatma etkisi üç ana mekanizmaya dayanır: Mekanik titreşimler, ortamdaki iyonların yer değiştirmesi ve ultrason dalgalarının yayılması sırasında oluşan hızlanma farklılıkları.

Kavitasyonun ürettiği fiziksel etkiler, zayıf moleküller arası bağları kırarak et yapısında değişikliklere yol açabilir. Yüksek yoğunluklu ultrason (HIU), kas dokusunda fiziksel hasar oluşturur, miyofibriler protein ayrışmasını artırır ve kütle transferini hızlandırır. Bu nedenle hem yumuşaklık hem de protein parçalanmasında iyileşmeler rapor edilmiştir.

Kabarcıkların çökmesi sonucu meydana gelen mikro jetler, hücre zarlarını tahrip eder ve proteinlerde fizikokimyasal hasarlar oluşturabilir. Ultrason, lizozomal katepsinler ve hücre içi

kalsiyum (Ca^{2+}) salınımı yoluyla proteaz aktivitesini artırabilir. Ayrıca “sünger etkisi”, kas liflerinde mekanik hareket yaratarak marine çözeltisinin ete nüfuzunu kolaylaştırır.

Etin yumuşaklığı, belirli bir işlem süresi içinde ultrasonla pozitif yönde ilişkilidir; ancak aşırı uzun uygulamalar proteaz aktivitesini azaltabilir ve istenen yumuşatma etkisini tersine çevirebilir.

Ultrason marinasyonu hızlandırır ve daha sulu, daha yumuşak ürün elde edilmesini sağlar. Buna karşın frekans, yoğunluk ve süre gibi parametrelerin doğru optimize edilmemesi, protein denatürasyonu, karbonil oluşumu, tiyorbitürik asit değerlerinde artış ve serbest radikal üretimi gibi kalite sorunlarına yol açabilir. Bu radikaller protein ve lipid oksidasyonunu artırarak yapısal sertleşmelere neden olabilir. Bu nedenle endüstride güvenli kullanım için optimum parametrelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

3.2. Dondurma/Çözündürme ve Kristalizasyon

Dondurma, bozulabilir gıdaların raf ömrünü uzatmada temel yöntemlerden biridir. Dondurma sırasında oluşan buz kristallerinin boyutu, ürünün dokusu ve çözünme özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Küçük ve homojen kristaller, hücresel yapıları korur, çözünme sırasında daha az su kaybı sağlar ve ürün kalitesini artırır.

Ultrason, dondurma işlemi sırasında kristalizasyonu kontrol ederek: Daha hızlı donma, daha küçük buz kristalleri, daha iyi doku kalitesi sağlayabilir. Ancak ultrason ısı oluşturduğundan, güç ve süre parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerekir.

Çözündürme aşamasında da ultrason önemli avantaj sağlar. Kaviteasyon kabarcıklarının çökmesi, ısı transferini artırır ve çözülme süresini kısaltır. Bu durum mikrobiyal çoğalmayı

yavaşlatır ve kalite kayıplarını azaltır. Geleneksel çözündürme yöntemlerinin (hava, vakum, su) yüksek maliyet ve düşük verim gibi dezavantajları düşünüldüğünde, ultrason destekli çözündürme önemli bir alternatif hâline gelmektedir.

Ultrason ayrıca süt ürünleri, şekerlemeler ve dondurulmuş gıdalarda kristalleşme sürecini yönetme, çekirdeklenmeyi kontrol etme ve kristal büyümesini düzenleme potansiyeline sahiptir.

3.3. Emülsifikasyon ve Homojenizasyon

Emülsiyonlar, birbiriyle karışmayan iki sıvının emülgatör yardımıyla karıştırılmasıyla oluşur ve süt ürünlerinden soslara kadar pek çok gıdada kullanılır. Su içinde yağ (O/W) ve yağ içinde su (W/O) olmak üzere iki temel emülsiyon tipi vardır. Ultrason, yağ damlacıklarını çok daha küçük parçalara ayırarak daha kararlı emülsiyonlar oluşturabilir. Bu yöntem emülgatör ihtiyacını azaltarak “temiz etiketli” ürün geliştirme açısından avantaj sağlar.

Homojenizasyon amacıyla endüstride genellikle yüksek basınçlı sistemler kullanılır. Ultrason ise daha düşük enerji tüketimiyle benzer etkiyi sağlayabilir. Süt, krema ve yoğurt gibi ürünlerde parçacık boyutunun küçülmesi; emülsiyon stabilitesi, kıvam, duyu özellikler ve raf ömründe iyileşme sağlar. Ayrıca düşük frekanslı ultrason, süt içerisindeki ağır metallerin uzaklaştırılması için de kullanılabilir. Ultrason sonrası partikül boyutlarının değişmesi, lignin bazlı biyopolimer polipeptid ile etkileşimi artırarak kurşun gibi metallerin %50'ye kadar azaltılmasını mümkün kılar.

Partikül süspansiyonunun ultrasonla korunması filtrasyon sırasında membran tıkanmalarını da azaltır ve filtrasyon verimliliğini artırır.

3.4. Biyoaktif Bileşiklerin Ekstraksiyonu

Sağlıklı yaşam bilincinin artmasıyla birlikte, besinlerde doğal olarak bulunan biyoaktif bileşikler ve bu bileşenleri gıdalardan etkin şekilde elde etmeye yönelik ekstraksiyon teknikleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Gıda endüstrisinde biyoaktif bileşenlerin eldesi; ürünlerin besin değerini artırmak, fonksiyonel gıdalar geliştirmek ve doğal antioksidan, vitamin, uçucu yağ ve polifenol gibi maddeleri geri kazanmak açısından kritik bir süreçtir.

Geleneksel ekstraksiyon yöntemleri (maserasyon, Soxhlet vb.), yüksek sıcaklık ve uzun işlem süresi gerektirmeleri nedeniyle hem enerji hem de solvent tüketimi bakımından dezavantaj oluşturmaktadır. Buna karşın ultrason destekli ekstraksiyon (UDE), daha düşük sıcaklıklarda, daha kısa sürede ve daha az çözücü kullanarak yüksek verim sağlayan modern bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

UDA'nın temel prensibi ultrason dalgalarının sıvı ortamda kavitasyon oluşturarak mikro kabarcıkların meydana gelmesine ve çökmeleri esasına dayanır. Kabarcıkların ani çöküşü; hücre duvarlarının parçalanmasını, çözeltinin hücre içine daha hızlı nüfuz etmesini, kütle transferinin artmasını, biyoaktif bileşiklerin daha kolay salınmasını sağlar.

Düşük frekanslı ultrason (20–100 kHz), daha şiddetli çöken kabarcıklar oluşturduğu için hücre yapısında daha belirgin mekanik etkilere yol açar. Hücre zarında oluşan bu mikro hasarlar, çözücünün erişebileceği yüzey alanını artırır, difüzyonu hızlandırır ve ekstraksiyon verimliliğini önemli ölçüde yükseltir. Bazı durumlarda hücre tamamen parçalanmaz; yalnızca yüzeyde erozyon gelişir ve bu da çözücünün nüfuzunu kolaylaştırır.

Bu süreçte dokular, ultrasonun mekanik etkilerini tolere edemez ve hücre duvarı yapısı bozulur. Böylece çözücü ile temas alanı genişler ve hedef bileşiklerin serbest kalması hızlanır.

UDE, geleneksel yöntemlere kıyasla pek çok üstünlük sunar:

- Daha kısa işlem süresi: Günler sürebilecek işlemler dakikalar içinde tamamlanabilir.
- Daha düşük sıcaklıkta çalışma: Termolabil bileşikler korunur.
- Daha az solvent tüketimi: Çoğunlukla su veya etanol-su karışımları yeterlidir.
- Daha düşük enerji tüketimi: Daha kısa işlem süresinin doğal sonucudur.
- Daha yüksek verim: Hücre duvarı tahribatı nedeniyle katı-sıvı faz temas alanı artar.
- Daha karlı ve sürdürülebilir proses: Çevre dostu solventlerle uyumludur.
- Yağ ekstraksiyonunda stabilite artışı: Küçük lipofilik bileşiklerin tutulması sayesinde yağın oksidasyona direnci artabilir.

Ultrason; bitkisel yağlar, polifenoller, flavonoidler, uçucu yağlar, pigmentler (β -karoten, klorofil, fukoksantin vb.), proteinler ve çeşitli bitkisel ekstraktların eldesinde etkin şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca alglerden polisakkarit (karragenan, aljinat) ve fenolik bileşiklerin elde edilmesinde de başarılı sonuçlar bildirilmiştir.

Ultrason ile ekstraksiyonda en uygun çalışma aralığı 20–50 kHz olarak kabul edilir. 100 kHz üzerinde daha kararlı kabarcıklar oluşur; mekanik etki azalır. 500 kHz üzerinde hücrelerde geri dönüşümlü/geri dönüşümsüz porlar (gözenekler) oluşabilir, bu da içeriğin çözücüye sızmasına yol açar.

UDE, tek başına etkili bir yöntem olmasına rağmen diğer teknolojilerle birleştirildiğinde ekstraksiyon verimi daha da artmaktadır:

- Ultrason + Mikrodalga: Daha yüksek verim, daha hızlı işleme, düşük solvent tüketimi
- Ultrason + Enzimatik ekstraksiyon: Hücre duvarı parçalanması artar, yağ ve polifenol eldesinde önemli kazanç sağlar
- Ultrason + Süperkritik akışkan ekstraksiyonu: Yağ eldesinde çok yüksek verim, daha temiz ve stabil ürün
- Ultrason + Darbeli Elektrik Alanı (PEF): PEF ile birlikte kullanıldığında üzüm suyunda polifenol, antosiyanin, likopen, karotenoid ve flavonoid içeriğinde belirgin artış sağlanmıştır.
- Manosonikasyon (Ultrason + Basınç): Orta dereceli dış basınç (≈ 300 kPa) Kavitasyon etkisini güçlendirir, çözücünün yüzey gerilimini azaltır, hücre içine çözücü difüzyonunu hızlandırır. Bu teknik özellikle karotenoid, polifenol ve polisakkarit ekstraksiyonlarında başarılıdır.

Çalışmalar, ultrasonun üzümlerden polifenollerin ve meyvelerden antioksidan özellikleri nedeniyle gıda ürünlerinde faydalı olan antosiyaninlerin çıkarılmasını artırabileceğini göstermiştir. Son yıllarda, çok çeşitli alglerden, polisakkaritlerden (özellikle karragenan ve aljinat), pigmentlerden (fukoksantin, klorofil, β -karoten, vb.) ve fenolik bileşiklerden farklı biyoaktif bileşenlerin çıkarılması için ultrason kullanılmıştır.

3.5. Kurutma ve Rehidrasyon

Kurutma, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve depolama maliyetlerini azaltmak için en eski yöntemlerden biridir. Ancak

sıcak hava ile kurutmada yüksek enerji tüketimi, ürünün büzüşmesi, renk ve doku bozulması gibi dezavantajlar bulunur. Dondurarak kurutma (freeze-drying) daha kaliteli ürün sağlasa da maliyeti yüksektir. Mikrodalga kurutmada ise ürünün yanma riski vardır. Bu nedenle ultrason, kurutma süreçlerini iyileştirmek için kullanılan yenilikçi bir yardımcı teknolojidir.

Ultrason, kavitasyon ve “sünger etkisi” sayesinde: kütle transferini hızlandırır, hücre içi suyun yüzeye taşınmasını kolaylaştırır, mikrokannalar oluşturarak buharlaşmayı artırır, kurutma süresini kısaltır ve enerji tüketimini azaltır.

Çalışmalar, ultrason destekli kurutmanın süreci %50’ye kadar hızlandırabileceğini göstermektedir. Ayrıca daha düşük sıcaklıkta çalışılabildiğinden pigmentler, vitaminler ve antioksidanlar daha iyi korunur. Örneğin; havuçta ultrason destekli kurutmanın karotenoidler ve renk stabilitesi üzerinde olumlu etkiler sağladığı bildirilmektedir.

Ultrasonun düşük sıcaklıklarda kurutmayı daha fazla hızlandırdığı görülmüştür: 70 °C’de ultrasonun sürede %32, 50 °C’de ultrasonun %62 azalma sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca kırmızı biberin 70 °C sıcak hava kurutması ile 50 °C ultrason destekli kurutma sürelerinin eşdeğer olduğu gösterilmiştir; yani ultrason kurutma sıcaklığını ≈ 20 °C azaltabilir.

Ultrason destekli kurutma büzüşmeyi azaltır, renk ve doku kayıplarını en aza indirir, ve biyoaktif bileşikleri daha iyi korur. Ön işlem olarak uygulanan ultrason; kivi, tatlı patates, yerelması, zeytin, kereviz, çilek ve safran gibi ürünlerde kurutma kinetiğini iyileştirmiştir. da Silva ve ark. (2019) nektarin kurutulması üzerine yaptıkları bir çalışmada vakum ile birlikte birleştirerek uyguladıkları ultrasonun kurutma hızını artırarak işlem süresini %50’den fazla, gerekli enerjiyi ise %42 oranında azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca polifenol kaybı önemli ölçüde önlenmiştir.

Her ne kadar kurutma işleminde ultrasonun temel amacı kurutma kinetiğini geliştirmek olsa da ilave bir katkı olarak enzim inaktivasyonu da sağladığı görülmüştür.

Ultrason yalnızca kurutmada değil, rehidrasyon aşamasında da etkilidir. Ultrason destekli rehidrasyon, su emilimini hızlandırır. Kavitasyon gıda matriksini gevşetir, suyun daha hızlı ve eşit nüfuz etmesini sağlar, sebze, mantar ve baklagillerin daha kısa sürede orijinal dokularına yakın şekilde toparlanmasına yardımcı olur. Bu, özellikle endüstriyel üretimde hazırlık sürelerini azaltır.

3.6. Enzim İnaktivasyonu ve Aktivasyonu

Enzimler, belirli reaksiyonları hızlandıran ve substratın bağlandığı aktif bölgelere sahip proteinlerdir. Proteinlerdeki polipeptit zincirleri peptit ve hidrojen bağlarıyla birbirine bağlıdır. Ultrason uygulandığında oluşan yüksek enerji, serbest radikaller ve basınç değişimleri bu bağları zayıflatarak enzimlerin denatürasyonuna ve biyolojik aktivitelerinin kaybolmasına yol açar. Özellikle geçici kavitasyon sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık, basınç, kesme kuvvetleri ve mikro jetler enzim yapısını bozarak inaktivasyonu hızlandırır.

Ultrason, enzim proteinlerinin yüzey hidrofobisitesini artırarak protein–protein etkileşimlerini güçlendirir; bu durum substrat bağlanma bölgelerinin kapanmasına ve enzim agregasyonlarına neden olur. Enzimlerin yapısal özelliklerine bağlı olarak ultrason, onları tamamen veya kısmen inaktive edebilir.

Meyve ve sebze işlemede enzim inaktivasyonu önemlidir çünkü peroksidaz, polifenol oksidaz ve pektin metilesteraz gibi enzimler renk kararması, viskozite azalması, tat bozulması ve bulanıklığa yol açar. 20–40 kHz aralığında yapılan uygulamalarda bu enzimlerin aktivitesinin azaldığı gösterilmiştir. Örneğin ultrason, meyve sularında pektinleri kısmen

parçalayarak viskoziteyi azaltan poligalakturonaz ve pektin metilesterazı etkisiz hale getirebilir. Enzim inaktivasyonunda sıcaklık, frekans, genlik, süre ve enzimin konformasyonu belirleyicidir. En etkili sonuçlar genellikle 60 °C'nin altındaki sıcaklıklarda elde edilir.

Badem sütünde yapılan bir çalışmada, termosonifikasyonun (600 W, 40 kHz) 45–60 °C'de lipoksijenaz ve peroksidaz aktivitelerini belirgin şekilde azalttığı, ayrıca ürün kalitesini iyileştirdiği bildirilmiştir. Ultrasonun mikrodalga veya kızılötesi gibi diğer teknolojilerle birlikte kullanımı da ısıl dağılımı iyileştirerek daha yüksek enzim ve mikrobiyal inaktivasyon sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte ultrason her zaman enzimleri inaktive etmez. Düşük yoğunluk ve kısa süre uygulandığında kararlı kavitasyon oluşur; bu da daha hafif kesme etkileriyle enzimin yapısında kontrollü bir açılma oluşturarak daha fazla aktif bölgenin ortaya çıkmasını sağlayabilir. Böylece enzim aktivitesi artabilir. Ayrıca hücre parçalanmasıyla serbest kalan substrat miktarının artması da bazı enzimlerin aktivasyonunu teşvik edebilir. Enzimlerin ultrasona yanıtı, moleküler yapıları ve hücre içindeki konumlarıyla ilişkilidir.

3.7. Pastörizasyon

Pastörizasyon, patojen mikroorganizmalarda en az 5 log azalma (%99,999 inaktivasyon) sağlamayı hedefleyen bir gıda güvenliği işlemidir. Endüstride bu amaçla yaygın olarak termal yöntemler (pastörizasyon, UHT, sterilizasyon) kullanılmaktadır. Ancak bu işlemler, besin kayıplarına ve istenmeyen tat değişimlerine yol açabilir. Isıl olmayan, "soğuk pastörizasyon" olarak da adlandırılan yöntemler ise mikrobiyolojik güvenliği sağlarken besin öğelerini ve duyuşal özellikleri daha iyi koruma potansiyeli taşımaktadır.

Son yirmi yılda, termal pastörizasyona alternatif olarak ultrason teknolojisi üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ultrasonik pastörizasyon *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* ve *Staphylococcus aureus* gibi patojenlerin düşük sıcaklıklarda inhibisyonunu sağlayarak, gıdanın lezzet, renk ve besin değerinin korunmasına olanak tanır. Bu çevre dostu proses, özellikle süt ürünleri sektöründe dikkat çekmektedir.

Ultrasonun mikrobiyal inaktivasyondaki temel etkisi akustik kavitasyon olgusuna dayanır. Düşük frekanslı (20-40 kHz), yüksek yoğunluklu ultrason uygulamalarında oluşan mikroskobik kabarcıkların anlık çökmesi (kavitasyon) sonucunda çok yüksek lokal sıcaklık, basınç ve şiddetli kesme kuvvetleri meydana gelir. Bu mekanik kuvvetler, bakteri hücre duvarı ve zarında fiziksel hasara, incelmeye ve yırtılmalara yol açar. Ayrıca, kavitasyon sırasında serbest radikal (örneğin, hidroksil radikali) oluşumu ve sonokimyasal reaksiyonlar da hücresel makromoleküllere (DNA, protein, enzim) zarar vererek antimikrobiyal etkiyi destekler.

Etkinlik; ultrason parametrelerine (frekans, genlik, güç, süre), ortam özelliklerine (vizkozite, pH, bileşim) ve mikroorganizmanın türüne (Gram pozitif/negatif, hücre boyutu/şekli, spor/vegetatif hücre) bağlıdır. Genel olarak, daha kalın hücre duvarına sahip Gram pozitif bakteriler ve sporlar ultrasona karşı daha dirençlidir. Bu nedenle, tek başına ultrason genellikle gıda güvenliği için yeterli inaktivasyonu sağlamada sınırlı kalır ve diğer yöntemlerle kombine edilmesi önerilir.

Ultrasonun hafif ısı ile kombinasyonu olan termosonikasyon, mikrobiyal inaktivasyonda sinerjistik bir etki göstererek proses etkinliğini artırır. Bu kombinasyon, geleneksel pastörizasyonun gerektirdiği sıcaklık veya süreyi düşürürken, ısıya hassas gıdaların duyu ve besinsel kalitesini koruyarak 5

log azalma hedefine ulaşmayı sağlar. Etkili bir inaktivasyon için genellikle en az 55-60°C sıcaklık önerilmektedir.

Ultrason ile pastörizasyon uygulamalarına çeşitli örnekler aşağıda verilmektedir;

Meyve suları: Termal pastörizasyon, meyve sularında renk, aroma ve vitamin kayıplarına neden olabilir. Ultrason destekli işlemler ise hem mikrobiyal yükü (toplam canlı, küf-maya, *E. coli*, *Salmonella*) etkili şekilde azaltmış hem de fenolik içerik, antioksidan kapasite ve duyuşal özellikleri korumuş veya iyileştirmiştir. Örneğin, elma suyunda 60°C'de 35 saniyelik ultrason uygulaması *E. coli* sayısını 5 log₁₀/mL azaltırken, aynı sıcaklıktaki tek başına ısı işlem sadece 0.3 log₁₀ azalma sağlamıştır.

Süt ve süt ürünleri: Sütte ultrason *E. coli* ve *L. monocytogenes* gibi patojenlerin inhibisyonunda etkilidir. Termosonikasyon, gerekli sıcaklığı düşürerek besin değeri ve duyuşal özelliklerin korunmasına katkı sağlar. Badem sütü gibi bitkisel bazlı ürünlerde de termosonikasyonun, kalite parametrelerini iyileştirirken mikrobiyal yükü (toplam canlı, küf-maya) 4-5 log₁₀/mL azalttığı bildirilmiştir.

Sıvı yumurta: Isıyla kolay denatüre olan yumurta proteinlerinin fonksiyonel özellikleri korunurken, ultrasonun *Salmonella* inaktivasyonunda başarılı olduğu gösterilmiştir.

Spor inaktivasyonu: *Bacillus* ve *Clostridium* cinsi bakteri sporları, yapısal komplekslikleri nedeniyle tek başına ultrasona yüksek direnç gösterir (≤ 1 log₁₀ azalma). Ancak ultrasonun ısı (termosonikasyon), basınç (manosonikasyon) veya UV gibi diğer teknolojilerle kombinasyonu, spor inaktivasyonunda sinerjistik etki yaratarak önemli başarılar (4-5 log₁₀ azalma) sağlayabilmektedir.

Ultrason destekli pastörizasyon, özellikle termosonikasyon gibi kombine prosesler şeklinde uygulandığında, mikrobiyal güvenliği sağlarken gıdaların besinsel ve duysal niteliklerini koruyan umut verici bir ısıl olmayan teknolojidir. Endüstriyel ölçekli, sürekli sistemlerin mevcudiyeti, bu yöntemin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Bununla birlikte, proses optimizasyonunun (frekans, sıcaklık, süre) ürün ve hedef mikroorganizmaya özgü olarak yapılması ve spor inaktivasyonu gibi zorlu alanlarda kombinasyon proseslerine olan ihtiyaç devam etmektedir.

3.8. Fermantasyon

Ultrasonun canlı hücreler üzerindeki letal etkisi uzun süredir bilinmekle birlikte, düşük enerji seviyelerinde mikroorganizmaların aktivite ve metabolizmalarını uyarma potansiyeli son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Fermente gıda üretim süreçlerini hızlandırma arayışı, ultrasonun bu uyarıcı (sonostimülasyon) etkisini endüstriyel açıdan cazip kılmaktadır.

Uygun parametrelerle (düşük yoğunluk/kısa süre) uygulandığında, ultrasonun neden olduğu akustik kavitasyon, mikrobiyal hücre zarlarında geçici ve onarılabilir mikro hasarlar oluşturur. Sonoporasyon olarak adlandırılan bu olgu, hücre zarı geçirgenliğini kontrollü bir şekilde artırarak kütle transferini iyileştirir. Bu durum, fermantasyon verimliliğini dört temel mekanizma ile artırabilir:

- 1- **Biyokütle Artışı:** Hücre kümelerinin dağılması, besin ve oksijene erişimi kolaylaştırarak mikrobiyal büyümeyi ve metabolit üretimini teşvik eder.
- 2- **Metabolik Aktivitenin Hızlanması:** Artan zar geçirgenliği, besin alımını ve atık ürünlerin uzaklaştırılmasını hızlandırır. Ayrıca, hücre dışı enzim

salınımını (örn., β -galaktozidaz) artırarak substrat hidrolizini ve reaksiyon hızını yükseltebilir.

- 3- Ortam Koşullarının İyileştirilmesi: Ultrason, ortamdaki gaz-sıvı transfer alanını genişleterek (köpük oluşumu yoluyla) özellikle oksijenin çözünürlüğünü ve transfer hızını artırır.
- 4- Hücresel Fonksiyonların Modülasyonu: Hücre içi sinyal iletimini ve enzimatik aktiviteleri etkileyerek çoğalma hızını artırabilir.

Ultrason, yoğurt ve peynir gibi ürünlerin üretim süreçlerini optimize etmede etkilidir. Yoğurt üretiminde, laktik asit bakterilerinin (LAB) aktivitesini artırarak fermentasyon süresini %12-16 oranında kısaltır, asit oluşumunu hızlandırır ve probiyotik canlılığı destekler. Aynı zamanda ürünün reolojik özelliklerini (viskozite, su tutma kapasitesi) iyileştirir. Peynir üretiminde ise sütün pıhtılaşma özelliklerini geliştirerek lor verimini ve jel sertliğini artırır, pıhtılaşma süresini azaltır. Olgunlaşma aşamasında, enzimatik reaksiyonları hızlandırarak peynirin olgunlaşma süresini önemli ölçüde (örneğin, 60 günden 45 güne) düşürebilir ve lezzet profili ile tekstürü olumlu yönde etkiler.

Şarap ve bira üretiminde ultrason, maya metabolizmasını uyararak fermentasyon sürelerinde %50-64'e varan kısaltmaya neden olabilir. *Saccharomyces cerevisiae* biyokütlesini ve etanol üretim verimini artırır. Ayrıca, şarapta istenmeyen mikroorganizmaları (örneğin, *Brettanomyces*) inhibe ederken, kontrollü maya lizisi yoluyla aroma ve yapıyı zenginleştiren bileşiklerin (mannoproteinler) salınımını sağlar. Bu özellikleriyle koruyucu kullanımını (SO_2) azaltma potansiyeli taşır.

Ultrason, probiyotik bakterilerin (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium* vb.) büyüme hızını, canlılığını ve stres direncini (asit toleransı gibi) artırabilir. Bu da fermente ürünlerde daha

yüksek probiyotik sayısı ve gelişmiş fonksiyonel özellikler (artan peptit, gamma-aminobutyric acid, organik asit üretimi) sağlar. Mikrobiyal primer ve sekonder metabolit üretimini (enzimler, antibiyotikler, pigmentler) optimize etmek için bir proses iyileştirme aracı olarak da kullanılmaktadır. Örneğin, *Bacillus sphaericus* tarafından üretilen bir fibrinolitik enzimin verimi ultrason uygulaması ile yaklaşık 1.5 kat artırılabilmiştir.

Ultrasonun fermantasyondaki uyarıcı etkisi, uygulama parametrelerine (frekans, güç, süre, genlik) ve mikroorganizma türüne son derece bağlıdır. Optimumun üzerindeki yoğunluk veya süre, inhibisyon veya hücre ölümüne yol açabilir. Örneğin, bazı probiyotik suşlar (örn., *L. acidophilus*) ultrasona karşı daha hassas olabilir ve canlı hücre sayısını kritik seviyelerin altına düşürebilir. Ayrıca, farklı mikroorganizmaların (örn., mayalar ve laktik asit bakterileri) ultrason direnci yapısal farklılıklarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Kontrollü ultrason uygulaması, fermantasyon proseslerinde verimliliği, hızı ve ürün kalitesini artıran güçlü bir fiziksel yardımcı teknolojidir. Süreç optimizasyonu ve enerji tüketimi açısından daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulsa da, özellikle kombine proseslerle (hafif ısı, basınç gibi) birlikte kullanıldığında, geleneksel fermente gıda üretiminde yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

3.9. Mikotoksin Dekontaminasyonu

Mikotoksinler, insan ve hayvan sağlığı için ciddi risk oluşturan toksik sekonder fungal metabolitlerdir. Özellikle aflatoksin B1 (AFB1), potasyum siyanür ve arsenikten daha yüksek toksisiteye sahiptir. Geleneksel dekontaminasyon yöntemleri (kimyasal işlemler) genellikle kalıntı sorunları veya besin kaybına neden olur. Bu nedenle, ultrason gibi fiziksel "yeşil teknolojiler" alternatif olarak araştırılmaktadır.

Ultrasonun parçalayıcı etkisi, kavitasyon yoluyla mikotoksinlerin kimyasal yapısını bozabilir. Örneğin, mısırdaki AFB1 ve Zearalenone seviyelerini sırasıyla %21 ve %35'e varan oranlarda azalttığı bildirilmiştir. Ancak, bu işlemin aynı zamanda esansiyel amino asit ve yağ asidi içeriğinde azalmaya yol açarak ürün kalitesini olumsuz etkileyebileceği de gözlemlenmiştir. Bu nedenle, toksin degradasyonu ile besin koruması arasında optimal bir denge kurulması gerekmektedir.

4. SINIRLAMALAR VE DEZAVANTAJLAR

Ultrason teknolojisinin gıda endüstrisinde yaygın uygulanmasını sınırlayan teknik ve ekonomik zorluklar mevcuttur. Bunlar;

- Standardizasyon eksikliği: Gıdalarda ultrason uygulamaları üzerine yapılan çalışmaların koşulları (yoğunluk, uygulama süresi, titreşimlerin uygulanma şekli ve problemlerin çeşitliliği, vb.) birbirinden farklılık göstermektedir. Tasarlanan çalışmalardaki standardizasyon eksikliği, birbirinden farklı ve net olmayan parametreler, numune miktarlarındaki büyük ölçüde değişikliklerin karşılaştırmaları mümkün kılmadığı ifade edilmiştir. Örneğin; prob ucu ile çalışılan örnek arasındaki mesafe arttıkça, ultrason alanında azalma meydana gelmektedir, bu sebeple bu mesafe de dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür. Araştırmalarda uygulanan akustik enerji diğer parametrelerden hesaplanmaktadır, bunun da farklı çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını zorlaştırdığı belirtilmektedir.
- Kurulum maliyetinin yüksek olması: Yüksek yoğunluklu ultrason ekipmanlarının ilk yatırım maliyeti yüksektir. Bu

durum küçük veya orta ölçekli gıda işleyicileri için uygulanabilirliğini sınırlayabilir.

- Ölçeklenebilirlik Sorunları: Ultrason laboratuvar ve pilot ölçeklerde umut vadetse de, büyük ölçekli üretim için ölçeklendirme uygulanmamış durumda ve bu iş karmaşık olabileceğinden endişe edilmektedir. Örneğin; dakikada 20.000 L süt işleyen bir tesiste pratik olmayabilir. Henüz süt endüstrisinde pratik uygulaması bulunmamaktadır.
- Sporlar üzerindeki etkisi: Ultrason, tek başına uygulandığında ısıya dayanıklı bakteri sporları üzerinde etkili değildir ve hatta spor çimlenmesini tetikleyebilir.
- İşlem sırasında oluşan serbest radikaller ve mekanik kuvvetler, lipid oksidasyonu, protein denatürasyonu veya istenmeyen duyuşal değişimlere (tat, koku, renk) yol açabilir. Özellikle uzun işlem süreleri veya yüksek yoğunluklar bu riski artırır. Etkili mikotoksin degradasyonu için gereken yoğun işlemler, hassas besin öğelerinin (vitaminler, antioksidanlar) bozunmasına neden olabilir.
- Gıda güvenliğini sağlamakta yetersiz kalabilir. Ultrason teknolojisi tek başına uyguladığında, etkili bir mikrobiyal inaktivasyon elde etmek için geleneksel termal işlemlere göre daha yüksek güç ve daha uzun işlem süreleri uygulamak gerekmektedir.

Ultrason, mikotoksin dekontaminasyonu ve diğer gıda işleme uygulamaları için umut verici bir teknoloji olmakla birlikte, önünde önemli engeller bulunmaktadır. Bu teknolojinin güvenilir ve ekonomik bir endüstriyel çözüm haline gelebilmesi için; proses parametrelerinin standardizasyonu, ölçek büyütme mühendisliğine yönelik AR-GE çalışmalarının yoğunlaştırılması, ekipman maliyetlerinin düşürülmesi ve işlem-kalite ilişkisinin

daha iyi optimize edilerek istenmeyen yan etkilerin minimize edilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ

Ultrason teknolojisi, gıda endüstrisinde ekstraksiyon, pastörizasyon, kurutma, homojenizasyon ve kalite kontrol gibi çok çeşitli işlemlerde yenilikçi bir yöntem olarak hızla benimsenmektedir. İşlem sürelerini kısaltması, enerji verimliliği sağlaması ve kimyasal katkı ihtiyacını azaltma potansiyeli ile sürdürülebilir ve çevre dostu bir işleme alternatifi sunmaktadır. Bu teknolojinin en önemli avantajlarından biri, diğer geleneksel ve yenilikçi yöntemlerle (hafif ısı, basınç, UV vb.) sinerjistik etkileşime girerek proses etkinliğini artırabilmesidir.

Kurulum maliyetinin görece yüksek olması, gıda güvenliğini sağlamada soru işaretlerinin bulunması, büyük ölçeklerde uygulama sıkıntıları gibi mevcut dezavantajlarının üstesinden geldiği takdirde, ultrason sürdürülebilir ve verimli gıda üretimine yönelik artan talebi karşılamaya aday güçlü bir teknolojidir.

Ancak, ultrasonun gıda endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmasından önce gıdaların üzerindeki fizikokimyasal etkileri üzerine daha kapsamlı çalışmalar yapılmalı aynı zamanda gıda güvenliği ile ilgili sorular aydınlatılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abesinghe, A.M.N.L., Vidanarachchi, J.K., Islam, N., Karim, M.A. (2022). Effects of ultrasound on the fermentation profile and metabolic activity of lactic acid bacteria in buffalo's (*Bubalus bubalis*) milk, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 79. doi:10.1016/j.ifset.2022.103048.
- Abrahamsen, R.K., Narvhus, J.A. (2022) Can ultrasound treatment replace conventional high temperature short time pasteurization of milk? A critical review. *International Dairy Journal*, 131. doi:10.1016/j.idairyj.2022.105375.
- Ahmed H. A. A., Khalil R. A. M., AbouElNour A. M., El-Sisi A. S., Aida H. I. (2023). Ultrasonication of *Lactobacilli* cultures on Edam cheese quality during ripening. *Journal of Food and Nutrition Research*, 11 (7), 474-482. doi:10.12691/jfnr-11-7-3.
- Avhad, D. N., & Rathod, V. K. (2015). Ultrasound assisted production of a fibrinolytic enzyme in a bioreactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 257–264. doi:10.1016/j.ultsonch.2014.04.020.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410–427. doi:10.1016/j.foodres.2012.05.004.
- Baboli, Z. M., Williams, L., & Chen, G. (2020). Rapid pasteurization of apple juice using a new ultrasonic reactor. *Foods*, 9(6), 801. doi:10.3390/foods9060801.
- Barukčić, I., Lisak Jakopović, K., Herceg, Z., Karlović, S., & Božanić, R. (2015). Influence of high intensity ultrasound

on microbial reduction, physico-chemical characteristics and fermentation of sweet whey. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 27, 94–101. doi:10.1016/j.ifset.2014.10.013.

Behzadnia, A., Moosavi-Nasab, M., Ojha, S., & Tiwari, B. K. (2020). Exploitation of ultrasound technique for enhancement of microbial metabolites production. *Molecules*, 25(22), 5473. doi:10.3390/molecules25225473.

Beitia, E., Gkogka, E., Chanos, P., Hertel, C., Heinz, V., Valdramidis, V., & Aganovic, K. (2023). Microbial decontamination assisted by ultrasound-based processing technologies in food and model systems: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 2802-2849. doi:10.1111/1541-4337.13163.

Bermudez-Aguirre, D., & Niemira, B. A. (2022). Pasteurization of foods with ultrasound: The present and the future. *Applied Sciences*, 12(20), 10416. doi:10.3390/app122010416.

Bernardo, Y.A.d.A., do Rosario, D. K. A., Conte-Junior, C. A. (2023). Principles, application, and gaps of high-intensity ultrasound and high-pressure processing to improve meat texture. *Foods*, 12, 476. doi:10.3390/foods12030476.

Carreira-Casais, A., Otero, P., Garcia-Perez, P., Garcia-Oliveira, P., Pereira, A. G., Carpena, et al.,. (2021). Benefits and drawbacks of ultrasound-assisted extraction for the recovery of bioactive compounds from marine algae. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9153. doi:10.3390/ijerph18179153.

- Carrillo-Lopez, L. M, Garcia-Galicia, I. A., Tirado-Gallegos, J. M., Sanchez-Vega, R., Huerta-Jimenez, M., Ashokkumar, M., Alarcon-Rojo, A. D. (2021). Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73(1751), 10546. doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105467.
- Coelho Pacheco, F., de Fátima Teixeira, E., Coelho Pacheco, A. F., Paiva, P. H. C, Tribst, A. A. L., de Castro Leite Júnior, B. R. (2023). Impact of ultrasound-assisted fermentation on buffalo yogurt production: Effect on fermentation kinetic and on physicochemical, rheological, and structural characteristics. *Applied Food Research*, 3(2). doi:10.1016/j.afres.2023.100338.
- da Silva, E.S., Brandão, S. C. R., da Silva, A. L., da Silva, J. H. F., Coelho, A. C. D., & Azoubel, P. M. (2018). Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. *Journal of Food Engineering*. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.11.01
- Dağbaşı, S. (2024) Ultrases işleminin enzim aktivasyonu üzerine etkileri. *Akademik Gıda*, 22(2) 158-166. doi:10.24323/akademik-gida.1543682
- Dahroud, B. D., Mokarram, R. R., Khiabani, M. S., Hamishehkar, H., Bialvaei, A. Z., Yousefi, M., & Kafil, H. S. (2016). Low intensity ultrasound increases the fermentation efficiency of *Lactobacillus casei* subsp. *casei* ATTC 39392. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 462–467. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.01.10
- Dai, C.-H., Xiong, F., He, R.-H., Zhang, W.-W., Ma, H.-L.(2017). Effects of low-intensity ultrasound on the growth, cell membrane permeability and ethanol tolerance

- of *Saccharomyces cerevisiae*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 191-197. doi:10.1016/j.ultsonch.2016.11.03
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Xanthakis, E., Le-Bail. A. (2017). Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. *Journal of Food Engineering*, 195. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.10.001
- Delgado, K., Vieira, C., Dammak, I., Frasão, B., Brígida, A., Costa, M., & Conte-Junior, C. (2020). Different ultrasound exposure times influence the physicochemical and microbial quality properties in probiotic goat milk yogurt. *Molecules*, 25(20), 4638. doi:10.3390/molecules25204638
- Dong, Y., Zhang H., Mei, J. , Xie, J., Shao, C.. (2022). Advances in application of ultrasound in meat tenderization: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. doi:10.3389/fsufs.2022.969503
- Ektik, N. ve Tavşanlı, H. (2021) Yoğurt üretiminin farklı aşamalarında ultrason uygulamasının yoğurtların mikrobiyolojik ve bazı fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisinin değerlendirilmesi. *Izmir Democracy University Health Sciences Journal* 4(1): 94-104. doi:10.52538/iduhes.929936
- Evelyn, & Silva, F. V. M. (2020). Ultrasound assisted thermal inactivation of spores in foods: Pathogenic and spoilage bacteria, molds and yeasts. *Trends in Food Science & Technology*. doi:10.1016/j.tifs.2020.09.020
- Firouz, M. S., Farahmandi, A., & Hosseinpour, S. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices

- and dairy products industries: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.05.014
- Guimarães, J. T., Scudino, H., Ramos, G. L., Oliveira, G. A., Margalho, L. P., Costa, L. E., ... Cruz, A. G. (2021). Current applications of high-intensity ultrasound with microbial inactivation or stimulation purposes in dairy products. *Current Opinion in Food Science*. doi:10.1016/j.cofs.2021.06.004
- Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Scudino, H., Pimentel, T. C., Esmerino, E. A., Ashokkumar, et al. (2019). High-intensity ultrasound: A novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57, 12–21. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.05.004
- Hernandez-Hernandez, O., Ferreira-Lazarte, A., Tiwari, B., Villamiel, M. (2024) Update of high-intensity ultrasound applications for the extraction of pectin from agri-food by-products, TrAC. *Trends in Analytical Chemistry*, 175. doi:10.1016/j.trac.2024.117728
- Hu, W., Chen, S., Wu, D., Zhu, K., & Ye, X. (2021). Manosonication assisted extraction and characterization of pectin from different citrus peel wastes. *Food Hydrocolloids*, 121, 106952. doi:10.1016/j.foodhyd.2021.106952
- Huang, G., Chen, S., Tang, Y., Dai, C., Sun, L., Ma, H., He, R. (2019) Stimulation of low intensity ultrasound on fermentation of skim milk medium for yield of yoghurt peptides by *Lactobacillus paracasei*, *Ultrasonics Sonochemistry*, 51. doi:10.1016/j.ultsonch.2018.09.033.
- Kroehnke, J., Szadzińska, J., Stasiak, M., Radziejewska-Kubzdela, E., Biegańska-Marecik, R., & Musielak, G.

- (2018). Ultrasound- and microwave-assisted convective drying of carrots – Process kinetics and product's quality analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 249–258. doi:10.1016/j.ultsonch.2018.05.040
- Li, Y., & Xiang, D. (2019). Stability of oil-in-water emulsions performed by ultrasound power or high-pressure homogenization. *Plos One*, 14(3), e0213189. doi:10.1371/journal.pone.0213189
- Lim, S.Y., Benner, L.C., & Clark, S. (2019) Neither thermosonication nor cold sonication is better than pasteurization for milk shelf life. *Journal of Dairy Science*, 102, Issue 5, Pages 3965-3977, doi:10.3168/jds.2018-15347.
- Liu, Y., Liu, Y., Zhao, W., Li, M., Liu, N., & Bian, K. (2022). Reduction of aflatoxin B1 and zearalenone contents in corn using power ultrasound and its effects on corn quality. *Toxins*, 14(12), 834. doi:10.3390/toxins14120834
- Manzoor, M. F., Siddique, R., Hussain, A., Ahmad, N., Rehman, A., Siddeeg, A., ... Yahya, M. A. (2021). Thermosonication effect on bioactive compounds, enzymes activity, particle size, microbial load, and sensory properties of almond (*Prunus dulcis*) milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105705. doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105705
- Mehenktaş, C. (2022). Süt İşlemede Ultrason Kullanımı. *Akademik Gıda*, 20(4), 474-481. doi:10.24323/akademik-gida.1224848
- Moosavi, M., H., Mousavi Khaneghah, A., Javanmardi, F., Hadidi, M., Hadian, Z., Jafarzadeh, S., et al. (2021). A review of recent advances in the decontamination of mycotoxin and inactivation of fungi by ultrasound,

Ultrasonics Sonochemistry, 79,
doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105755.

- Mudgil, P., Alkaabi, A., Maqsood, S. (2022). Ultrasonication as a novel processing alternative to pasteurization for camel milk: Effects on microbial load, protein profile, and bioactive properties. *Journal of Dairy Science*, 105, Issue 8, Pages 6548-6562, doi:10.3168/jds.2021-20979.
- Muñoz, R., Viveros, N., Bevilacqua, A., Pérez, M.S., Arévalo-Villena, M. (2021). Effects of ultrasound treatments on wine microorganisms. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79. doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105775.
- Onyeaka, H., Miri, T., Hart, A., Anumudu, C., & Nwabor, O. F. (2021). Application of ultrasound technology in food processing with emphasis on bacterial spores. *Food Reviews International*, 39(7), 3663–3675. doi:10.1080/87559129.2021.2013255
- Pandiselvam, R., Aydar, A.Y., Kutlu, N., Aslam, R., Sahni, P., Mitharwal, S., Gavahian, M., Kumar, M., Raposo, A., Yoo, S., Han, H., Kothakota, A. (2023). Individual and interactive effect of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and biochemical qualities of food: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 92. doi:10.1016/j.ultsonch.2022.106261
- Perrin, L., Desobry-Banon, S., Gillet, G., & Desobry, S. (2022). Review of high-frequency ultrasounds emulsification methods and oil/water interfacial organization in absence of any kind of stabilizer. *Foods*, 11(15), 2194. doi:10.3390/foods11152194
- Priya, & Gogate, P. R. (2021). Ultrasound-assisted intensification of activity of free and immobilized enzymes: A Review.

Industrial & Engineering Chemistry Research, 60(27), 9650–9668. doi:10.1021/acs.iecr.1c01217

Rathnakumar, K., Jain, S., Awasti, N., Vashisht, P., Thorakkattu, P., Ramesh, B., Balakrishnan, G., Babu, K.S., Ramniwas, S., Rustagi, S., Pandiselvam, R. (2024). Ultrasonic processing: effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(8), 1638–1652. doi:10.1080/07388551.2024.2332941

Qi, Y., Hu, X., Chen, Y., Lv, R., Ding, T. (2024) Inactivation effect and mechanism of ultrasound combined with ultraviolet treatment on *Bacillus cereus* spores. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18. doi:10.1016/j.jafr.2024.101382.

Qiu, L., Zhang, M., Chitrakar, B., & Bhandari, B. (2020). Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105230. doi:10.1016/j.ultsonch.2020.105230

Shen, Y., Zhu, D., Xi, P., Cai, T., Cao, X., Liu, H., & Li, J. (2021). Effects of temperature-controlled ultrasound treatment on sensory properties, physical characteristics and antioxidant activity of cloudy apple juice. *LWT-Food Science and Technology*, 142, 111030. doi:10.1016/j.lwt.2021.111030

Shokri, S., Terefe, N. S., Shekarfroush, S. S., & Hosseinzadeh, S. (2021). Ultrasound-assisted fermentation for enhancing metabolic and probiotic activities of *Lactobacillus brevis*. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 166, 108470. doi:10.1016/j.cep.2021.108470

- Silva, M., Kadam, M. R., Munasinghe, D., Shanmugam, A., & Chandrapala, J. (2022). Encapsulation of nutraceuticals in yoghurt and beverage products using the ultrasound and high-pressure processing technologies. *Foods*, 11(19), 2999. doi:10.3390/foods11192999
- Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323-331. doi:10.1016/j.tifs.2010.04.003
- Starek, A., Kobus, Z., Sagan, A. Chudzik, B., Pawlat, J., Kwiatkowski, et al. (2021). Influence of ultrasound on selected microorganisms, chemical and structural changes in fresh tomato juice. *Scientific Reports*, 11, 3488. doi:10.1038/s41598-021-83073-8
- Su, H., Xie, Y., Cheng, X., Yang, Z., Mao, J., Yang, H., Xu, X., Pan, S., Hu, H. (2024). The effect of dual-frequency ultrasound on synergistic sonochemical oxidation to degrade aflatoxin B1. *Food Chemistry*, 457. doi:10.1016/j.foodchem.2024.139708.
- Taşkıran, Z. G., Dündar, A., Yıldız, H. (2023). Bitkisel materyallerdeki biyoaktif bileşenlerin ekstraksiyonunda kullanılan konvansiyonel ve yeni nesil ekstraksiyon yöntemleri. *Food Science and Engineering Research*, 2(2), 50-58.
- Techathuvanan, C., & D'Souza, D. H. (2018). High intensity ultrasound for *salmonella* enteritidis inactivation in culture and liquid whole eggs. *Journal of Food Science*, 83(6), 1733–1739. doi:10.1111/1750-3841.14185.
- Thilakarathna, R.C.N., Siow, L.F., Tang, TK. (2023). A review on application of ultrasound and ultrasound assisted technology for seed oil extraction. *Journal of Food*

- Science and Technology*, 60, 1222–1236.
doi:10.1007/s13197-022-05359-7
- Ünver, A. (2016). Applications of ultrasound in food processing. *Green Chemistry & Technology Letters*, 2(3), 121-126.
doi: 10.18510/gctl.2016.231
- Vilkhu, K., Mawson, R., Simons, L., & Bates, D. (2008). Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry — A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 161–169.
doi:10.1016/j.ifset.2007.04.014
- Xu, B., Azam, S. M. R., Feng, M., Wu, B., Yan, W., Zhou, C., Ma, H. (2021). Application of multi-frequency power ultrasound in selected food processing using large-scale reactors: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 81.
doi:10.1016/j.ultsonch.2021.105855.
- Yu, Z., Su, Y., Zhang, Y., Zhu, P., Mei, Z., Zhou, X., & Yu, H. (2021). Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: A review. *Food Chemistry*, 357, 129805.
doi:10.1016/j.foodchem.2021.129805
- Zhang, Q., Zheng, H., Lin, J., Nie, G., Fan, X., García-Martín, J.M. (2023). The state-of-the-art research of the application of ultrasound to winemaking: A critical review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95.
doi:10.1016/j.ultsonch.2023.106384.
- Zhang, Y., & Abatzoglou, N. (2019). Review: fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying. *Chemical Engineering Research and Design*.
doi:10.1016/j.cherd.2019.11.025
- Zhang, Z., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Cheng, L. (2015). Enhancement of crystallization processes by power

ultrasound: current state-of-the-art and research advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 303–316. doi:10.1111/1541-4337.12132

Zhou, L., Zhang, J., Xing, L., & Zhang, W. (2021). Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 493–512. doi:10.1016/j.tifs.2021.02.008

Zhou, W., Sarpong, F., Zhou, C. (2022) Use of ultrasonic cleaning technology in the whole process of fruit and vegetable processing. *Foods*. 11, 2874. doi:10.3390/foods11182874

SERT VE YARI SERT PEYNİRLERDE GEÇ ŞİŞME KUSURU: CLOSTRIDIUM SPORLARININ ROLÜ, SİLAJ KAYNAKLI RİSKLER VE KORUYUCU STRATEJİLER

Ezgi TEGÜN¹

Tevhide Elif GÜNER²

Rahim AYDIN³

1. GİRİŞ

Silaj, yeşil yem materyalinin oksijensiz koşullarda kontrollü fermentasyona bırakılmasıyla elde edilen temel bir kaba yem kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Özellikle kaba yem arzının yetersiz olduğu dönemlerde hayvan besleme uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak silaj üretimi sırasında fermentasyon koşullarının optimal şekilde sağlanmaması durumunda, biyokimyasal süreçlerin istenen yönde ilerlemediği ve bunun sonucunda silajın besin değeri ile mikrobiyolojik kalitesinde önemli bozulmaların meydana geldiği bilinmektedir. Kalitesi bozulmuş silajların hayvanlara verilmesi, hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturmakta ve hayvansal ürünlerin kalitesini düşürmektedir (Ávila ve Carvalho, 2020). Bu olumsuz etkilerden biri de *Clostridium* cinsine ait bakterilerin neden olduğu ve özellikle Gouda, Emmental,

¹ Doktora Öğrencisi, Balıkesir Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Zootečni ve Hayvan Besleme, ORCID: 0000-0002-7744 8140.

² Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0002-8706-1417.

³ Prof. Dr., Balıkesir Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Zootečni ve Hayvan Besleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-9433-1366.

Gravyer ve Parmesan gibi sert ve yarı sert peynirlerde karşılaşılan “geç şişme” kusurudur (Driehuis ve ark., 2016).

Geç şişme kusurunun birincil etkeni olarak *Clostridium tyrobutyricum* sporları kabul edilmekte olup *C. sporogenes*, *C. beijerinckii* ve *C. butyricum* gibi diğer *Clostridium* türlerinin de peynirde gaz üretimine önemli katkı sağladığı ifade edilmektedir (Martinez-Cuesta ve ark., 2010; Abeni ve ark., 2021). *Clostridium* cinsine ait sporlar peynir üretim sürecinde yüksek dirençleri sayesinde canlılığını sürdürebilmekte ve peynirin olgunlaşması aşamasında laktatı metabolize eden vejetatif forma dönüşebilmektedir. Bu süreç sonucunda oluşan başlıca fermentasyon ürünleri olan bütirik asit, CO₂ ve H₂ gazları, peynirlerde “geç şişme” olarak tanımlanan kusurun ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Ertürkmen ve Öner, 2023). Bu durum ise peynirde yapısal deformasyonlara ve istenmeyen aroma ile tat oluşumuna sebep olarak ürün kalitesinde önemli kayıplara neden olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Peynirde *Clostridium* spp. kaynaklı geç şişme (Le Bourhis ve ark., 2007).

Peynirde geç şişme kusurunun önlenmesine yönelik olarak, çiğ sütte bulunan *Clostridium* spp. sporlarının konsantrasyonunun azaltılması ve üretim sürecinde spor çimlenmesi ile vejetatif hücre gelişiminin engellenmesi amacıyla çeşitli teknolojik yaklaşımların uygulandığı bilinmektedir. Önceki araştırmalarda baktofugasyon ve mikrofiltrasyon gibi

fiziksel ayırma yöntemlerinin yanı sıra, sporların metabolik aktivitelerini inhibe eden nitrat ve lizozim gibi antimikrobiyal katkı maddelerinin kullanımının yaygın biçimde tercih edildiği bildirilmiştir (Martinez-Cuesta ve ark., 2010). Bununla birlikte, son yıllarda geç şişme kusurunun yalnızca süt işleme aşamasında değil, kontaminasyonun kaynağı olan silaj üretim sürecinde de kontrol altına alınmasının gerekliliği vurgulanmaktadır. Bu bölümde, söz konusu kusurun önlenmesine katkı sağlayabilecek silaj üretim stratejileri ve silaj katkı maddelerinin rolü ele alınmaktadır.

2. SİLAJIN *CLOSTRIDIUM* SPP. İLE KONTAMİNASYONU

Clostridium spp., Gram pozitif, obligat anaerob, spor oluşturabilen ve fermentasyon sonucu yüksek miktarda bütirik asit üreten bakterilerdir (Lee ve ark., 2016). Her ne kadar bu bakteriler anaerobik koşullarda gelişebilse de bazı *Clostridium* türlerinin aerobik koşullar altında da gelişebildiği ifade edilmektedir (Jia ve ark., 2021; Leja ve ark., 2014; Camerini ve ark., 2019). Enerji kaynağı olarak karbonhidrat ve protein gibi organik fermentasyon substratlarını kullanan bu bakteriler, silajda bulunan bu bileşenleri parçalayarak bütirik asit, amonyak ve biyojenik aminler gibi bozulma ürünlerinin oluşumuna neden olurlar (Driehuis ve Elferink, 2000).

Clostridium türlerinin silaj ortamındaki aktivitesi, yem bitkisinin kuru madde içeriği, suda çözünabilir karbonhidrat miktarı, su aktivitesi, tampon kapasitesi, pH ve silo içi sıcaklık gibi faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Optimal gelişim sıcaklıkları genellikle 37°C olan *Clostridium* türlerinin gelişimi için önemli faktörlerden bir diğeri ise silajın pH seviyesidir. pH'nın 5 ve üzerinde olduğu silo ortamlarında bu bakteriler hızla çoğalır ve silaj materyalinin fermentasyon kalitesini olumsuz

etkiler. Tipik olarak *Clostridium* spp. ile kontamine olmuş silaj; yüksek pH, yüksek bütirik asit, amonyak ve amin içeriğiyle karakterizedir (Basmacıoğlu ve Ergül, 2002; Driehuis ve Elferink, 2000).

Silaj fermentasyonu sırasında uygun pH seviyesinin hızlı şekilde sağlanması, silo içerisinde istenmeyen *Clostridium* türlerinin gelişimini baskılamak, baskın hale gelmesi arzulanan laktik asit bakterilerinin çoğalmasını teşvik etmektedir (Basmacıoğlu ve Ergül, 2002). Bunun yanında silajın su aktivitesi ve nitrat içeriği de *Clostridium* türlerinin gelişimini etkileyen önemli parametrelerdir. Silaj ortamında bulunan nitrat, *Clostridium* türlerini inhibe eden nitrit ve nitrik oksit gibi bileşiklere indirgenmekte böylece istenmeyen fermentasyonların önüne geçilmektedir (Driehuis ve Elferink, 2000).

Clostridial fermentasyonun en temel göstergesinin silaj materyalindeki bütirik asit üretimindeki artış olduğu belirtilmektedir. Normal koşullarda, iyi fermente edilmiş silajlarda toplam organik asitlerin yaklaşık yüzde 65 ila 70'inin laktik asitten oluştuğu bilinmektedir. Buna karşılık, clostridial aktivitenin gerçekleştiği bozulmuş silajlarda bütirik asit oranının kuru madde temelinde yüzde 0.5'in üzerine çıkabildiği ifade edilmektedir. Bu durum, laktik asit bakterilerinin fermentatif etkinliğinin azaldığını ve sürecin istenmeyen şekilde *Clostridium* türlerinin yönlendirdiği bir fermentasyona dönüştüğünü göstermektedir. Ayrıca clostridial fermentasyon sırasında proteinlerin amino asitlere ve amonyak azotuna dönüştürülme hızının arttığı bilinmektedir. Bu nedenle, toplam azotun yüzde 12 ila 15'ini aşan $\text{NH}_3\text{-N}$ düzeyleri bozulmuş fermentasyonun bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, pH değerinin yeterince hızlı düşmediği ve genellikle 5.0 ila 5.5 aralığında kaldığı görülmektedir; bu değerlerin kaliteli silajlarda beklenen 4.0'ın altındaki pH değerinden oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda laktik asit ile asetik asit oranının

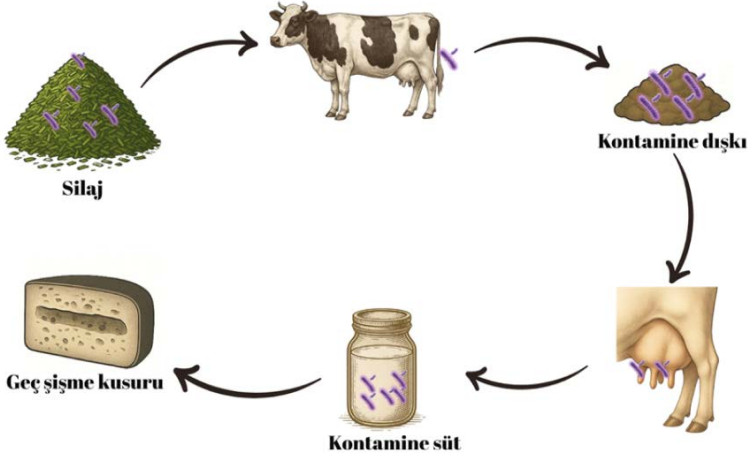
azaldığı, laktik asit miktarı gerilerken butirik asit ve amonyak azotu düzeylerinin yükseldiği ifade edilmektedir. Sonuç olarak, clostridial fermentasyonun besin maddelerinde bozulmaya, kuru madde kaybına ve enerji değerinde azalmaya yol açtığı bildirilmiştir (Kung et al., 2018; Zheng et al., 2024).

Silaj yoluyla alınan *Clostridium* sporları, ineklerin sindirim sisteminde canlılığını sürdürebilmekte ve dışkı yoluyla çevreye yayılmaktadır (Driehuis ve ark., 2016). *Clostridium* türlerinin silajda aşırı çoğalması yalnızca fermentasyon kalitesini değil, aynı zamanda hayvan sağlığını da olumsuz etkilemektedir. Bütirik fermentasyon sonucu oluşan amonyak, aminler ve organik asitler yem tüketimini azaltarak iştahsızlık, süt veriminde düşüş ve metabolik dengesizliklere neden olabilir (Ávila ve Carvalho, 2020; Basmacıoğlu ve Ergül, 2002; Driehuis ve Elferink, 2000). Ayrıca; *Clostridium* spp. ve diğer patojen mikroorganizmaların silaj yoluyla alınması, ruminantlarda gastrointestinal bozukluklara ve toksikasyonlara yol açarak gıda güvenliği açısından da risk oluşturur (Queiroz ve ark., 2018).

3. SÜT ÜRETİM ZİNCİRİNDE CLOSTRIDIUM KONTAMİNASYONU VE PEYNİRDE GEÇ ŞİŞME KUSURU

Silaj kaynaklı *Clostridium* sporları, süt ve peynir üreticileri açısından önemli bir risk faktörüdür. Sporların çimlenmesinden sonra bazı suşlar, işlenmiş süt ve süt ürünlerinde bozulmalara yol açabilmektedir. Silaj yoluyla alınan *Clostridium* sporları, ineklerin gastrointestinal sisteminde canlılığını koruyarak dışkı yoluyla çevreye yayılır. Bu sporlar, çoğunlukla meme ucunun fekal kontaminasyonu yoluyla süte bulaşır. Bunun yanı sıra yataklık malzemesi, silo yemi, saman, kuru ot ve gübre gibi çevresel kaynaklar da süte geçişe neden olabilmektedir. Çiğ sütte bulunan bu sporlar, gıda işleme aşamalarında inaktive

edilemeyip süreç boyunca varlıklarını sürdürdüklerinde yüksek seviyelere ulaşarak peynirlerde bozulmalara neden olabilir (Floris ve ark., 2024; Şekil 2).



Şekil 2. Peynirde Geç Şişme Oluşumu ile *Clostridium* spp. Sporlarının İlişkisi

Peynirde geç şişme kusurunun oluşumu, *Clostridium* sporlarının vejetatif forma dönüşerek bütirik fermentasyonu başlatmasına elverişli çevresel koşullarla ilişkilidir. Özellikle pH'nın 5.3'ün üzerine çıkması, yüksek su aktivitesi ($a_w > 0.95$) olgunlaşma süresinin uzaması ve düşük tuz konsantrasyonu gibi faktörler *Clostridium* sporlarının çimlenmesini teşvik eder (Martinez-Cuesta ve ark., 2010; Qian ve ark., 2022). Peynirin olgunlaşması esnasında *C. tyrobutyricum* ve benzer türler, laktatı bütirik fermentasyon yoluyla metabolize ederek bütirik asit, CO_2 ve H_2 gazı oluşturur. Bu gazlar peynir dokusunda düzensiz gözler, çatlaklar ve kabarmalar şeklinde tanımlanan “geç şişme” kusuruna neden olur (Le Bourhis ve ark., 2007). Ayrıca yüksek olgunlaşma sıcaklıkları ($\geq 15^\circ C$), sınırlı havalandırma, yeterince düşük olmayan redoks potansiyeli *Clostridium* sporlarının çimlenmesini hızlandıran diğer önemli faktörlerdir (Driehuis ve ark., 2016). Bunun yanında, tuz oranının yetersizliği veya yüzeyin oksijenle teması sonrasında aerobik

mikroorganizmaların oksijeni tüketmesiyle oluşan lokal anaerobik mikro-nişler, bu bakterilerin çoğalmasını kolaylaştırabilir (Abeni ve ark., 2021).

Borreani ve ark. (2019) tarafından 49 farklı çiftlikte yürütülen araştırmada, toprak, mısır silajı, dışkı ve süt örneklerinde *Clostridium* türlerinin yaygın biçimde tespit edildiği ve bu kaynakların kontaminasyon açısından önemli birer rezervuar niteliği taşıdığı bildirilmektedir. Tablo 1’de sunulan dağılım incelendiğinde, *Clostridium sporogenes* ve *Clostridium tyrobutyricum* türlerinin özellikle toprak, mısır silajı ve dışkı örneklerinde yüksek oranlarda saptandığı, buna karşılık süt örneklerinde ise *Clostridium tyrobutyricum*’un baskın tür olarak yüzde 80 oranıyla öne çıktığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu türün silaj–dışkı–süt bulaşma zincirinde merkezi bir role sahip olduğunu ve çiğ süt kaynaklı geç şişme kusurunun ortaya çıkmasında kritik bir etken olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, *Clostridium bifermentans* ve *Clostridium butyricum* gibi türlerin süt örneklerinde daha düşük oranlarda bulunması, bu bakterilerin ikincil düzeyde kontaminasyon kaynakları olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 1. Bazı *Clostridium* türlerinin toprak, mısır silajı, dışkı ve süt örneklerinde tespit edilme oranları (%)

Bakteri türleri	Toprak	Mısır Silajı	Dışkı	Süt
<i>C. bifermentans</i>	0.0	0.0	0.0	4.0
<i>C. butyricum</i>	0.0	0.0	0.0	16.0
<i>C. sporogenes</i>	25.8	44.9	43.8	0.0
<i>C. tyrobutyricum</i>	74.2	55.1	56.2	80.0

Borreani ve ark., 2019’dan uyarlanmıştır.

Ertürkmen ve Öner (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, silaj, çiğ süt ve kaşar peyniri örneklerinde *Clostridium* sporlarının varlığı ile geç şişme olgusu kapsamlı biçimde incelenmiştir. Kış döneminde toplanan 20 peynir örneğinin 14’ünde yüzde 70 oranında geç şişme belirtilerinin gözlemlendiği ve

bu kusurlu peynirlerde *Clostridium* sporlarının yüksek düzeyde bulunduğu rapor edilmiştir. İzolasyon çalışmalarında baskın türün *C. sporogenes* olduğu, bunun yanı sıra *C. butyricum* ve *C. bifementans* gibi diğer türlerin de tespit edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, aynı işletmelere ait silaj ve çiğ süt örneklerinde de yüksek spor yükünün saptandığı belirtilmiştir. Bu bulgularla uyumlu biçimde Peruzy ve ark. (2022) tarafından yapılan araştırmada, incelenen 13 süt örneğinin 10'unda *Clostridium* sporlarının varlığı ortaya konmuş ve geç şişme kusuru gözlenen peynirlerin tamamında bu sporların bulunduğu ifade edilmiştir. Bermúdez ve ark. (2016) tarafından yürütülen uzun süreli bir çalışmada ise beş farklı peynir üretim tesisinden 17 ay boyunca toplanan çiğ süt, pastörize süt ve lizozim ilaveli pastörize süt örneklerinin tümünde *Clostridium* türlerinin tespit edildiği bildirilmiştir. Çalışmada en sık izole edilen türlerin *C. tyrobutyricum*, *C. sporogenes*, *C. beijerinckii* ve *C. butyricum* olduğu belirtilmiştir. Ayrıca spor konsantrasyonlarında belirgin bir mevsimsel değişimin bulunduğu, kış aylarında silaj tüketiminin artması ve yazın çevresel toz-toprak maruziyetinin yükselmesinin bu dalgalanmaya neden olabileceği bildirilmiştir. Bu bulgular, silaj kullanılan işletmelerde üretilen süt ve süt ürünlerinde geç şişme kusurunun önemli bir problem oluşturabileceğini ve bu olguda birden fazla *Clostridium* türünün rol oynayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, söz konusu kusurun önlenmesi amacıyla süt işleme aşamasında çeşitli fiziksel ve kimyasal kontrol yöntemlerinin uygulanmasının kaçınılmaz olduğu değerlendirilmektedir.

Yüksek sıcaklıkta uygulanan pastörizasyon işlemleri, *Clostridium* spp. sporlarını tamamen inaktive edemediği için sütteki spor yükünün azaltılmasında tek başına yeterli değildir. Bu nedenle, özellikle geç şişme riskini azaltmaya yönelik olarak baktöfugasyon ve mikrofiltrasyon gibi fiziksel ayırma teknikleri kullanılmaktadır. Qian ve ark. (2022) tarafından yapılan bir

çalışmada baktofugasyon ve mikrofiltrasyonun yaklaşık %98 oranında spor uzaklaştırma verimine sahip olduğunu rapor edilmiştir. Mikrofiltrasyon uygulamalarında ise spor oluşturan bakteriler için $n > 4.5$ log düzeyinde bir azaltma bildirilmektedir (Fernández García ve ark., 2013). Verilen bu değer, *Clostridium* spp. sporları gibi sporların mikrofiltrasyonla yaklaşık %95–99 oranında uzaklaştırılabildiğini göstermektedir. Bu tekniklerle özellikle *C. tyrobutyricum* gibi geç şişmeye neden olan sporların büyük ölçüde elimine edilmesi mümkün olsa da Floris ve ark. (2024) tarafından bu işlemlerin yüksek maliyetleri ve bazı peynir tiplerinde yasal veya geleneksel uygulama kısıtları nedeniyle her üretim hattında kullanıma uygun olmadığı belirtilmektedir.

Clostridium türlerinin aktivitesini kontrol altına almanın bir diğer etkili yöntemi ise süte veya peynire katkı maddesinin eklenmesidir. Avrupa Birliği düzenlemeleri ile Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği incelendiğinde, peynirlerde *Clostridium* spp. sporlarının kontrol altına alınması amacıyla nitrat (E251, E252) ve lizozim (E1105) kullanımına belirli sınırlar dâhilinde izin verildiği görülmektedir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023). Yönetmeliğin Ek II bölümünde lizozimin olgunlaştırılmış peynirlerde “*quantum satis*” prensibi kapsamında, yani yalnızca teknolojik gerekliliklerin karşılanması için gerekli en düşük düzeyde uygulanabileceği belirtilmektedir. Buna karşılık sodyum nitrat (E251) ve potasyum nitratın (E252) yalnızca sert, yarı sert ve yarı yumuşak peynirlerde kullanılabileceği ve nitrat iyonu cinsinden izin verilen maksimum düzeyin 150 mg/kg olarak sınırlandırıldığı ifade edilmektedir. Nitrit tuzlarının (E249, E250) peynirlerde kullanımına ise izin verilmediği bildirilmektedir. Bununla birlikte, nitrat ve nitritlerin nitrozamin oluşumu üzerinden potansiyel karsinogenik etkileri ile lizozim kaynaklı alerjik reaksiyonlar, tüketici güvenliği açısından önemli tartışmalara neden olmaktadır (Peruzy ve ark., 2022).

Avrupa Birliği'nin Regulation (EC) No 2073/2005 düzenlemesi ile Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği (2025) karşılaştırıldığında, süt veya peynir ürünlerinde *Clostridium* türleri ya da spor sayıları için herhangi bir yasal limit değeri tanımlanmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte *C. tyrobutyricum* ve diğer sporlu türlerin özellikle sert ve yarı sert peynirlerde "geç şişme" kusurunun başlıca etkenleri arasında bulunması, bu mikroorganizmaların varlığını endüstride kritik bir kalite göstergesi hâline getirmektedir. Uluslararası Süt Federasyonu'nun (IDF) teknik dokümanında bir litre çiğ sütte yalnızca birkaç *Clostridium* sporunun dahi ciddi bozulmalara yol açabileceği belirtilmekte ve sütteki spor yükünün mümkün olan en düşük seviyede tutulmasının zorunlu olduğu vurgulanmaktadır (IDF, 2022). Bu doğrultuda, Hollanda, Almanya ve Fransa gibi bazı Avrupa ülkelerinde çiğ sütte *Clostridium* sporlarının 10 kob/mL'nin, peynir üretiminde kullanılacak sütlerde ise 1 spor/mL'nin altında bulunması yasal zorunluluk olarak tanımlanmamakla birlikte iyi hijyen uygulamaları kapsamında önerilen referans kalite kriterleri arasında yer almaktadır.

Her ne kadar çiğ süt içerisindeki *Clostridium* sporlarının fiziksel veya kimyasal yöntemlerle uzaklaştırılması, peynirde geç şişme riskinin azalmasına önemli ölçüde katkı sağlasa da bu uygulamaların yüksek maliyetleri, sınırlı uygulanabilirlikleri ve bazı sağlık endişeleri nedeniyle tek başına yeterli olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, *Clostridium* kontaminasyonunun kaynağında önlenmesi, yani silaj üretimi aşamasında kontrol altına alınması, daha sürdürülebilir ve etkili bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Silajda *Clostridium* kontrolüne yönelik stratejiler, mikrobiyal dengenin korunması ve fermentasyon kalitesinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, silaj katkı maddelerinin uygulanması en yaygın ve etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Katkı maddeleri, özellikle laktik

asit bakterilerinin gelişimini destekleyerek pH düşüşünü hızlandırmakta ve *Clostridium* türlerinin spor çimlenmesini engelleyerek bozulmuş fermentasyon riskini azaltmaktadır. Ayrıca, organik asitler, enzimler veya antimikrobiyal bileşikler içeren katkı maddeleri, silajın kimyasal ve mikrobiyal kompozisyonunu optimize ederek hem kuru madde kaybını minimize etmekte hem de enerji değeri ve besin içeriğinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu yaklaşım, hayvan beslemesinde kullanılacak silajın güvenliğini ve kalitesini artırmak için endüstride yaygın olarak benimsenmektedir.

4. SİLAJ KATKI MADDELERİ

Silaj katkı maddeleri; fermentasyon kalitesini artırmak, besin değerini korumak ve istenmeyen mikrobiyal gelişimi önlemek amacıyla kullanılan biyolojik, kimyasal veya enzimatik bileşenlerdir. Bu katkılar, pH'nın hızlı bir şekilde düşmesini teşvik ederek özellikle *Clostridium* spp., enterobakteriler, maya ve küfler gibi istenmeyen mikroorganizmaların gelişimini baskılar. Ayrıca aerobik bozulmayı azaltarak silajın mikrobiyal stabilitesini ve depolama süresince korunabilirliğini artırır (Muck ve ark., 2018; Kung ve ark., 2018).

Bu bağlamda, silaj katkı maddelerinin seçimi ve uygulanması, hem fermentasyon sürecinin verimliliği hem de hayvan beslemesinde kullanılan kaba yemlerin kalite güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Biyolojik katkılar arasında laktik asit bakterisi starterleri öne çıkarken, kimyasal katkılar özellikle organik asit ve tuzların kombinasyonu ile *Clostridium* türlerinin gelişimini inhibe eder. Enzimatik katkılar ise lif ve nişasta parçalanmasını hızlandırarak sindirilebilirliği artırır ve böylece hem enerji içeriğini hem de fermentasyon stabilitesini iyileştirir.

4.1. Biyolojik Katkı Maddeleri

Biyolojik katkı maddeleri (inokulantlar), silaj kalitesinin artırılmasında temel stratejilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu katkılar, genellikle laktik asit bakterilerini içerir ve hızlı pH düşüşünü sağlayarak fermentasyon sürecini yönlendirir. Sonuç olarak, silajın mikrobiyal stabilitesi artar ve *Clostridium* spp. gibi patojen mikroorganizmaların gelişimi engellenir. Özellikle *Lactobacillus* spp. (güncel sınıflandırmaya göre *Lactiplantibacillus*, *Lentilactobacillus*, *Lacticaseibacillus* vb.), *Enterococcus* spp. ve *Pediococcus* spp., silaj inokulantları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu bakteriler, farklı bitki türlerinde uygulandığında silajın organik asit profili, pH düşüş hızı, amonyak azotu oranı ve kuru madde kaybı gibi fermentasyon parametrelerini olumlu yönde etkiler. Laktik asit bakterisi inokulasyonunun farklı bitki materyallerinde silaj fermentasyon özellikleri üzerindeki etkileri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Li ve ark. (2020) tarafından yürütülen bir çalışmada, *Lactiplantibacillus plantarum* (eski adıyla *Lactobacillus plantarum*) ve sakkaroz ilavesinin yonca silajında clostridial fermentasyon üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Katkı uygulanmayan kontrol grubunda, katkı uygulanan gruba göre daha yüksek düzeyde bütirik asit, $\text{NH}_3\text{-N}$ ve *Clostridium* gelişimi tespit edilmiştir. Ayrıca; pH değeri, kontrol grubunda 5.28 iken, *L. plantarum* ve sakkarozun birlikte uygulandığı grupta 3.98’e düştüğü; bu durumun, silo ortamında *Clostridium* türlerinin gelişimini baskıladığı bildirilmiştir (Li ve ark., 2020). Başka bir çalışmada yüksek nem içeriğine sahip yonca silajlarında *L. plantarum* inokulasyonunun etkisi değerlendirilmiştir (Yang ve ark., 2020). Araştırmanın sonuçlarına göre 90. günde açılan silajlarda inokulant uygulanan grupta kontrol grubuna göre daha düşük pH değerleri (sırasıyla 5.67 ve 7.05) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca; silaj materyalinin 90 günlük silolanması sonunda, kontrol

grubunda bakteriyel toplulukta *Clostridium* türlerinin baskınlığının yaklaşık %64 olduğu, *L. plantarum* inokulasyonu ile bu oranın önemli düzeyde düşürüldüğü (yaklaşık %29) bildirilmiştir (Yang ve ark., 2020).

Tablo 2. Farklı bitki türlerinde laktik asit bakterisi inokülasyonu ve katkı uygulamalarının silajın pH, bütirik asit ve NH₃-N düzeyleri üzerine etkileri

<u>Bitki</u>	<u>Gruplar</u>	<u>pH</u>	<u>Bütirik asit</u>	<u>NH₃-N</u>	<u>Kaynak</u>
Yonca	Kontrol	5.28 ^a	6.67 ^a	131.00 ^a	Li ve ark., 2020
	<i>L. plantarum</i>	4.80 ^b	0.85 ^b	78.30 ^b	
	Sakkaroz	4.07 ^c	0.00 ^c	23.10 ^c	
	<i>L. plantarum</i> +Sakkaroz	3.98 ^d	0.00 ^c	17.20 ^d	
Yonca	Kontrol	7.05 ^a	-	57.06 ^a	Yang ve ark., 2020
	<i>L. plantarum</i>	55.67 ^b		36.71 ^b	
Mısır	Kontrol	3.57 ^b	<0.01	55.00	Tabacco ve ark., 2009
	<i>L. buchneri</i>	3.74 ^a	<0.01	61.00	
	<i>L. plantarum</i>	3.57 ^b	<0.01	50.70	
Sorgum	Kontrol	3.84 ^b	<0.01	46.00	Tabacco ve ark., 2009
	<i>L. buchneri</i>	3.95 ^a	<0.01	47.50	
	<i>L. plantarum</i>	3.78 ^b	<0.01	52.30	

^{a-d}. Aynı sütunda farklı üst simgelerle gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak önemli farklılık göstermektedir (p<0.001).

Benzer şekilde Zheng ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yonca silajında inokulant olarak *L. plantarum* ve *Lentilactobacillus buchneri* (eski adıyla *Lactobacillus buchneri*) kullanılmıştır. Kontrol grubunda *Clostridium tyrobutyricum*, *C. luticellarii*, *C. sporogenes* ve *C. perfringens* türlerinin baskın olduğu; inokulant uygulamasının ise bu türlerin varlığını önemli düzeyde azalttığı bildirilmiştir (Zheng ve ark., 2024). Tabacco ve ark. (2009) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, mısır ve sorgum materyallerine uygulanan *L. plantarum* ve *L. buchneri* inokulantlarının, aerobik bozulma sürecinde *Clostridium* sporu oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, *L. buchneri* uygulanan silajlarda maya

gelişiminin azaldığı ve buna bağlı olarak aerobik stabilitenin arttığı; özellikle mısır silajlarında *Clostridium* spor sayısının kontrol ve *L. plantarum* gruplarına kıyasla önemli düzeyde düşük olduğu belirtilmiştir. Sorgum silajlarında ise *L. buchneri* uygulanan gruplarda *Clostridium* sporlarında herhangi bir artış gözlenmediği ifade edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, *L. buchneri* inokulantının silaj açıldıktan sonra meydana gelebilecek aerobik bozulma koşullarında *Clostridium* sporlarının çimlenmesini ve gelişimini baskılayarak mikrobiyal kaliteyi koruyabileceği ifade edilmiştir (Tabacco ve ark., 2009).

4.2. Kimyasal Katkı Maddeleri

Kimyasal katkı maddeleri, başlıca organik asitler ve bunların tuzları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu grup içinde formik asit, sorbik asit, benzoik asit, propiyonik asit ve asetik asit öne çıkmakta olup, bu bileşikler silajın mikrobiyal stabilitesini artırmada önemli rol oynamaktadır. Uygulama dozu ve silajın tamponlama kapasitesine bağlı olarak, formik asit fermentasyonun erken evrelerinde pH'ı hızla düşürerek bozulmaya neden olan mikroorganizmaları baskılar ve özellikle *Clostridium* türlerinin gelişimini engeller (Hao ve ark., 2024). Diğer yandan, sorbik asit, benzoik asit, propiyonik asit ve asetik asitler, özellikle maya ve küflerin doğrudan inhibisyonu yoluyla silajın aerobik stabilitesinin korunmasına katkı sağlar. Bu asitler arasında sorbik asit, benzoik aside kıyasla daha güçlü bir antimikrobiyal etki göstererek maya ve küflerin gelişimini baskılar; ayrıca bazı *Clostridium* türlerine karşı da inhibitör etki oluşturabilir (Muck ve ark., 2018). Buna ek olarak, kalsiyum propiyonat, sodyum format, amonyum format, sodyum nitrit ve sodyum benzoat gibi tuz bazlı katkı maddeleri, silajın mikrobiyal stabilitesini korumak amacıyla bozulmaya neden olan bakteri ile maya ve küflerin gelişimini baskılamaktadır (Lv ve ark., 2020; Muck ve ark., 2018; Tüzel ve ark., 2025). Ticari silaj katkı ürünleri genellikle bu aktif bileşenlerin farklı konsantrasyonlarda

bir araya getirilmesiyle formüle edilmekte; bu sayede geniş bir antimikrobiyal etki spektrumu elde edilerek silaj kalitesinin korunması hedeflenmektedir (Muck ve ark., 2018). Özellikle sodyum nitrit, sodyum benzoat, potasyum sorbat, sodyum propiyonat ve potasyum diformat gibi bileşenlerin kombine şekilde kullanılması durumunda, *Clostridium* türlerinin çimlenmesi ve vejetatif gelişimine karşı güçlü bir inhibitör etki sağlandığı bildirilmektedir. Yapılan araştırmalar, bu tür kombinasyonların *Clostridium* spor sayısını, bütirik asit oluşumunu ve amonyak azotu düzeylerini önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur (Auerbach ve ark., 2016; Knicky ve Spörndly, 2015). Bu etkiler, farklı bitkisel materyaller üzerinde yapılan çalışmalarla da desteklenmiştir (Tablo 3).

Tablo 3 incelendiğinde, kimyasal katkı maddelerinin tüm bitki türlerinde silajın pH değerini düşürdüğü, bütirik asit üretimini azalttığı ve $\text{NH}_3\text{-N}$ oranını önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Örneğin, yonca silajında formik asit ve potasyum diformat uygulamaları pH'ı kontrol grubuna kıyasla belirgin şekilde düşürmüş ve bütirik asit ile $\text{NH}_3\text{-N}$ seviyelerini azaltmıştır. Benzer şekilde, yulaf silajında propiyonik asit ve sodyum benzoat kullanımı pH'ı düşürmüş ve $\text{NH}_3\text{-N}$ birikimini kontrol grubuna göre minimize etmiştir. Baklagil-buğdaygil karışımlarında ise inokulant uygulaması, kontrol grubuna kıyasla hem pH düşüşünü hızlandırmış hem de bütirik asit ve $\text{NH}_3\text{-N}$ oluşumunu engellemiştir. Bu bulgular, kimyasal katkı maddelerinin silajın fermentasyon kalitesini artırmada ve *Clostridium* aktivitesini sınırlamada etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Bazı kimyasal katkı maddelerinin farklı silaj bitkilerinde pH, bütirik asit ve NH₃-N düzeyleri üzerine etkileri

<u>Bitki</u>	<u>Gruplar</u>	<u>pH</u>	<u>Bütirik asit</u>	<u>NH₃-N</u>	<u>Kaynak</u>
Yonca	Kontrol	4.87 ^a	3.63 ^a	115.80 ^a	Yuan ve ark., 2017
	Formik asit	4.22 ^b	0.81 ^b	61.10 ^b	
	Potasyum diformat	4.19 ^b	0.63 ^b	59.10 ^b	
Yulaf	Kontrol	5.92 ^a	51.30 ^a	101.00 ^a	Jia ve ark., 2021
	Propiyonik asit	4.28 ^c	-	29.70 ^b	
	Sodyum benzoat	4.46 ^b	-	20.60 ^b	
¹ Baklagil+buğdaygil karışımı	Kontrol	5.10 ^a	55.00 ^a	177.80 ^a	Knicky ve Spörndly, 2011
	² İnokulant	4.20 ^b	0.40 ^b	51.70 ^b	

¹Yonca, üçgül, timothy, çayır salkım otu

²Sodyum benzoat + Potasyum sorbat + sodyum nitrit

“–” işareti, ilgili parametrenin analizde tespit edilemediğini göstermektedir.

^{a-c}: Aynı sütunda farklı üst simgelerle gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak önemli farklılık göstermektedir (p<0.001).

Yaş bira posasından silaj elde edilmesi üzerine yapılan bir çalışmada, sodyum format ve kalsiyum propiyonat ilavesinin mikrobiyal flora üzerine etkisi değerlendirilmiş; sodyum format grubunda *Lactobacillus* düzeyinin kontrol ve kalsiyum propiyonat grubuna kıyasla önemli düzeyde yüksek, *Clostridium* düzeyinin ise belirgin şekilde düşük olduğu bildirilmiştir (Lv ve ark., 2020). Dong ve ark. (2017) tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise yonca bitki materyaline kalsiyum propiyonat ilavesinin *Clostridium* türleri üzerine etkileri incelenmiş ve katkı uygulanan silajlarda kontrol grubuna göre önemli düzeyde azalma tespit edilmiştir. Knicky ve Spörndly (2011) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, kuru madde oranı ve silolanabilirlik derecesine göre üç gruba ayrılan toplam on üç yem bitkisine sodyum benzoat, potasyum sorbat ve sodyum nitrit içeren bir katkı karışımı uygulanmış; bu katkıların özellikle düşük kuru

madde içeriğine sahip materyallerde *Clostridium* spor sayısı, bütirik asit ve $\text{NH}_3\text{-N}$ düzeylerinde önemli azalma sağladığı ve silajın aerobik stabilitesini artırdığı bildirilmiştir (Knicky ve Spörndly, 2011). Yulaf silajında propiyonik asit ve sodyum benzoat katkılarının kalite, mikrobiyal yapı ve biyojenik amin oluşumu üzerindeki etkilerini değerlendiren bir çalışmada, her iki katkının da fermentasyon kalitesini artırdığı, biyojenik amin düzeylerini azalttığı ve istenmeyen mikroorganizmaların gelişimini baskıladığı bildirilmiştir. Ayrıca; kontrol grubu silajlarda aerobik maruziyet sonrası *C. tyrobutyricum*'un artış gösterdiği, buna karşın propiyonik asit ve sodyum benzoat katkılı silajlarda bu artışın gözlenmediği ifade edilmiştir. (Jia ve ark., 2021). Yonca silajında potasyum diformat ve formik asit uygulamalarını değerlendiren başka bir çalışmada, kontrol grubuna kıyasla her iki katkının da pH'yı düşürdüğü, *Clostridium* dahil istenmeyen mikroorganizmaların gelişimini baskıladığı, bütirik asit, etanol ve $\text{NH}_3\text{-N}$ düzeylerini azalttığı ve silajın aerobik stabilitesini önemli şekilde artırdığı bildirilmiştir (Yuan ve ark., 2017).

5. SONUÇ

Silajda *Clostridium* türlerinin gelişimi yalnızca yem kalitesini ve hayvan sağlığını olumsuz etkilemekle kalmayıp, süt ve süt ürünlerinde ekonomik kayıplara yol açan “geç şişme” kusurunun da başlıca nedeni olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, kontaminasyonun süt işleme aşamasına ulaşmadan önce, yani silaj üretiminin başlangıcında kontrol altına alınması, hem etkili hem de sürdürülebilir bir strateji olarak değerlendirilmelidir. İncelenen literatür çalışmaları hem biyolojik inokulantların hem de organik asit ve tuz bazlı kimyasal katkı maddelerinin *Clostridium* gelişimini baskılamada başarılı olduğunu göstermektedir. Gelecekteki araştırmalarda, farklı katkı maddesi

kombinasyonlarının potansiyel sinerjik etkilerinin incelenmesi, silaj materyaline özgü katkı stratejilerinin geliştirilmesi ve bu uygulamaların ekonomik etkinliğinin değerlendirilmesi önemli olacaktır. Böylece, hem hayvan beslemede kaliteli yem sağlanabilir hem de süt ürünlerinde mikrobiyal güvenlik artırılabilir. Ayrıca, *Clostridium* gelişimi baskılanmış veya engellenmiş silajlarla beslenen hayvanların sütlerinde spor yükünün değerlendirilmesi, katkı maddeleri ile sağlanan kontrolün süt ve süt ürünlerindeki mikrobiyal güvenlik üzerindeki etkisinin daha net olarak ortaya konmasına imkân sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Abeni, F., Marino, R., Petrera, F., Segati, G., Galli, A., & Carminati, D. (2021). Farm silage facilities and their management for the prevention of anaerobic bacteria spore contamination in raw milk. *Dairy*, 2(3), 500–514.
- Auerbach, H., Nadeau, E., Weiss, K., & Theobald, P. (2016). Effects of different sodium nitrite-containing additives on dry matter losses, fermentation pattern and biogenic amine formation in lucerne and cocksfoot silage. In L. Rajčáková (Ed.), *Proceedings of the 17th International Conference on Forage Conservation* (pp. 117–118). National Agricultural and Food Centre.
- Ávila, C. L. S., & Carvalho, B. F. (2020). Silage fermentation: Updates focusing on the performance of micro-organisms. *Journal of Applied Microbiology*, 128(4), 966–984. <https://doi.org/10.1111/jam.14533>
- Basmacıoğlu, H., & Ergül, M. (2002). Silaj mikrobiyolojisi. *Hayvansal Üretim*, 43(1), 12–24.
- Bermúdez, J., González, M. J., Olivera, J. A., Burgueño, J. A., Juliano, P., Fox, E. M., & Reginensi, S. M. (2016). Seasonal occurrence and molecular diversity of Clostridia species spores along cheesemaking streams of five commercial dairy plants. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3358–3366. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10683>
- Borreani, G., Ferrero, F., Nucera, D., Casale, M., Piano, S., & Tabacco, E. (2019). Dairy farm management practices and the risk of contamination of tank milk from Clostridium spp. and Paenibacillus spp. spores in silage, total mixed ration, dairy cow feces and raw milk. *Journal of Dairy Science*, 102, 8273–8289. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16462>

- Camerini, S., Marcocci, L., Picarazzi, L., Iorio, E., Ruspantini, I., Pietrangeli, P., Crescenzi, M., & Franciosa, G. (2019). Type E botulinum neurotoxin-producing *Clostridium butyricum* strains are aerotolerant during vegetative growth. *mSystems*, 4(2), e00299-18. <https://doi.org/10.1128/msystems.00299-18>
- Dong, Z., Yuan, X., Wen, A., Desta, S. T., & Shao, T. (2017). Effects of calcium propionate on the fermentation quality and aerobic stability of alfalfa silage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(9), 1278–1287. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0025>
- Driehuis, F., & Elferink, S. J. W. H. (2000). The impact of the quality of silage on animal health and food safety: A review. *Veterinary Quarterly*, 22, 212–217. <https://doi.org/10.1080/01652176.2000.9695176>
- Driehuis, F., Hoolwerf, J., & Rademaker, J. L. (2016). Concurrence of spores of *Clostridium tyrobutyricum*, *Clostridium beijerinckii* and *Paenibacillus polymyxa* in silage, dairy cow feces and raw milk. *International Dairy Journal*, 63, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.06.002>
- Ertürkmen, P., & Öner, Z. (2023). Challenging the problematic detection of clostridial isolates causing late-blowing defect with MALDI-TOF MS. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(1), 1–10. <https://doi.org/10.17221/21/2022-CJFS>
- European Commission. (2005). Commission Regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on microbiological criteria for foodstuffs. *Official Journal of the European Union*, L 338, 1–26. <http://data.europa.eu/eli/reg/2005/2073/2020-03-08>

- Fernández García, L., Álvarez Blanco, S., & Riera Rodriguez, F. A. (2013). Microfiltration applied to dairy streams: removal of bacteria. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 187-196.
- Floris, I., Martucci, F., Romano, A., Marelllo, G., Ligotti, C., & Bianchi, D. M. (2024). Multiplex-PCR detection of *Clostridium tyrobutyricum*, *Clostridium butyricum*, and *Clostridium sporogenes* in raw milk for cheesemaking. *Life*, 14(9), 1093. <https://doi.org/10.3390/life14091093>
- Hao, L., Jiang, F., Wang, Y., Wang, H., Hu, H., You, W., ... & Song, E. (2024). Formic acid enhances whole-plant mulberry silage fermentation by boosting lactic acid production and inhibiting harmful bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1399907. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1399907>
- International Dairy Federation (IDF). (2022). Enumeration of butyric acid forming (cheese spoiling) clostridia: Methodical considerations (IDF Factsheet No. 22/2022). <https://doi.org/10.56169/PXQW8088>
- Jia, T., Yun, Y., & Yu, Z. (2021). Propionic acid and sodium benzoate affected biogenic amine formation, microbial community, and quality of oat silage. *Frontiers in Microbiology*, 12, 750920. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.750920>
- Knicky, M., & Spörndly, R. (2011). The ensiling capability of a mixture of sodium benzoate, potassium sorbate, and sodium nitrite. *Journal of Dairy Science*, 94(2), 824–831. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3554>
- Knicky, M., & Spörndly, R. (2015). Use of a mixture of sodium nitrite, sodium benzoate, and potassium sorbate in

- aerobically challenged silages. *Journal of Dairy Science*, 98(8), 5729–5734. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9023>
- Kung, L., Jr., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4020–4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13324>
- Le Bourhis, A. G., Doré, J., Carlier, J. P., Chamba, J. F., Popoff, M. R., & Tholozan, J. L. (2007). Contribution of *C. beijerinckii* and *C. sporogenes* in association with *C. tyrobutyricum* to the butyric fermentation in Emmental type cheese. *International Journal of Food Microbiology*, 113(2), 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.08.017>
- Lee, J., Jang, Y. S., Han, M. J., Kim, J. Y., & Lee, S. Y. (2016). Deciphering *Clostridium tyrobutyricum* metabolism based on whole-genome sequence and proteome analyses. *mBio*, 7(3), e00782-16. <https://doi.org/10.1128/mBio.00782-16>
- Leja, K., Myszka, K., Olkowicz, M., Juzwa, W., & Czaczyk, K. (2014). *Clostridium bifermentans* as an aero-tolerant exponent of strictly anaerobe genera. *Advances in Microbiology*, 4, 187–198. <http://dx.doi.org/10.4236/aim.2014.44028>
- Li, R., Jiang, D., Zheng, M., Tian, P., Zheng, M., & Xu, C. (2020). Microbial community dynamics during alfalfa silage with or without clostridial fermentation. *Scientific Reports*, 10(1), 17782. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74622-2>
- Lv, J., Fang, X., Feng, G., Zhang, G., Zhao, C., Zhang, Y., & Li, Y. (2020). Effects of sodium formate and calcium

- propionate additives on the fermentation quality and microbial community of wet brewers grains after short-term storage. *Animals*, 10(9), 1608. <https://doi.org/10.3390/ani10091608>
- Martinez-Cuesta, M. C., Bengoechea, J., Bustos, I., Rodríguez, B., Requena, T., & Peláez, C. (2010). Control of late blowing in cheese by adding lacticin 3147-producing *Lactococcus lactis* IFPL 3593 to the starter. *International Dairy Journal*, 20(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.09.006>
- Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung, L., Jr. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3980–4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13376>
- Peruzy, M. F., Blaiotta, G., Aponte, M., De Sena, M., & Murru, N. (2022). Late blowing defect in Grottone cheese: Detection of clostridia and control strategies. *Italian Journal of Food Safety*, 11(2), 10162. <https://doi.org/10.4081/ijfs.2022.10162>
- Qian, C., Martin, N. H., Wiedmann, M., & Trmčić, A. (2022). Development of a risk assessment model to predict the occurrence of late blowing defect in Gouda cheese and evaluate potential intervention strategies. *Journal of Dairy Science*, 105, 2880–2894. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21206>
- Queiroz, O. C. M., Ogunade, I. M., Weinberg, Z., & Adesogan, A. T. (2018). Silage review: Foodborne pathogens in silage and their mitigation by silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4132–4142. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13614>

- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). *Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği*. Resmî Gazete, Sayı 32338. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=40365&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2025). *Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği*. Resmî Gazete, 13 Şubat 2025, Sayı 32812. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/02/20250213-1.htm>
- Tabacco, E., Piano, S., Cavallarin, L., Bernardes, T. F., & Borreani, G. (2009). Clostridia spore formation during aerobic deterioration of maize and sorghum silages as influenced by *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* inoculants. *Journal of Applied Microbiology*, 107(5), 1632–1641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04377.x>
- Tüzel, E., Tegün, E., & Aydın, R. (2025). Effects of sodium benzoate on the quality and aerobic stability of corn silage contaminated with *Listeria monocytogenes*. *Animal Feed Science and Technology*, 116238. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116238>
- Yang, F., Wang, Y., Zhao, S., & Wang, Y. (2020). *Lactobacillus plantarum* inoculants delay spoilage of high-moisture alfalfa silages by regulating bacterial community composition. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1989. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01989>
- Yuan, X., Wen, A., Dong, Z., Desta, S. T., & Shao, T. (2017). Effects of formic acid and potassium diformate on the fermentation quality, chemical composition and aerobic stability of alfalfa silage. *Grass and Forage Science*, 72(4), 833–839. <https://doi.org/10.1111/gfs.12297>

Zheng, M., Li, Q., Mao, P., Tian, X., Guo, Y., & Meng, L. (2024). Identification and correlation analysis of key Clostridia and LAB species in alfalfa silages prepared with different cultivars and additives. *Agriculture*, 14(11), 1963. <https://doi.org/10.3390/agriculture14111963>

İNEKLERDE POSTPARTUM DÖNEM HASTALIKLARIN SIKLIK AKTİVİTE VE FERTİLİTE ÜZERİNE ETKİLERİ

Bariş GÜNER¹

Ashhan AYALP ERKAN²

1. GİRİŞ

Süt sığırlarında postpartum dönem, doğum sonrası iyileşme ile reproduktif aktivitenin yeniden başlamasını içeren ve yoğun metabolik–hormonal adaptasyon gerektiren kritik bir fazdır. Bu süreçte uterus 3–4 hafta içinde gebelik öncesi boyutlarına dönerken, ovaryumların yeniden siklik aktivite göstermesi çoğunlukla 40–60 günü bulmaktadır (LeBlanc, 2008; Pascottini ve ark., 2025; Sheldon ve Owens, 2017). Laktasyonun başlamasıyla birlikte oluşan negatif enerji dengesi bağışıklığı zayıflatarak enfeksiyöz ve metabolik hastalıklara yatkınlığı artırmakta; postpartum ilk haftalarda ineklerin yaklaşık yarısı en az bir sağlık bozukluğu yaşamaktadır. Uterus hastalıkları %5–30, subklinik endometritis %14–24, mastitis ve metabolik hastalıklar ise %23–32 oranlarında rapor edilmektedir (Bruinje ve ark., 2023a; Carvalho ve ark., 2019; Dubuc ve ark., 2011; Ribeiro ve ark., 2016).

Postpartum dönemde görülen hastalıklar yalnızca genel sağlığı değil, uterus involüsyonu, LH salınımı, foliküler gelişim ve oosit kalitesi gibi temel reproduktif süreçleri de olumsuz

¹ Doç. Dr., Balıkesir Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Doğum ve Jinekoloji Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-6414-6752.

² Doktora Öğrencisi, Balıkesir Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Veteriner Doğum ve Jinekolojisi Doktora Programı, ORCID: 0000-0002-7822-5467.

etkileyerek ovulasyonun gecikmesine ve fertilite kayıplarına neden olmaktadır (Ospina ve ark., 2010; Pascottini ve ark., 2020). Nitekim postpartum hastalıkların varlığı, ilk tohumlamada gebelik oranının düşmesi, tohumlama sayısının artması ve açık gün süresinin uzaması ile güçlü şekilde ilişkilidir (Bruinjé ve LeBlanc, 2024).

Bu bölümde, postpartum dönemde görülen başlıca hastalıklar ve bunların sıklık aktivite ile fertilite üzerine etkileri literatür doğrultusunda özetlenecek; böylece postpartum sağlık ile reproduktif performans arasındaki ilişkinin çok yönlü yapısına dair güncel bir çerçeve sunulacaktır.

2. POSTPARTUM DÖNEMDE GÖRÜLEN BAŞLICA HASTALIKLAR

Doğum sonrasındaki ilk haftalar, süt ineklerinin enfeksiyöz ve metabolik hastalıklara en duyarlı olduğu dönemdir. Bu süreçte bağışıklık fonksiyonlarının baskılanması, negatif enerji dengesi ve artan metabolik yük, birçok hastalığın ortaya çıkmasını kolaylaştırmaktadır. Postpartum dönemde en sık karşılaşılan sorunlar arasında uterus enfeksiyonları (metritis, endometritis), meme enfeksiyonları (mastitis) ve çeşitli enfeksiyöz ve metabolik bozukluklar yer almaktadır.

2.1. Retensiyo sekundaryum

Normal koşullarda inekler doğumu takiben genellikle ilk 6 saat içerisinde, en geç 12 saat içinde plasenta ve fetal zarlarını dışarı atmaktadır. Plasentanın doğumdan sonraki 24 saat içinde atılamaması durumu retensiyo sekundaryum (RP) olarak tanımlanmaktadır. Sütçü ineklerde RP insidansı %5–15 arasında bildirilmektedir. Bununla birlikte ikiz doğum, güç doğum, sezaryen, abort, ileri yaş ve mineral-vitamin eksiklikleri (özellikle selenyum ve E vitamini) RP görülme riskini önemli ölçüde

artırmaktadır (Bruinjé ve LeBlanc, 2024; Carvalho ve ark., 2019; Ribeiro ve ark., 2013).

Retensiyo sekondaryumun klinik önemi yalnızca plasentanın atılamamasıyla sınırlı olmayıp, postpartum dönemde gelişen diğer uterus hastalıkları için de önemli bir risk faktörü oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. RP varlığında uterus bakteriyel kolonizasyonu kolaylaşmakta ve bu durum özellikle metritis ve endometritis gelişme riskini artırmaktadır. Ayrıca RP geçiren ineklerde kronik endometritis görülme olasılığının daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Gunay ve ark., 2011).

2.2. Postpartum dönemde uterus enfeksiyonları

Buzağılamadan sonraki ilk 6 hafta, yüksek verimli süt ineklerinde uterus enfeksiyon riskinin en yüksek olduğu dönem olup ineklerin %15–40'ında enfeksiyon gelişebilmektedir (LeBlanc, 2008; Pereira ve ark., 2025). Doğum sonrası uterusun bakterilerle kontaminasyonu fizyolojik olsa da bunun klinik enfeksiyona dönüşmesi patojen virülansı, involüsyon hızı ve bağışıklık yanıtına bağlıdır. Bu nedenle çoğu inekte bakteri bulunmasına rağmen yalnızca bir kısmında klinik hastalık ortaya çıkmaktadır (Pascottini ve ark., 2023; Sheldon ve ark., 2006).

2.2.1. Metritis

Metritis, doğumdan sonraki ilk 10–14 gün içinde gelişen uterin bakteriyel enfeksiyon olup kırmızısı-kahverengi, sulu ve kötü kokulu vaginal akıntı ile karakterizedir. Olguların bir kısmında ateş, iştahsızlık ve süt veriminde düşüş gibi sistemik belirtiler görülür. Vücut sıcaklığının $\geq 39,5$ °C'ye ulaşmasıyla seyreden ağır klinik form puerperal metritis olarak tanımlanmaktadır (Bruinjé ve ark., 2024; Galvão, 2012; Pinedo ve ark., 2020). Hastalık, süt ineklerinin %5–30'unda görülmesiyle postpartum dönemin en yaygın uterus bozukluklarından biridir (Bruinjé ve ark., 2024).

Metritis için en güçlü risk faktörü RP'dir. Ayrıca güç doğum, ikiz gebelikler, ölü doğum, abort, uterus prolapsusu, yetersiz hijyen ve erken laktasyonda görülen ketozis de hastalık gelişimini önemli ölçüde artırmaktadır (Galvão, 2012; Pascottini ve ark., 2023; Sheldon ve ark., 2006).

2.2.2. Endometritis

Endometritis, postpartum 3–8. haftalarda görülen endometriyum inflamasyonu olup klinik ve subklinik olmak üzere iki forma ayrılmaktadır. Klinik endometritis purulent veya mukopurulent vaginal akıntı ile tanımlanırken, subklinik endometritis (SCE) gözle görülür bir akıntı olmadan endometrial sitolojiyle teşhis edilmektedir. Genellikle postpartum 4–8. haftalarda endometriyumda ≥ 5 PMN varlığı tanı kriteri olarak kabul edilmekte ve SCE prevalansı %14–24 arasında bildirilmiştir (Bruinje ve LeBlanc, 2024; Sheldon ve ark., 2006).

SCE klinik bulgu göstermemesi nedeniyle çoğu zaman tohumlama dönemine kadar fark edilmeyen ancak reproduktif performansta belirgin kayıplara yol açan bir durumdur. Endometriyumda devam eden inflamasyon, embriyo gelişimi açısından suboptimal bir ortam oluşturarak erken embriyonik kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca kronik inflamasyonun sperm yaşam süresini kısalttığı ve fertilizasyon kapasitesini azalttığı bildirilmektedir. Endometrial sitolojide ≥ 5 PMN bulunan ineklerde gebelik oranlarının anlamlı derecede düşük olması bu olumsuz etkinin en güçlü göstergelerinden biridir (Pascottini ve ark., 2023).

2.2.3. Purulent vaginal akıntı

Buzağılamadan sonraki yaklaşık 3–5. haftalarda vaginada gözlenen ve içeriğinin en az %50'si irin olan akıntılar purulent vaginal akıntı (PVD) olarak tanımlanmaktadır (Dubuc ve ark., 2011; LeBlanc, 2023). PVD olgularında eksudatın kaynağı her zaman net olarak belirlenememekte olup, vakaların yaklaşık

yarısında endometrial inflamasyon saptanmadığı; tablonun çoğu zaman vaginitis veya servisit ile ilişkili olduğu bildirilmektedir (Deguillaume ve ark., 2012; Dubuc ve ark., 2011). PVD'nin görülme sıklığı %4–15 arasında değişmektedir (Bruinjé ve LeBlanc, 2024).

Literatürde PVD sıklıkla “klinik endometritis” terimi ile eş anlamlı kullanılmış olsa da, güncel görüş terminolojinin dikkatli kullanılmasının gerekli olduğu yönündedir. Nitekim Pascottini ve ark., (2020), PVD saptanan ineklerin uterus mikrobiyotasını sağlıklı ineklerle karşılaştırmış ve endometriyumda inflamasyon bulunmayan PVD olgularının da varlığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, vaginal akıntısı irinli olan ineklerde “klinik endometritis” tanısının ancak sitolojik inceleme ile endometrial yangının doğrulanması sonrası konulması önerilmektedir (Pascottini ve ark., 2023).

2.3. Postpartum ovaryum fonksiyon bozuklukları

Postpartum dönemde görülen sağlık bozukluklarının ovaryum fonksiyonlarını etkilemesinin temel mekanizması, inflamasyon ve metabolik stresin HPO eksenini baskılamasıdır. LPS ve proinflamatuvar sitokinlerin kisspeptin nöronlarını inhibe ederek GnRH–FSH–LH salınımını azaltması, foliküler gelişimi ve ovulasyonu doğrudan sekteye uğratmaktadır (Magata ve ark., 2023).

Monteiro ve ark., (2021), anovulatör ineklerde folikül çapının gonadotropin sinyaliyle ilişkili olduğunu bildirmiştir: ≤ 7 mm FSH eksikliğini, 8–13 mm düşük LH salınımını, 14–17 mm orta düzey LH desteğini, ≥ 18 mm ise LH dalgalanması yokluğunu göstermektedir. Özellikle 8–13 mm foliküllü anovulatör ineklerde RP, metritis, hiperketonemi, mastitis ve topallık gibi hastalıkların daha sık görüldüğü ve bu ineklerde SHS, VKS ve süt verimi gibi parametrelerin de olumsuz etkilendiği rapor edilmiştir.

Bu bulgular, postpartum hastalık yükünün LH salınımını baskılayarak baskın folikülün preovulatar evreye ilerlemesini engellediğini; dolayısıyla metabolik ve enfeksiyöz bozuklukların anovulasyon ve fertilite kayıplarının temel belirleyicileri olduğunu göstermektedir.

2.4. Ketozis

Ketozis, erken laktasyonda NED nedeniyle gelişen ve artan lipoliz sonucu NEFA ile BHB düzeylerinin yükselmesiyle karakterize bir metabolik bozukluktur (Sammad ve ark., 2022). NEFA karaciğer yağlanması artırırken, yüksek BHB ketozisi derinleştirmektedir.

Subklinik ketozis postpartum ilk 3 haftada ineklerin %26.3'ünde görülmekte, BHB 7. günde en yüksek düzeye ulaşmakta ve vakaların çoğu 14. güne kadar düzelmektedir (Guner ve ark., 2025). Hiperketonemi ilk haftada %20–27 olup BHB ≥ 1.4 mmol/L gebelik oranında azalma ve sürüden çıkarılma riskinde artışla ilişkilidir (Bruinje ve LeBlanc, 2024; Dubuc ve Denis-Robichaud, 2017).

Yüksek süt verimine yönelik seleksiyon ve metabolik maladaptasyon ketozis görülme riskini artırmakta; uzun süreli NED ise hem metabolik hem reproduktif fonksiyonları olumsuz etkilemektedir. Doğum öncesi VKS kaybı da ketozis, mastitis ve gecikmiş ovaryum aktivitesi için önemli bir risk faktörüdür (Pascottini ve ark., 2020; Sheehy ve ark., 2017).

2.5. Mastitis

Mastitis, süt sığırlarında meme bezinin patojen mikroorganizmalar veya travmatik/toksik etkenlere verdiği inflamatuvar yanıttır (Lembovičūtė ve ark., 2025). Hastalık yalnızca meme dokusunu etkilemekle kalmamakta, sistemik immün ve endokrin yanıtları da değiştirerek hayvan sağlığı ve verimliliği üzerinde geniş kapsamlı olumsuz etkilere yol

açmaktadır. Bu nedenle mastitis, süt sığırlarında en yaygın ve ekonomik kayıplara neden olan hastalıklardan biridir (İbrahim ve ark., 2023; Lemboviçiütè ve ark., 2025).

Mastitis olgularının çoğu bakteriyel kaynaklıdır (Wang ve ark., 2021). Türkiye’de yapılan bir çalışmada klinik mastitislerde çevresel patojenlerin baskın olduğu; en sık izole edilen etkenin %36.3 ile *E. coli* olduğu, bunu koagülaz-negatif stafilkokklar, *Streptococcus dysgalactiae* ve *S. aureus*’un izlediği bildirilmiştir (Guner ve ark., 2024). Gram-negatif patojenlerde önemli bir rol oynayan LPS, güçlü lokal inflamasyona ek olarak sistemik dolaşıma geçip sitokin üretimini artırmakta ve HPO eksenini etkileyerek foliküler atrezi ve östrus gecikmesine yol açabilmektedir (Lemboviçiütè ve ark., 2025; Yadav ve Belbase, 2025). Bu süreç, mastitisin fertilitiyi olumsuz etkilemesinin temel mekanizmalarından biridir.

Mastitis gelişiminde çevresel hijyen, sağım uygulamaları, yataklık kalitesi ve besleme gibi yönetsel faktörler kritik rol oynar. Klinik mastitis memede ödem, ağrı ve süt kalitesinde değişimlerle belirginleşirken (Borş ve ark., 2024) subklinik mastitis gözle fark edilmeyip somatik hücre sayısının artışıyla tanınır (>200.000 hücre/ml) (Wang ve ark., 2021). Subklinik mastitis süt veriminde düşüşe ve bileşim kaybına yol açarak hem ekonomik performansı hem de inflamasyonun kronikleşmesi yoluyla fertilitiyi olumsuz etkiler. Nitekim SCC’nin 100.000 hücre/ml üzerine çıktığı durumlarda süt bileşenlerinde belirgin azalma ve verimde düşüş bildirilmiştir (Guner ve ark., 2022).

2.6. Hipokalsemi

Hipokalsemi, laktasyon başlangıcında artan kalsiyum ihtiyacına bağlı olarak gelişen önemli bir metabolik bozukluk olup postpartum ineklerin %40–50’sinde subklinik formda görülmektedir (Grigè ve ark., 2025; Hernandez ve McArt, 2023). Subklinik hipokalsemi genellikle belirti göstermeden ilk 48–72

saatte ortaya çıkmakta ve güç doğum, metritis ve ketozis gibi hastalıkların riskini artırarak fertilitiyi olumsuz etkilemektedir (Couto Serrenho ve ark., 2021; McArt ve Neves, 2020).

Klinik hipokalsemi <1 mmol/L, subklinik hipokalsemi ise çoğunlukla total Ca <2.0 mmol/L olarak tanımlanmaktadır (Hernandez ve McArt, 2023; Ma ve ark., 2022). Persistente, geç başlangıçlı ve geçici olmak üzere üç formu bulunmaktadır (McArt ve Neves, 2020). Hipokalseminin temel nedeni PTH–kalsitriol–kalsitonin yanıtının yetersizliğidir ve düşük Ca düzeyleri uterus kontraksiyonları ile gastrointestinal motiliteyi azaltarak RP, metritis ve ketozisi tetikleyebilmektedir (Berean ve ark., 2025). Risk multipar ineklerde daha yüksektir; persiste hipokalsemi üçüncü laktasyonda %46’ya kadar çıkmaktadır (Caixeta ve ark., 2017). Ayrıca Jersey–Guernsey ırkları ve prepartum yüksek Ca alımı riski artıran faktörlerdir.

2.7. Topallık

Topallık, süt sığırlarında en yaygın görülen sağlık problemlerinden biri olup dünya genelinde ciddi refah sorunlarına ve belirgin ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Yürüyüş bozukluğu, aksama ve hareket isteksizliği ile karakterize olan bu durum, çoğunlukla ayak ve tırnak bölgesindeki ağırlı lezyonlardan kaynaklanmakta ve hayvanın refahını ciddi şekilde düşürmektedir. Süt ineklerinde topallık prevalansı işletme yönetimi, barınak koşulları ve besleme uygulamalarına bağlı olarak %5’ten <50 ’ye kadar değişebilmekte; ortalama olarak herhangi bir zamanda sürüdeki ineklerin yaklaşık dörtte biri total olabilmektedir (Siachos ve ark., 2024; Urban-Chmiel ve ark., 2024).

Topallık, süt ineklerinin sağlığını ve fertilitisini olumsuz etkileyen en önemli hastalıklardan biridir ve sürüden erken çıkarılma nedenlerinin başında gelmektedir. Süt veriminde azalma, hareket kısıtlılığına bağlı yem tüketiminde düşüş, tedavi

masrafları, işgücü gereksinimi ve özellikle reproduktif performanstaki bozulmalar topallığın çiftlik ekonomisi üzerindeki yükünü artırmaktadır (Michelena ve ark., 2025). Topallığın metabolik stres, inflamasyon, ağrı ve enerji dengesine etkileri yoluyla postpartum dönemde siklik aktiviteyi ve fertilitiyi olumsuz etkileyebildiği bilindiğinden, reproduktif performansının değerlendirilmesi gereken çalışmalarda sistemik bir hastalık olarak dikkate alınmalıdır.

3. POSTPARTUM HASTALIKLARIN SİKLİK AKTİVİTE VE FERTİLİTEYE ETKİSİ

Postpartum dönemde görülen klinik ve subklinik hastalıklar, süt ineklerinde fertilitiyi doğrudan ve çok yönlü olarak etkileyen temel faktörlerdir. Uterus enfeksiyonları, metabolik bozukluklar, mastitis ve topallık gibi hastalıklar ovaryum fonksiyonunun yeniden başlamasını geciktirmekte, embriyo gelişimi için gerekli uterus ortamı bozmakta ve gebelik kayıplarını artırmaktadır. Bu nedenle postpartum sağlık durumu, hem ilk tohumlama gebelik oranını hem de gebeliğin devamlılığını belirleyen kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

3.1. Retensiyo sekundaryumun etkileri

Retensiyo sekundaryumun fertilité üzerindeki olumsuz etkileri büyük ölçüde postpartum metritis ve endometritis gibi ikincil uterus enfeksiyonları aracılığıyla ortaya çıkmakta, ayrıca patogenezi tam açıklanmamış doğrudan etkiler de rol oynamaktadır (Gunay ve ark., 2011). RP, uterus involüsyonunu geciktirmekte ve ovaryum aktivitesini baskılamaktadır. Bu nedenle RP geçiren ineklerde postpartum ovaryum fonksiyonlarının yeniden başlaması gecikmekte ve repeat breeder olguları daha sık görülmektedir. Han ve Kim (2005), RP'li ineklerde ilk tohumlamada başarı ve 100. güne kadar gebe kalma

oranlarının belirgin şekilde düşük olduğunu bildirmiştir. Gunay ve ark. (2011) tedavi edilse bile RP geçiren ineklerde ilk tohumlama zamanının 6–8 gün geciktiğini, servis periyodunun 32–41 gün uzadığını ve ilk tohumlama gebelik oranının %16–27’ye düştüğünü göstermiştir.

Bu veriler, RP’nin tedavi sonrası dahi fertilite kaybına yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle RP’den korunma hem metritis insidensinin azaltılması hem de postpartum fertilitenin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Kuru dönem beslenmesinin düzenlenmesi, Se–E vitamini takviyeleri, doğum hijyeninin sağlanması ve güç doğumların önlenmesi temel korunma stratejileri arasında yer almaktadır.

3.2. Metritisin etkileri

Metritis, ovaryum fonksiyonlarını ve uterus ortamını etkileyerek fertiliteyi belirgin şekilde azaltmaktadır. Erken postpartum dönemde metritis gelişen ineklerde dominant folikül daha küçük kalmakta, östradiol ve progesteron düzeyleri düşmekte ve ilk östrus ile ovulasyon gecikmektedir (Seekford ve ark., 2025). Bu nedenle metritisli ineklerde ilk tohumlamada gebelik oranı azalmakta ve servis periyodu uzamaktadır (Giuliodori ve ark., 2013). (Bruinjé ve ark., (2024) da metritis ve diğer uterus hastalıklarında gebelik oranının düşmesi ve gebelik kaybı riskinin artmasıyla bu bulguları desteklemiştir.

Tedavi klinik iyileşmeyi hızlandırırsa da fertilite üzerindeki olumsuz etkilerin tamamen geçmeme ihtimali bulunmaktadır. Birçok çalışmada tedavi edilen ineklerin sonuçlarının sağlıklı ineklere benzer olduğu belirtilse de, gerçek kontrol gruplarının eksikliği iyileşmenin tedaviye mi yoksa doğal toparlanmaya mı bağlı olduğunu belirsiz bırakmaktadır (Haimperl ve Heuwieser, 2014; Merenda ve ark., 2021; Várhidi ve ark., 2024). Bu nedenle klinik olarak toparlanan metritisli ineklerin reproduktif performans yine de dikkatle izlenmelidir.

Metritisin etkileri yalnızca erken dönemde sınırlı kalmayıp, kronik inflamasyon endometritise dönüşebilmekte ve LPS'nin dolaşıma geçmesi oosit kalitesini uzun süreli olarak bozabilmektedir (Pascottini ve ark., 2023). Nitekim enfeksiyon düzeldikten aylar sonra bile granuloza hücrelerinde inflamatuvar yolakların aktif kaldığı ve endometrial değişikliklerin birkaç siklus boyunca sürdüğü bildirilmiştir (Moraes ve ark., 2021; Pereira ve ark., 2025; Ribeiro ve ark., 2016; Sellmer Ramos ve ark., 2023; Silva ve ark., 2024).

3.3. Endometritisin etkileri

Endometritisli ineklerde ovaryum fonksiyonları doğrudan enfeksiyona uğramasa da, uterustaki inflamasyonun HPO eksenini bozması nedeniyle folikül gelişimi yavaşlamakta, östradiol üretimi azalmakta ve ovulasyon gecikmekte ya da sessiz östrus ortaya çıkmaktadır. Klinik olarak da bu durum görülmekte; postpartum 5. haftada endometritis tanısı alan ineklerde 50–75. günler arasında östrus gösterme olasılığı sağlıklı ineklere göre daha düşük bulunmuş, yalnızca %66'sı östrus belirtisi göstermiş ve ilk tohumlamada gebelik oranı yaklaşık %7 daha düşük olduğu belirtilmiştir (Dubuc ve ark., 2010; LeBlanc, 2014).

Endometritis, gebeliğe ulaşma süresini de belirgin biçimde uzatmaktadır. Sağlıklı ineklerde açık gün sayısı 93.6 gün iken, klinik ve subklinik endometritisli ineklerde bu süre sırasıyla 143.9 ve 136.7 güne yükselmiştir. Ayrıca 250. güne kadar gebe kalma olasılığı klinik endometritisli ineklerde 3.6 kat, subklinik endometritisli ineklerde 2.9 kat daha düşük bulunmuştur (Dubuc ve ark., 2011; Paiano ve ark., 2023).

Hastalık yalnızca uterus ortamını değil, oosit ve embriyo kalitesini de olumsuz etkilemektedir. Endometriyal nötrofil oranı yüksek olan ineklerde fertilizasyon oranı %82'den %62'ye düşmüş ve kaliteli embriyo sayısı azalmıştır (Gilbert, 2019). Postpartum uterus hastalığı geçiren ineklerde 7. ve 15. gün

embriyolarının daha küçük ve düşük kaliteli olduğu, ayrıca IFN- τ ve ilişkili gen ekspresyonlarının azaldığı gösterilmiştir (Ribeiro ve ark., 2016). Bu bulgular, endometritisin gelişmekte olan folikülleri etkileyerek sonraki birkaç siklusta dahi fertilitiyi düşüren bir carry-over etkisi oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, endometritis, özellikle subklinik formu, klinik olarak fark edilmesi güç ancak fertilité üzerinde belirgin ve uzun süreli olumsuz etkileri olan bir postpartum hastalıktır. Ovulasyonun gecikmesi, oosit kalitesinin düşmesi, embriyo gelişiminin zayıflaması ve uterusun gebelik sinyallerindeki bozulmalar, bu hastalığın reproduktif performans üzerindeki başlıca mekanizmalarını oluşturmaktadır.

3.4. Purulent vaginal akıntının etkileri

Purulent vaginal akıntının prevalansı süt ineklerinde %10–25 arasında bildirilmekte olup, metritis kadar belirgin belirtiler göstermediği için çoğu sürüde fark edilmeden kalabilmektedir. Oysa PVD, postpartum dönemde uterusunda persiste enfeksiyon veya inflamasyonun göstergesidir ve fertilitiyi anlamlı şekilde olumsuz etkilemektedir. PVD’li ineklerde ilk tohumlamada gebelik oranının %7, 250 gün içinde gebe kalma olasılığının ise %21 daha düşük olması bu etkinin klinik önemini ortaya koymaktadır (Bruinjé ve ark., 2023).

Trueperella pyogenes ve anaerob bakteriler tarafından oluşturulan kronik enfeksiyon, toksin üretimi yoluyla endometriyum bütünlüğünü bozarak embriyonun tutunmasını ve gelişimini engellemektedir. Bu nedenle PVD belirgin klinik bulgu oluşturmaya da sürü bazında önemli fertilité kayıplarına yol açmaktadır. Deneysel bir çalışmada, doğum sonrası uterus içine *E. coli* ve *T. pyogenes* verilerek PVD oluşturulan düvelerde, yaklaşık 94 gün sonra dahi granuloza hücrelerinde proinflatuar gen ekspresyonunun devam ettiği gösterilmiş; bu durum PVD’nin

folikül gelişimi ve oosit kalitesi üzerinde uzun süreli bir taşıyıcı etki oluşturduğunu ortaya koymuştur (Horlock ve ark., 2020).

Sonuç olarak PVD, çoğu zaman gözden kaçan ancak belirgin fertilite kayıplarına neden olan önemli bir postpartum hastalıktır. Bu nedenle düzenli tarama ve etkin tedavi stratejileri, sürü fertilitésinin korunması açısından kritik önem taşımaktadır.

3.5. Postpartum ovaryum fonksiyon bozukluklarının etkileri

Postpartum dönemdeki metabolik ve inflamatuvar bozukluklar, foliküler gelişim ve ovulasyon üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Folikül gelişimi yaklaşık 60 gün sürdüğü için doğum sonrası erken dönemde yaşanan metabolik stres, ileride ovulasyona aday foliküllerin erken büyüme evresine denk gelmekte ve sonraki sikluslarda ovulasyon başarısızlığına neden olabilmektedir (Britt, 1992; Roche ve ark., 2017). Uterus involüsyonu ve laktasyonun enerji gereksinimi; vücut kondisyon kaybı, NEFA ve BHB artışı ve karaciğer yağlanması gibi değişikliklerle hem ilk ovulasyonu geciktirmekte hem de foliküler gelişimi olumsuz etkilemektedir (Roche ve ark., 2017).

Metabolik stresin yanı sıra enfeksiyon ve inflamasyon da anovulasyonun önemli nedenlerindendir. Uterus enfeksiyonuna bağlı LPS dolaşıma geçerek ovaryumda inflamatuvar yanıt oluşturmakta, steroidogenezi baskılayarak folikül gelişimini yavaşlatmaktadır (Bruinje ve LeBlanc, 2025; Gilbert, 2019; Price ve Sheldon, 2013). Enfekte ineklerde baskın folikülün daha küçük ve östradiol düzeylerinin düşük bulunması bu etkiyi doğrulamaktadır (Sheldon ve ark., 2002). Ayrıca LPS'nin LH yükselişini baskılayarak ovulasyonu engellediği gösterilmiştir (Bruinje ve LeBlanc, 2025). Proinflamatuvar sitokinlerin hipotalamik kisspeptin-GnRH-LH eksenini baskılaması da sessiz östrus ve anovulasyon gelişimine katkıda bulunmaktadır (Magata ve ark., 2023).

Ovulasyonun gerçekleşmesi baskın folikülün hormonal yanıt verebilirliğine bağlıdır. Monteiro ve ark. (2021), folikül çapına göre LH salınım aktivitesinin değiştiğini ve ≥ 18 mm foliküllerde LH dalgalanmasının kaybolduğunu, ovulasyonun gerçekleşmediğini bildirmiştir. Postpartum inflamasyonun luteal fonksiyonu da etkilediği; sistemik inflamasyon bulguları ve endometritis gelişen ineklerde ilk ovulasyonun geciktiği ve uzun luteal faz görülme olasılığının arttığı gösterilmiştir (Bruinje ve ark., 2024). Bu bulgular, postpartum metabolik ve inflamatuvar stresin hem foliküler gelişimi hem de CL fonksiyonunu bozarak anovulasyon riskini artırdığını ortaya koymaktadır.

3.6. Ketozisin etkileri

Postpartum NED ve ketozis, insülin ve IGF-1 düzeylerinin düşmesi, GH artışı ve lipomobilizasyonun hızlanması yoluyla foliküler gelişimi yavaşlatmakta ve ilk ovulasyonu geciktirmektedir (Sammad ve ark., 2022). NED şiddeti arttıkça postpartum ilk östrus süresinin uzadığı da gösterilmiştir (Walsh ve ark., 2011). Artan NEFA ve BHB yalnızca sistemik metabolizmayı etkilemekle kalmayıp, folikül sıvısının biyokimyasal yapısını değiştirerek oosit bütünlüğünü bozmakta ve embriyonik gelişimi zayıflatmaktadır; ketozisli ineklerde oosit fertilizasyonu ve blastosist gelişiminin belirgin şekilde düşük bulunması bu durumu desteklemektedir (Alemu, 2024; Zhang ve ark., 2023).

Erken postpartum dönemde yüksek BHB düzeyleri hem ovaryum aktivitesinin başlamasını geciktirmekte hem de gebelik ihtimalini azaltmaktadır. İlk hafta BHB > 1.4 mmol/L olan ineklerde 60. güne kadar gebe kalma olasılığı %25 daha düşüktür (Ospina ve ark., 2010). Postpartum 15. gündeki yüksek BHB düzeyleri ise östrus tespit edilme olasılığını azaltarak sessiz östrus riskini artırmaktadır; ayrıca yüksek haptoglobin ve BHB düzeyine sahip ineklerde ilk tohumlamada gebelik oranı anlamlı

şekilde düşüktür (Bruinjé ve ark., 2023). Bu bulgular, metabolik stres ile inflamasyonun postpartum dönemde birbirini güçlendiren süreçler olduğunu göstermektedir.

Doğumdan sonraki 5–7 haftada yem alımının yetersiz kalmasıyla gelişen enerji açığı, ovaryum aktivitesinin yeniden başlamasını geciktirip uterus sağlığını bozarak embriyonik kayıpları artırabilmektedir. Bu nedenle geçiş dönemi yönetimi enerji metabolizmasının stabilizasyonu ve immün fonksiyonun desteklenmesine odaklanmalıdır (Bruinjé ve LeBlanc, 2024; LeBlanc, 2023). Glukojenik rasyonlar insülini artırarak ovaryum fonksiyonlarını destekleyebilse de aşırı insülin yanıtının oosit kalitesi ve embriyo gelişimi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği unutulmamalıdır (Lemley ve ark., 2008; Pascottini ve ark., 2025; Vanholder ve ark., 2005).

3.7. Mastitisin etkileri

Mastitis, postpartum dönemde fertilitiyi çok yönlü olarak etkileyen sistemik inflamatuvar bir hastalıktır. TNF- α , IL-1 β ve IL-6 gibi sitokinlerin artışı GnRH–LH–FSH salınımını baskılayarak foliküler gelişimi yavaşlatmakta; NO ve PGF $_{2\alpha}$ üretiminin yükselmesi ise ovaryum fonksiyonlarını olumsuz etkilemektedir (Sheldon ve ark., 2008; Wang ve ark., 2021; Yadav ve Belbase, 2025). PGF $_{2\alpha}$ artışı luteal regresyonu hızlandırarak progesteron düzeylerini düşürmekte gebeliğin devamını riske atmaktadır (Borş ve ark., 2023; Weems ve ark., 2006). Bu süreç sessiz östrus, anovulasyon ve düzensiz folikül gelişimi gibi reproduktif bozukluklara zemin hazırlamaktadır (Lembovičiūtė ve ark., 2025).

Mastitisle ilişkili hipertermi infertiliteye katkıda bulunan ikinci önemli mekanizmadır. Koliform mastitis olgularında vücut sıcaklığının 40–41°C'ye çıkması oositlerde mitokondriyal hasarı ve apoptosis riskini artırmakta; yalnızca 0.5°C'lik ısı artışının bile erken embriyonik kayıp olasılığını yükselttiği gösterilmiştir

(Wang ve ark., 2021; Yadav ve Belbase, 2025). Ayrıca inflamasyona bağlı reaktif oksijen türleri folikül sıvısında oksidatif stres oluşturarak oosit bütünlüğünü ve embriyo canlılığını bozmakta ve fertilizasyon başarısını azaltmaktadır (Borş ve ark., 2024).

Subklinik mastitis de benzer mekanizmalarla fertilité kaybına yol açar. Foliküler östradiol düzeylerinin düşmesi LH pikini zayıflatmakta ve ovulasyonun gecikmesine ya da gerçekleşmemesine neden olmaktadır; bu durum oosit yaşlanması ve düşük fertilizasyon kapasitesiyle ilişkilidir (Wang ve ark., 2021; Wolfenson ve ark., 2015). Saha çalışmalarında mastitisli ineklerde gebelik kaybının arttığı, ilk tohumlamada gebelik oranının düştüğü ve ovulasyon süresinin 30 saatten 60 saate kadar uzayabildiği gösterilmiştir (Borş ve ark., 2024; Chebel ve ark., 2004; Lavon ve ark., 2011). Mastitis ayrıca morula gelişimini ve implantasyon öncesi embriyo gelişimini de olumsuz etkiler (Ribeiro ve ark., 2016). Ek olarak, mastitisli ineklerde artmış kortizol düzeyleri foliküler gelişimi baskılamakta; gebelik döneminde yüksek SCC'ye sahip annelerin dişi yavrularında daha düşük AMH düzeyleri ve zayıf fertilité bildirilmesi ise hastalığın etkilerinin bir sonraki jenerasyona dahi yansiyebileceğini göstermektedir (İbrahim ve ark., 2023; Sadeghi ve ark., 2023).

3.8. Hipokalseminin etkileri

Hipokalsemi, kalsiyuma bağlı uterus kontraksiyonları ve ovarium fonksiyonlarının bozulması nedeniyle uterus involüsyonunun gecikmesine, folikül gelişiminin yavaşlamasına ve ovulasyonun ertelenmesine yol açmaktadır. Düşük serum kalsiyumu ilk tohumlama gebelik şansını azaltmakta, gebeliğe ulaşma süresini uzatmakta ve endometriyal iyileşmeyi geciktirmektedir (Paiano ve ark., 2023; Venjakob ve ark., 2018). Persisten subklinik hipokalsemide östrusa dönüş gecikmekte; doğum sonrası 4. günde hipokalsemisi bulunan ineklerde ilk

tohumlama gebelik oranı %25 daha düşük bildirilmektedir (Caixeta ve ark., 2017; Seely ve McArt, 2023).

Hipokalsemi aynı zamanda RP, metritis ve ketozis gibi ikincil hastalıkların riskini 3–5 kat artırarak involüsyonun gecikmesi, metabolik stresin derinleşmesi ve hormonal dengenin bozulması yoluyla fertilitiyi dolaylı olarak da azaltmaktadır (McArt ve Neves, 2020; Rodríguez ve ark., 2017). Sonuç olarak postpartum hipokalsemi; düşük ilk tohumlama gebelik oranı, gecikmiş ovulasyon ve uzamış gebeliğe ulaşma süresi ile karakterize olup, erken postpartum kalsiyum dengesinin korunması reproduktif performans için kritik önem taşımaktadır.

3.9. Topallığın etkileri

Topallık, ağrıya bağlı stres ve inflamasyonun HPO eksenini baskılamasıyla reproduktif hormon dengesini bozarak ovaryum aktivitesini yavaşlatan önemli bir postpartum sağlık sorunudur. Hareket kısıtlılığı östrus davranışlarını zayıflatarak tohumlama zamanının kaçırılmasına, iştah azalması ise NED’in derinleşmesine yol açmaktadır. Bu süreç foliküler gelişimi ve luteal fonksiyonu olumsuz etkileyerek gebelik oranlarını düşürmekte; ayrıca total ineklerde uterus enfeksiyonları ve gecikmiş involüsyon daha sık görülmektedir (Hernandez ve ark., 2001; Logroño ve ark., 2021; Melendez ve ark., 2003; Tsousis ve ark., 2022).

Topallığın fertilité üzerindeki etkisi birçok çalışmada doğrulanmıştır. Total ineklerde günlük gebe kalma olasılığı yaklaşık %22 azalmakta, gebe kalma süresi ortalama 12 gün uzamakta; ağır topallıkta gebelik oranları %10–17.5’e gerilemektedir (Alawneh ve ark., 2011; Hernandez ve ark., 2001; Melendez ve ark., 2003). Gebelik için gereken tohumlama sayısı ciddi vakalarda 7’nin üzerine çıkabilmekte ve gebe kalma süresi 12–66 gün kadar uzayabilmektedir (Garvey, 2022; Vilés ve ark., 2024). Topallığın doğum sonrası ilk 30–60 günde ortaya çıkması

ovaryum kisti insidansını ve gebelik kaybı riskini artırmakta; klinik iyileşme sağlansa bile fertilite kaybının aylarca devam edebildiği bildirilmiştir (Logroño ve ark., 2021; Melendez ve ark., 2003; Praxitelous ve ark., 2023).

4. SONUÇ

Süt ineklerinde postpartum dönem, metabolik adaptasyon ile uterus ve ovaryum fonksiyonlarının yeniden düzenlendiği kritik bir süreç olup, RP, metritis, endometritis, PVD, ketozis, hipokalsemi, mastitis ve topallık gibi hastalıklar çoğunlukla birlikte görülerek siklik aktivitenin gecikmesine, oosit-embriyo kalitesinin azalmasına, östrus davranışlarının zayıflamasına ve gebelik oranlarının düşmesine neden olmaktadır. Enfeksiyöz hastalıklar uterusu iyileşmeyi yavaşlatırken sistemik inflamasyon yoluyla HPO eksenini baskılamakta; metabolik bozukluklar ise enerji yetersizliği ve hormonal dengesizlik nedeniyle ilk ovulasyonu geciktirmektedir. Bu nedenle postpartum hastalıklar gebelik oranını azaltmakta, servis periyodunu uzatmakta ve embriyonik kayıpları artırmaktadır. Etkin postpartum yönetim, metabolik dengenin sağlanması ve enfeksiyonların erken kontrolü yüksek fertilite için gereklidir.

KAYNAKÇA

- Alawneh, J. I., Laven, R. A., & Stevenson, M. A. (2011). The effect of lameness on the fertility of dairy cattle in a seasonally breeding pasture-based system. *Journal of Dairy Science*, 94(11), 5487–5493. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4395>
- Alemu, W.T. (2024). *Effect of ketosis on fertility of lactating dairy cows*. PhD thesis, McGill University (Canada).
- Berean, D. I., Bogdan, L. M., & Cimpean, R. (2025). Subclinical hypocalcemia in dairy cows: reproductive and economic impacts on Eastern European farms. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1596239. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1596239>
- Borş, A., Borş, S.-I., & Floriştian, V.-C. (2024). Mastitis impact on high-yielding dairy farm's reproduction and net present value. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1345782. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1345782>
- Britt, J. H. (1992). Influence of Nutrition and Weight Loss on Reproduction and Early Embryonic Death in Cattle. *American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings*, 143–148. <https://doi.org/10.21423/aabppro19926507>
- Bruinjé, T.C., & LeBlanc, S.J. (2024). Graduate Student Literature Review: Implications of transition cow health for reproductive function and targeted reproductive management. *Journal of Dairy Science*, 107(10), 8234–8246. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24562>
- Bruinjé, T.C., Morrison, E. I., Ribeiro, E. S., Renaud, D. L., Couto Serrenho, R., & LeBlanc, S. J. (2023). Postpartum health is associated with detection of estrus by activity monitors and reproductive performance in dairy cows.

- Journal of Dairy Science*, 106(12), 9451–9473.
<https://doi.org/10.3168/jds.2023-23268>
- Bruinjé, T.C., Morrison, E. I., Ribeiro, E. S., Renaud, D. L., & LeBlanc, S. J. (2024). Associations of inflammatory and reproductive tract disorders postpartum with pregnancy and early pregnancy loss in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 107(3), 1630–1644.
<https://doi.org/10.3168/jds.2023-23976>
- Bruinjé, Tony C., & LeBlanc, S. J. (2025). Invited Review: Inflammation and Health in the Transition Period Influence Reproductive Function in Dairy Cows. *Animals*, 15(5), 633. <https://doi.org/10.3390/ani15050633>
- Caixeta, L. S., Ospina, P. A., Capel, M. B., & Nydam, D. V. (2017). Association between subclinical hypocalcemia in the first 3 days of lactation and reproductive performance of dairy cows. *Theriogenology*, 94, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.01.039>
- Carvalho, M. R., Peñagaricano, F., Santos, J. E. P., DeVries, T. J., McBride, B. W., & Ribeiro, E. S. (2019). Long-term effects of postpartum clinical disease on milk production, reproduction, and culling of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 102(12), 11701–11717.
<https://doi.org/10.3168/jds.2019-17025>
- Chebel, R. C., Santos, J. E. P., Reynolds, J. P., Cerri, R. L. A., Juchem, S. O., & Overton, M. (2004). Factors affecting conception rate after artificial insemination and pregnancy loss in lactating dairy cows. *Animal Reproduction Science*, 84(3–4), 239–255.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2003.12.012>
- Couto Serrenho, R., DeVries, T. J., Duffield, T. F., & LeBlanc, Stephen. J. (2021). Graduate Student Literature Review:

- What do we know about the effects of clinical and subclinical hypocalcemia on health and performance of dairy cows? *Journal of Dairy Science*, 104(5), 6304–6326. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19371>
- Deguille, L., Geffré, A., Desquilbet, L., Dizien, A., Thoumire, S., Vornière, C., ... Chastant-Maillard, S. (2012). Effect of endocervical inflammation on days to conception in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 95(4), 1776–1783. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4602>
- Dubuc, J., & Denis-Robichaud, J. (2017). A dairy herd-level study of postpartum diseases and their association with reproductive performance and culling. *Journal of Dairy Science*, 100(4), 3068–3078. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12144>
- Dubuc, J., Duffield, T. F., Leslie, K. E., Walton, J. S., & LeBlanc, S. J. (2010). Definitions and diagnosis of postpartum endometritis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 93(11), 5225–5233. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3428>
- Dubuc, J., Duffield, T. F., Leslie, K. E., Walton, J. S., & LeBlanc, S. J. (2011). Effects of postpartum uterine diseases on milk production and culling in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94(3), 1339–1346. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3758>
- Galvão, K. N. (2012). Postpartum uterine diseases in dairy cows. *Animal Reproduction*, (9), 290–296.
- Garvey, M. (2022). Lameness in Dairy Cow Herds: Disease Aetiology, Prevention and Management. *Dairy*, 3(1), 199–210. <https://doi.org/10.3390/dairy3010016>
- Gilbert, R. O. (2019). Symposium review: Mechanisms of disruption of fertility by infectious diseases of the

- reproductive tract. *Journal of Dairy Science*, 102(4), 3754–3765. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15602>
- Giuliodori, M. J., Magnasco, R. P., Becu-Villalobos, D., Lacau-Mengido, I. M., Risco, C. A., & de la Sota, R. L. (2013). Clinical endometritis in an Argentinean herd of dairy cows: Risk factors and reproductive efficiency. *Journal of Dairy Science*, 96(1), 210–218. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5682>
- Grigè, S., Girdauskaitė, A., Anskienė, L., Rodaitė, I., Ginkus, E., Džermeikaitė, K., ... Antanaitis, R. (2025). Subclinical Hypocalcemia in Dairy Cows: An Integrative Evaluation of Blood Biomarkers, In-Line Milk Composition, and Rumination Behavior. *Life*, 15(12), 1810. <https://doi.org/10.3390/life15121810>
- Gunay, A., Gunay, U., & Orman, A. (2011). Effects of retained placenta on the fertility in treated dairy cows. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 1(17), 126–131.
- Guner, B., Ozturk, B., Erkan, A., Erturk, M., Ucan, N., & Keskin, A. (2024). Distribution of bacterial pathogens and antimicrobial resistance in cows with clinical mastitis in a dairy farm, Türkiye. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 75(3), 7675–7684. <https://doi.org/10.12681/jhvms.33819>
- Guner, Baris, Erkan, A. A., Ozturk, B., Sarikaya, O., Tekin, O. K., Tosun, E., & Gencoglu, H. (2025). Subclinical Ketosis: Reproductive Performance and Milk Yield in Dairy Cows Receiving Oral Glucogenic Precursors During Early Postpartum Period. *Veterinary Medicine and Science*, 11(5), e70563. <https://doi.org/10.1002/VMS3.70563>

- Guner, Baris, Erturk, M., Tavsanlı, H., & Guner, T. E. (2022). The effect of somatic cell count on milk yield and milk composition on day seven postpartum in cows. *Veterinarski Arhiv*, 92(2), 145–153. <https://doi.org/10.24099/vet.arhiv.1421>
- Haimperl, P., & Heuwieser, W. (2014). Invited review: Antibiotic treatment of metritis in dairy cows: A systematic approach. *Journal of Dairy Science*, 97(11), 6649–6661. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8462>
- Han, Y.-K., & Kim, I.-H. (2005). Risk factors for retained placenta and the effect of retained placenta on the occurrence of postpartum diseases and subsequent reproductive performance in dairy cows. In *Journal Veterinary Science*. 6(1):53-9.
- Hernandez, J., Shearer, J. K., & Webb, D. W. (2001). Effect of lameness on the calving-to-conception interval in dairy cows. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 218(10), 1611–1614. <https://doi.org/10.2460/javma.2001.218.1611>
- Hernandez, L. L., & McArt, J. A. A. (2023). Perspective: Transient postparturient hypocalcemia—A lactation-induced phenomenon of high-producing dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 106(12), 8177–8180. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23355>
- Horlock, A. D., Piersanti, R. L., Ramirez-Hernandez, R., Yu, F., Ma, Z., Jeong, K. C., ... Sheldon, I. M. (2020). Uterine infection alters the transcriptome of the bovine reproductive tract three months later. *Reproduction*, 160(1), 93–107. <https://doi.org/10.1530/REP-19-0564>
- Ibrahim, N., Regassa, F., Yilma, T., & Tolosa, T. (2023). Impact of subclinical mastitis on uterine health, reproductive

- performances and hormonal profile of Zebu × Friesian crossbred dairy cows in and around Jimma town dairy farms, Ethiopia. *Heliyon*, 9(6), e16793. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16793>
- Lavon, Y., Ezra, E., Leitner, G., & Wolfenson, D. (2011). Association of conception rate with pattern and level of somatic cell count elevation relative to time of insemination in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94(9), 4538–4545. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4293>
- LeBlanc, S.J. (2014). Reproductive tract inflammatory disease in postpartum dairy cows. *Animal*, 8(SUPPL. 1), 54–63. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000524>
- LeBlanc, Stephen J. (2008). Postpartum uterine disease and dairy herd reproductive performance: A review. *The Veterinary Journal*, 176(1), 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.019>
- LeBlanc, Stephen J. (2023). Review: Postpartum reproductive disease and fertility in dairy cows. *Animal*, 17, 100781. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100781>
- Lembovičiūtė, G., Šertvytytė, G., Antanaitis, R., Žilaitis, V., Baumgartner, W., & Rutkauskas, A. (2025). Evaluating the Impact of Clinical Mastitis on Ovarian Morphometry and the Effectiveness of the Synchronisation Protocol in Dairy Cows. *Animals*, 15(15), 2215. <https://doi.org/10.3390/ani15152215>
- Lemley, C. O., Butler, S. T., Butler, W. R., & Wilson, M. E. (2008). Short Communication: Insulin Alters Hepatic Progesterone Catabolic Enzymes Cytochrome P450 2C and 3A in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 641–645. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0636>

- Logroño, J. C., Rearte, R., Corva, S. G., Domínguez, G. A., de la Sota, R. L., Madoz, L. V., & Giuliadori, M. J. (2021). Lameness in Early Lactation Is Associated with Lower Productive and Reproductive Performance in a Herd of Supplemented Grazing Dairy Cows. *Animals* 2021, Vol. 11, Page 2294, 11(8), 2294. <https://doi.org/10.3390/ANI11082294>
- Ma, X., Gao, C., Yang, M., Zhang, B., Xu, C., & Yang, W. (2022). Characteristics and prediction of subclinical hypocalcemia in dairy cows during the transition period using blood analytes. *Medycyna Weterynaryjna*, 78(01), 6607–2022. <https://doi.org/10.21521/mw.6607>
- Magata, F., Tsukamura, H., & Matsuda, F. (2023). The impact of inflammatory stress on hypothalamic kisspeptin neurons: Mechanisms underlying inflammation-associated infertility in humans and domestic animals. *Peptides*, 162, 170958. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2023.170958>
- McArt, J. A. A., & Neves, R. C. (2020). Association of transient, persistent, or delayed subclinical hypocalcemia with early lactation disease, removal, and milk yield in Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 103(1), 690–701. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17191>
- Melendez, P., Bartolome, J., Archbald, L. F., & Donovan, A. (2003). The association between lameness, ovarian cysts and fertility in lactating dairy cows. *Theriogenology*, 59(3–4), 927–937. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(02\)01152-4](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(02)01152-4)
- Merenda, V. R., Lezier, D., Odetti, A., Figueiredo, C. C., Risco, C. A., Bisinotto, R. S., & Chebel, R. C. (2021). Effects of metritis treatment strategies on health, behavior, reproductive, and productive responses of Holstein cows.

- Journal of Dairy Science*, 104(2), 2056–2073.
<https://doi.org/10.3168/jds.2020-19076>
- Michelena, Á., Fontenla-Romero, Ó., & Luis Calvo-Rolle, J. (2025). A review and future trends of precision livestock over dairy and beef cow cattle with artificial intelligence. *Logic Journal of the IGPL*, 33(4).
<https://doi.org/10.1093/jigpal/jzae111>
- Monteiro, P. L. J., Gonzales, B., Drum, J. N., Santos, J. E. P., Wiltbank, M. C., & Sartori, R. (2021). Prevalence and risk factors related to anovular phenotypes in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 2369–2383.
<https://doi.org/10.3168/jds.2020-18828>
- Moraes, J. G. N., Silva, P. R. B., Mendonça, L. G. D., Okada, C. T. C., & Chebel, R. C. (2021). Risk factors for purulent vaginal discharge and its association with reproductive performance of lactating Jersey cows. *Journal of Dairy Science*, 104(12), 12816–12829.
<https://doi.org/10.3168/jds.2021-20502>
- Ospina, P. A., Nydam, D. V., Stokol, T., & Overton, T. R. (2010). Evaluation of nonesterified fatty acids and β -hydroxybutyrate in transition dairy cattle in the northeastern United States: Critical thresholds for prediction of clinical diseases. *Journal of Dairy Science*, 93(2), 546–554. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2277>
- Paiano, R. B., Bonilla, J., Pugliesi, G., Moreno, A. M., & Baruselli, P. S. (2023). Evaluation of clinical and subclinical endometritis impacts on the reproductive performance and milk production of dairy cows in Brazilian herds. *Reproduction in Domestic Animals*, 58(3), 414–422. <https://doi.org/10.1111/rda.14301>

- Pascottini, B. O., LeBlanc, S. J., Gnemi, G., Leroy, J. L. M. R., & Opsomer, G. (2023). Genesis of clinical and subclinical endometritis in dairy cows. *Reproduction*, 166(2), R15–R24. <https://doi.org/10.1530/REP-22-0452>
- Pascottini, O. B., Crowe, A. D., Ramil, U. Y., Hostens, M., Opsomer, G., & Crowe, M. A. (2025). Perspectives in cattle reproduction for the next 20 years – A European context. *Theriogenology*, 233, 8–23. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.11.007>
- Pascottini, O. B., Leroy, J. L. M. R., ve Opsomer, G. (2020). Metabolic Stress in the Transition Period of Dairy Cows: Focusing on the Prepartum Period. *Animals*, 10(8), 1419. <https://doi.org/10.3390/ani10081419>
- Pereira, F. N. S., de Oliveira, E. B., Merenda, V. R., Lima, F. S., Chebel, R. C., Galvão, K. N., ... Figueiredo, C. C. (2025). Differences in reproductive and productive performance and removal from the herd associated with time to clinical cure in dairy cows treated for metritis. *Journal of Dairy Science*. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27395>
- Pinedo, P., Santos, J. E. P., Chebel, R. C., Galvão, K. N., Schuenemann, G. M., Bicalho, R. C., ... Thatcher, W. W. (2020). Early-lactation diseases and fertility in 2 seasons of calving across US dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 103(11), 10560–10576. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17951>
- Praxitelous, A., Katsoulos, P. D., Tsaousioti, A., Brozos, C., Theodosiadou, E. K., Boscós, C. M., & Tsousis, G. (2023). Ovarian and Energy Status in Lame Dairy Cows at Puerperium and Their Responsiveness in Protocols for the Synchronization of Ovulation. *Animals*, 13(9), 1537. <https://doi.org/10.3390/ani13091537>

- Price, J. C., & Sheldon, I. M. (2013). Granulosa Cells from Emerged Antral Follicles of the Bovine Ovary Initiate Inflammation in Response to Bacterial Pathogen-Associated Molecular Patterns via Toll-Like Receptor Pathways1. *Biology of Reproduction*, 89(5). <https://doi.org/10.1095/biolreprod.113.110965>
- Ribeiro, E. S., Gomes, G., Greco, L. F., Cerri, R. L. A., Vieira-Neto, A., Monteiro, P. L. J., ... Santos, J. E. P. (2016). Carryover effect of postpartum inflammatory diseases on developmental biology and fertility in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 2201–2220. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10337>
- Ribeiro, E. S., Lima, F. S., Greco, L. F., Bisinotto, R. S., Monteiro, A. P. A., Favoreto, M., ... Santos, J. E. P. (2013). Prevalence of periparturient diseases and effects on fertility of seasonally calving grazing dairy cows supplemented with concentrates. *Journal of Dairy Science*, 96(9), 5682–5697. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6335>
- Roche, J. R., Burke, C. R., Crookenden, M. A., Heiser, A., Loor, J. L., Meier, S., ... Turner, S.-A. (2017). Fertility and the transition dairy cow. *Reproduction, Fertility and Development*, 30(1), 85–100. <https://doi.org/10.1071/RD17412>
- Rodríguez, E. M., Arís, A., & Bach, A. (2017). Associations between subclinical hypocalcemia and postparturient diseases in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(9), 7427–7434. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12210>
- Sadeghi, H., Gharagozlou, F., Vojgani, M., Mobedi, E., Bafandeh, M., & Akbarinejad, V. (2023). Evidence that elevation of maternal somatic cell count could lead to production of offspring with inferior reproductive and

- productive performance in dairy cows during the first lactation period. *Theriogenology*, 200, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.02.002>
- Sammad, A., Khan, M. Z., Abbas, Z., Hu, L., Ullah, Q., Wang, Y., ... Wang, Y. (2022). Major Nutritional Metabolic Alterations Influencing the Reproductive System of Postpartum Dairy Cows. *Metabolites*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/metabo12010060>
- Seekford, Z. K., Tariq, A., Macay, G. A., Jenkins, K. M., Dickson, M. J., Melo, G. D., ... Bromfield, J. J. (2025). Uterine disease in dairy cows is associated with contemporaneous perturbations to ovarian function. *Theriogenology*, 232, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.10.028>
- Seely, C. R., & McArt, J. A. A. (2023). The association of subclinical hypocalcemia at 4 days in milk with reproductive outcomes in multiparous Holstein cows. *JDS Communications*, 4(2), 111–115. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0279>
- Sellmer Ramos, I., Moraes, J. G. N., Caldeira, M. O., Poock, S. E., Spencer, T. E., & Lucy, M. C. (2023). Impact of postpartum metritis on the regeneration of endometrial glands in dairy cows. *JDS Communications*, 4(5), 400–405. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0338>
- Sheehy, M. R., Fahey, A. G., Aungier, S. P. M., Carter, F., Crowe, M. A., & Mulligan, F. J. (2017). A comparison of serum metabolic and production profiles of dairy cows that maintained or lost body condition 15 days before calving. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 536–547. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11206>

- Sheldon, I. M., Lewis, G. S., LeBlanc, S., & Gilbert, R. O. (2006). Defining postpartum uterine disease in cattle. *Theriogenology*, 65(8), 1516–1530. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.08.021>
- Sheldon, I. M., & Owens, S. E. (2017). Postpartum uterine infection and endometritis in dairy cattle. *Animal Reproduction*, 14(3), 622–629. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1006>
- Sheldon, I. M., Williams, E. J., Miller, A. N. A., Nash, D. M., & Herath, S. (2008). Uterine diseases in cattle after parturition. *The Veterinary Journal*, 176(1), 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.031>
- Sheldon, I., Noakes, D., Rycroft, A., Pfeiffer, D., & Dobson, H. (2002). Influence of uterine bacterial contamination after parturition on ovarian dominant follicle selection and follicle growth and function in cattle. *Reproduction*, 123(6), 837–845. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1230837>
- Siachos, N., Neary, J. M., Smith, R. F., & Oikonomou, G. (2024). Automated dairy cattle lameness detection utilizing the power of artificial intelligence; current status quo and future research opportunities. *The Veterinary Journal*, 304, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2024.106091>
- Silva, J. C. C., Caldeira, M. O., Moraes, J. G. N., Sellmer Ramos, I., Gull, T., Ericsson, A. C., ... Lucy, M. C. (2024). Metritis and the uterine disease microbiome are associated with long-term changes in the endometrium of dairy cows. *Biology of Reproduction*, 111(2), 332–350. <https://doi.org/10.1093/biolre/ioae067>
- Tsousis, G., Boscós, C., & Praxitelous, A. (2022). The negative impact of lameness on dairy cow reproduction.

- Reproduction in Domestic Animals*, 57(S4), 33–39.
<https://doi.org/10.1111/rda.14210>
- Urban-Chmiel, R., Mudroň, P., Abramowicz, B., Kurek, Ł., & Stachura, R. (2024). Lameness in Cattle—Etiopathogenesis, Prevention and Treatment. *Animals*, 14(12), 1836. <https://doi.org/10.3390/ani14121836>
- Vanholder, T., Leroy, J., Dewulf, J., Duchateau, L., Coryn, M., de Kruif, A., & Opsomer, G. (2005). Hormonal and Metabolic Profiles of High-yielding Dairy Cows Prior to Ovarian Cyst formation or First Ovulation Post Partum. *Reproduction in Domestic Animals*, 40(5), 460–467. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2005.00601.x>
- Várhidi, Z., Csikó, G., Bajcsy, Á. C., & Jurkovich, V. (2024). Uterine Disease in Dairy Cows: A Comprehensive Review Highlighting New Research Areas. *Veterinary Sciences*, 11(2), 66. <https://doi.org/10.3390/vetsci11020066>
- Venjakob, P. L., Pieper, L., Heuwieser, W., & Borchardt, S. (2018). Association of postpartum hypocalcemia with early-lactation milk yield, reproductive performance, and culling in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(10), 9396–9405. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14202>
- Vilés, K., García, A., Rugel, O., & Jorgge, N. (2024). Locomotion Score and Postpartum Conception in Jersey Cows Raised under Hot–Humid Tropical Conditions: A Prospective Study. *Veterinary Sciences*, 11(3), 102. <https://doi.org/10.3390/vetsci11030102>
- Walsh, S. W., Williams, E. J., & Evans, A. C. O. (2011). A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. *Animal Reproduction Science*, 123(3–4), 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.12.001>

- Wang, N., Zhou, C., Basang, W., Zhu, Y., Wang, X., Li, C., ... Zhou, X. (2021). Mechanisms by which mastitis affects reproduction in dairy cow: A review. *Reproduction in Domestic Animals*, 56(9), 1165–1175. <https://doi.org/10.1111/rda.13953>
- Weems, C. W., Weems, Y. S., & Randel, R. D. (2006). Prostaglandins and reproduction in female farm animals. *The Veterinary Journal*, 171(2), 206–228. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2004.11.014>
- Wolfenson, D., Leitner, G., & Lavon, Y. (2015). The Disruptive Effects of Mastitis on Reproduction and Fertility in Dairy Cows. *Italian Journal of Animal Science*, 14(4), 4125. <https://doi.org/10.4081/ijas.2015.4125>
- Yadav, S., & Belbase, S. (2025). Mastitis and Reproductive Complication in Dairy Cattle: A Comprehensive Review. *Asian Journal of Research in Animal and Veterinary Sciences*, 8(4), 502–516. <https://doi.org/10.9734/ajravs/2025/v8i4378>
- Zhang, K.-Y., Guo, J., Zhan, C.-L., Yuan, C.-S., Min, C.-G., Li, Z.-Q., ... Ma, X. (2023). β -hydroxybutyrate impairs bovine oocyte maturation via pyruvate dehydrogenase (PDH) associated energy metabolism abnormality. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1243243. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1243243>

RUMİNANT BESLEMEDE BİYOYAKIT YAN ÜRÜNLERİ: TOLERANS VE TOKSİKOLOJİ PERSPEKTİFİ

Oğuz Koray BACAKSIZ¹

Murat ÇELEBİ²

1. GİRİŞ

Günümüzde karbon bazlı fosil yakıtların olumsuz etkileri, iklim değişikliği sürecinde alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Rezaei ve ark., 2025). Bu alternatiflerden biri olan biyoyakıt endüstrisi, küresel ölçekte hızla gelişmekte ve büyük hacimlerde yan ürün oluşumuna yol açmaktadır. Söz konusu yan ürünlerin hayvan beslemede değerlendirilmesi ise güncel ve önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Özellikle biyoetanol ve biyodizel üretimi sırasında ortaya çıkan distillers dried grains with solubles (DDGS), ham gliserol, yağlı tohum küspeleri ve çeşitli fermentasyon kalıntıları; ruminantların lif yapılarını sindirebilme kapasitesi ve geniş mikrobiyal aktivitesi sayesinde alternatif yem kaynakları olarak dikkat çekmektedir (Yan ve ark., 2025).

Bununla birlikte, bu yan ürünlerin üretim koşulları, hammaddenin niteliği ve kullanılan işleme teknolojilerindeki değişkenlik, ruminantlarda kalıntıların izlenmesini ve toksikolojik açıdan değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ruminantlar, rumende gerçekleşen mikrobiyal fermentasyon

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Savaştepe Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, ORCID: 0000-0002-4139-0899.

² Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Savaştepe Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, ORCID: 0000-0002-1769-2512.

aracılığıyla birçok anti-besinsel faktörü belirli düzeylere kadar detoksifiye edebilse de biyoyakıt yan ürünlerinde mikotoksin konsantrasyonunun artması, ağır metal kalıntıları, serbest yağ asitleri, metanol artıkları, glukosinolatlar ve diğer anti-besinsel bileşenler bu süreci olumsuz etkileyerek sağlık risklerine yol açabilmektedir (Zhang ve Caupert, 2012).

Bu çalışmada, biyoyakıt endüstrisi sonucunda ortaya çıkan yan ürünlerin hayvan besleme uygulamalarındaki kullanım alanları ile bu kullanımın hayvansal dokularda oluşturabileceği kalıntılar ve tolerans sınırlarına ilişkin güncel bilgilerin sunulması amaçlanmıştır.

2. BİYOYAKIT ÜRETİMİNDEN TÜRETİLEN BAŞLICA YAN ÜRÜNLER

2.1. DDGS - Distillers Dried Grains with Solubles

Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS), mısır veya diğer tahılların fermantasyon yoluyla etanol üretimi sonrasında ortaya çıkan, yüksek protein ve lif içeriğine sahip bir yan üründür. Biyoetanol üretim sürecinde nişastanın büyük ölçüde fermantasyona uğraması nedeniyle, elde edilen DDGS’de ham protein, ham yağ, nötral deterjan lif (NDF) ve çeşitli mineraller yoğunlaşmaktadır. Bu ürünün besin bileşimi yaklaşık olarak %27–32 ham protein, %8–12 ham yağ ve %35–45 NDF düzeyinde rapor edilmektedir (Fonseca ve ark., 2021).

Biyoetanol üretiminde kullanılan tahıllar uygun koşullarda depolanmamış ve yüksek nem içeriğine sahip olduğunda, süreç yalnızca besin maddelerinin yoğunlaşmasına değil, aynı zamanda mikotoksinlerin 2–3 katına kadar konsantrasyona ulaşmasına da yol açabilmektedir. Özellikle aflatoksinler, deoksinivalenol (DON) ve zearalenon (ZEN) gibi toksinlerin DDGS’te artış gösterdiği, çeşitli bilimsel çalışmalarla

ortaya konmuştur (Paneru ve ark., 2025). Bu nedenle, DDGS'nin ruminant rasyonlarına dâhil edilmeden önce toksin analizine tabi tutulması önerilmektedir.

Proteinin miktarının yarısının rumende yıkıma karşı dirençli olması, metabolik enerji ve protein dengesine katkı sağladığı; süt sığırlarında süt yağı düzeylerindeki düşüşlerin önlenmesine, besi sığırlarında ise yüksek kesif yem tüketimine bağlı ruminal pH düşüşlerinin telafi edilmesine yardımcı olabileceği bildirilmiştir (Ramirez-Ramirez ve ark., 2016). Bu nedenle rasyonda kaliteli bir protein kaynağı alternatifleri arasında kendine yer bulmaktadır.

2.2. Ham Gliserol

Ham gliserol, biyodizel üretiminde trigliseritlerin metanol ile transesterifikasyonu sonucu ortaya çıkan bir yan ürün olup, %40–90 oranlarında gliserol içerebilmektedir. Kalan bileşenler arasında metanol, sabunlar, tuzlar, serbest yağ asitleri ve ağır metal kalıntıları bulunabilmektedir. Ruminantlarda enerji kaynağı olarak kullanılabilen ham gliserolün, özellikle propiyonat üretimini artırarak glikoneogenezisi destekleyebileceği bildirilmektedir. Bununla birlikte, düşük saflık düzeyine sahip ham gliserolün potasyum, sodyum, metanol artıkları ve serbest yağ asitleri içermesi toksisite riskini yükseltmektedir. Özellikle metanol düzeyinin %0.5'in üzerinde olması, nörotoksik etkiler ve ciddi metabolik asidozis oluşturma olasılığı nedeniyle sakıncalı olduğu ifade edilmiştir (Lee ve ark., 2011).

2.3. Yağlı Tohum Küspeleri

Biyodizel üretiminde sıklıkla kanola, soya ve pamuk gibi yağlı tohumlar kullanılmakta olup, işlem sonrasında ortaya çıkan küspeler yüksek protein içerikleri nedeniyle yem sektöründe değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu yan ürünlerde kanolada glukosinolatlar, pamuk tohumu küspesinde gossipol ve soyada fitat ile izoflavonlar gibi bazı anti-besinsel

faktörler daha yoğun biçimde bulunabilmektedir (Salim ve ark., 2023).

Ruminantların rumen mikroflorasının detoksifikasyon kapasitesi söz konusu bileşenlerin büyük bir kısmını etkisiz hâle getirebilse de, yüksek düzeyde tüketim fertilité bozuklukları, karaciğer hasarı, tiroit fonksiyonlarında aksaklıklar ve antioksidan savunma mekanizmalarında azalma gibi olumsuz etkilere yol açabileceği bildirilmiştir (Górka ve Penner, 2020).

3. BİYOYAKIT ÜRETİMİNDEN TÜRETİLEN BAŞLICA YAN ÜRÜNLERİN HAYVAN BESLEME PRATİĞİNDE KULLANIMI

3.1. Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS)

DDGS, ruminant beslemede yüksek enerji düzeyi ve bypass proteini içeriği sayesinde önemli bir yem kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Fermantasyon sürecinde nişastanın büyük bölümü etanole dönüştüğü için geriye kalan fraksiyon, protein, yağ ve lif bakımından görece zengin bir yapı sunmaktadır. Ayrıca, maya hücreleri ve fermantasyon metabolitleri DDGS'in vitamin ve biyolojik olarak aktif bileşen içeriğini arttırdığı bildirilmiştir (Zengin ve ark., 2022).

DDGS'in ham protein içeriğinin %27–32 aralığında olduğu bildirilmektedir. Ayrıca, rumende yıkımlanmaya dirençli, ince bağırsakta sindirilebilen bypass protein oranının, diğer tahıl kökenli yemlere kıyasla daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Böttger ve Südekum, 2017). Bu avantajın, özellikle yüksek verimli süt sığırlarında doğum sonrasında ortaya çıkan negatif enerji dengesi ve azalan kuru madde tüketimi koşullarında amino asit dengesine katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (De Boever, ve ark., 2014).

Ruminantlarda DDGS'nin enerji değeri, %8–12 düzeyindeki ham yağ ve %35–45 oranındaki NDF'nin kompleks yapısı ile rumende yavaş fermentasyona uğraması sonucunda artış göstermektedir. Ham yağ fraksiyonu enerji metabolizmasını desteklerken, aynı zamanda süt yağında azalmaya yol açabilecek asetik:propiyonik asit düzeyleri ile ilişkilendirilmektedir (Benchaa ve ark., 2013). Literatürde, söz konusu bulgular nedeniyle rasyonlarda yüksek düzeyde DDGS kullanımına ihtiyatlı yaklaşılmaktadır.

DDGS'in rasyonlara katılım düzeyi, hayvanların fizyolojik durumuna bağlı olarak değişmekte olup; besi sığırlarında %20–40, süt sığırlarında %10–20 ve küçük ruminantlarda %10–25 aralığında güvenli kabul edilmektedir (Böttger ve Südekum, 2017).

İşleme tekniği neticesinde şüpheli materyallerde mikotoksin konsantrasyonunun 2–3 kat artması, DDGS'in önemli bir dezavantajı olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, özellikle ithal DDGS partilerinde aflatoxin, DON ve ZEN açısından analiz yapılması önerilmektedir (Pecka-Kielb ve ark., 2017).

3.2 Ham Gliserol

Ham gliserol, metabolik açıdan özellikle propiyonat üretimini artırması nedeniyle ruminantlarda glikojenik bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Propiyonatın karaciğer tarafından doğrudan glikoneogeneze kullanılması, kuru madde tüketiminin azaldığı ve kaşektik metabolik bozuklukların görüldüğü durumlarda istikrarlı bir kan glikoz düzeyinin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Araştırmalar, gliserolün rasyon kuru madde miktarına bağlı olarak süt sığırlarında %5–8, besi sığırlarında %10–15 ve koyun/keçilerde %5–10 oranında güvenle kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Syahniar ve ark., 2016).

Araştırmalar, yüksek düzeylerde veya rumen florası alıştırılmadan rasyona eklenen gliserolün; rumende mikroorganizma ölümüne neden olacak osmotik basınç artışına, asetat:propiyonat dengesinin bozulmasına ve metabolik asidozis riskinin yükselmesine yol açabileceğini, ayrıca gliserolün yüksek oranda metanol içermesi durumunda nörotoksik etkilerin ortaya çıkabileceğini bildirmektedir (Kupczyński ve ark., 2020).

Ham gliserolün besleme değerini belirleyen en kritik unsurun saflık düzeyi olduğu bildirilmektedir. Metanol oranı %0.5'in üzerinde olan gliserol kaynakları toksik olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, potasyum ve sodyum sabunlarının yüksek düzeyleri de ruminal pH üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Kholif, 2019).

3.3. Yağlı Tohum Küspeleri

Biyodizel üretiminde yaygın olarak kullanılan kanola, işlem sonunda proteince zengin bir küspe oluşmaktadır. Bununla birlikte, üretim süreci kanolanın birim başına düşen glukosinolat düzeyini artırmaktadır. Glukosinolatların yüksek miktarda alımı tiroit fonksiyon bozukluklarına, kuru madde tüketiminin azalmasına ve karaciğer hasarına bağlı enzim aktivitelerinin yükselmesine yol açabilmektedir. Glukosinolatlar rumende kısmen detoksifiye edilse de yüksek konsantrasyonlarda toksik etkilere neden olabileceği bildirilmiştir (Nega, 2018).

Kanatlı, balık, domuz ve ruminant rasyonlarında yaygın olarak kullanılan soya, GDO tartışmaları bir yana genellikle güvenilir bir yem kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, içerdiği fitik asit ve izoflavon gibi bileşiklerin yüksek düzeyde alımı üreme sistemi üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği ve mineral madde emilimini azaltabileceği ifade edilmektedir (Atoo ve ark., 2025).

4. BİYİYAKIT YAN ÜRÜNLERİNİN TOKSİKOLOJİK RİSKLERİ

Ruminantlar biyoyakıt yan ürünlerini çoğunlukla güvenle kullanabilse de üretim süreci sonucunda bazı toksikolojik riskler artabilmektedir. Bu nedenle söz konusu risklerin mekanizmalarının ve tolerans limitlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

DDGS üretiminde uygulanan fermantasyon ve kurutma işlemleri, mikotoksin yükü öz hammaddeye kıyasla 2–3 kat artış göstermesine yol açabilmektedir. En sık bildirilen toksinler arasında, rasyonla alındığında süt yağında AFM1'e dönüşerek kalıntı bırakabilen Aflatoksin B1; süt yağı ve kuru madde tüketimi ile doğrudan ilişkili Deoksinivalenol (DON); östrojenik etkileri nedeniyle fertilité sorunlarına yol açabilen Zearalenon (ZEN) ve Fumonisinler yer almaktadır. Ruminantlarda mikotoksinlere karşı rumen mikroflorası belirli bir koruma sağlasa dahi yüksek konsantrasyonlarda maruziyet, yüksek verim kaynaklı metabolik stres ve düşük rumen pH'sı gibi koşullar bu koruyucu etkinin azalmasına neden olabilmektedir (Kim ve ark., 2021).

Bunun yanı sıra, DDGS ve gliserolde fermantasyon tankları, ısıtma işlem ekipmanları ve kontamine hammaddeler kökenli Cu, Zn, Pb, Cd, Cr ve As gibi ağır metaller bulunabilmektedir. Yapılan piyasa hammadde taramalarında, bazı DDGS örneklerinde küçük dozlarda dahi uzun süreli alım sonucunda karaciğer ve böbrek hasarı, hematolojik bozukluklar ile üreme performansında azalma ile ilişkili Pb ve Cd düzeylerinin ciddi oranlarda tespit edildiği rapor edilmiştir (Meric ve Koc, 2021; Oraby ve Salem, 2025).

Ham gliserolde bulunabilecek olası toksikolojik riskler arasında metanol, sabunlaşmış yağ asitleri, sodyum ve potasyum tuzları ile serbest yağ asitleri yer almaktadır. Özellikle metanol

kalıntısının, karaciğerde formaldehit ve format gibi son ürünlere dönüşmesi sonucunda ciddi metabolik asidoz vakalarına ve nörolojik hasara yol açabileceği bildirilmektedir (Kholif, 2019).

Ruminant rasyonlarına dahil edilen soya, pamuk tohumu ve kanola gibi yağlı tohum küspelerinde bulunan çeşitli fitokimyasallar ile anti-besinsel bileşiklerin, östrus siklusunda düzensizliklere, testosteron düzeylerinde değişimlere ve ovaryum fonksiyonlarında bozulmalara yol açabileceği bildirilmektedir (Gołębiewska, Fraś ve Gołębiewski, 2022).

5. RUMİNANTLARDA BİYORYAKIT YAN ÜRÜNLERİ İLE BESLEMENİN TOKSİKOLOJİK TOLERANS EŞİKLERİ

Ruminantların biyoryakıt yan ürünlerini hangi düzeylere kadar tolere edebildiği, klinik bulgular ve fizyolojik değişikliklerle açıklanmaktadır.

DDGS'nin rasyona katılımına ilişkin güvenli düzeyler, kuru madde esasına göre süt sığırlarında %10–20, besi sığırlarında %20–40 ve küçük ruminantlarda %10–25 aralığında olabileceği bildirilmektedir (Pecka-Kielb ve ark., 2017). Bununla birlikte, kullanım sonrası süt yağı depresyonu, rumen pH dengesizlikleri, mikotoksin kaynaklı etkiler ve karaciğer yağlanması gibi klinik riskler söz konusu olabilmektedir. Literatürde, DDGS'nin rasyonun enerji ve protein yoğunluğunu artırma potansiyeline sahip olduğu, ancak yüksek yağ içeriğinin ruminal fermentasyon hızını olumsuz yönde etkileyebileceği vurgulanmaktadır (Chrenková ve ark., 2012).

Gliserolün rasyonlarda güvenli kullanım düzeyleri, kuru madde esasına göre süt sığırlarında %5–8, besi sığırlarında %10–15 ve koyun/keçilerde %5–10 aralığında bildirilmektedir. Ham gliserolün rasyona dahil edilmesi sürecinde ise metanol içeriğinin

<%0.5 düzeyinde olması, sodyum ve potasyum sabun konsantrasyonlarının kontrol edilmesi ve ayrıca rumen asidoz riskine karşı koruyucu önlemlerin uygulanması gerektiği vurgulanmaktadır (Khattab, 2015; Kholif, 2019).

Yağlı tohum küspelerinin rasyonlarda kullanımı, belirli anti-besinsel faktörler açısından sınırlamalar içermektedir. Kolza küspesi için glukosinolat düzeylerinin 2–4 $\mu\text{mol/g}$ KM aralığında olması ve rasyona katılım oranının %10–20 ile sınırlandırılması önerilmektedir. Pamuk tohumu küspesinde ise serbest gossipol düzeylerinin 200–400 mg/kg KM sınırları içinde tutulması gerekmekte olup, bu limitlerin aşılması sperm motilitesinde azalma ve hemoliz riskini beraberinde getirebilmektedir (Rao, Prasad ve Rajendran, 2013; Gadelha, ve ark., 2014).

6. YEMLERDE ANTİ-BESİNSEL BİLEŞİKLERİN KONTROLÜ VE İŞLEME TEKNİKLERİ

Yemlerin kullanılabilirliğini artırmaya yönelik uygulamalar, anti-besinsel faktörlerin azaltılmasına odaklanmaktadır. Isıl işlem teknikleri glukosinolat ve gossipol düzeylerini belirli ölçüde düşürürken, yem materyalinin amonyak (NH_3) ile alkali işleme tabi tutulması mikotoksin bağlama kapasitesini artırabilmektedir. Rasyonda mikotoksinlerin bağlanmasını desteklemek amacıyla bentonit, zeolit ve maya hücre duvarı gibi mikotoksin bağlayıcıların kullanımı önerilmektedir. Ayrıca, bu ürünlerin fermentasyon süreçleriyle elde edilmiş olmaları, içeriklerindeki lif fraksiyonlarının yıkımlanabilirliğini artırarak toksin yükünün azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Colović ve ark., 2019).

7. HAYVAN BESLEMEDE TOKSİSİTE RİSKLERİNİN KONTROLÜ VE TEDAVİ YÖNTEMLERİ

Biyoyakıt yan ürünlerinin hatalı formülasyonu, yetersiz kalite kontrolü veya mevzuata aykırı kullanımı sonucunda ruminant sürülerinde toksisite geliştiğinde, müdahale hem sürü düzeyinde yönetim stratejilerini hem de bireysel tedavi uygulamalarını içermelidir. Bu kapsamda aktarılan hususlar genel veteriner hekimlik ilkeleri çerçevesinde değerlendirilmekte olup, spesifik olguların yönetiminde sahadaki veteriner hekimin klinik muayene ve kararları esas alınmalıdır.

Toksisite şüphesinin bulunduğu durumlarda öncelikli müdahale, potansiyel olarak riskli yem kaynağının derhal kesilmesi, toplatılması ve maruziyet yaşayan hayvanların sürüden ayrılmasıdır. DDGS, ham gliserol veya yağlı tohum küspelerinde sorun ihtimali söz konusu ise, ilgili parti rasyondan acilen çıkarılmalı ve mümkünse numune alınarak mikotoksin, ağır metal ile kimyasal kalıntı analizlerine tabi tutulmalıdır.

Toksisite şüphesi bulunan yemlerin rasyondan çıkarılmasının ardından, güvenilir olduğu bilinen kesif ve kaba yemlerle hızlı bir şekilde ikame edilmesi ‘diyet detoksifikasyonu’ açısından önem taşımaktadır. Yüksek kaliteli kaba yemlerin (örneğin kaliteli kuru ot ve silaj) yanı sıra toksin içermediği bilinen konsantre yemlerle yapılan besleme, rumen fonksiyonlarının yeniden düzenlenmesine katkı sağlamakta ve mevcut toksin yükünün seyreltilmesine olanak vermektedir.

Bozulan rumen fonksiyonlarının desteklenmesi gereklidir. Özellikle progresif rumen asidozu veya iştahsızlık belirtilerinin gözlemlendiği durumlarda, tampon maddelerin (örneğin sodyum bikarbonat uygulamaları) yanı sıra canlı maya preparatları ve rumen mikrobiyotasını dengeleyici destek ürünlerinin kullanımı önerilmektedir.

Mikotoksikozun doğrulandığı durumlarda, özellikle DDGS ve diğer damıtma yan ürünlerinden kaynaklanan aflatoksin, DON ve ZEN maruziyetlerinde, öncelikli yaklaşım sorumlu yem partisinin rasyondan uzaklaştırılmasıdır. Rasyona kil mineralleri, bentonit, zeolit ve maya hücre duvarı preparatları gibi mikotoksin bağlayıcıların eklenmesi, yeni yem partilerinde ortaya çıkabilecek düşük düzeyli kontaminasyonun sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir. Aflatoksikoz şüphesi bulunan hayvanlarda karaciğer fonksiyonlarını desteklemek amacıyla enerji takviyesi, antioksidanlar, vitamin E ve selenyum içeren preparatlar ile B kompleks vitaminlerin kullanımı ve gerektiğinde sıvı tedavisi uygulanmaktadır. ZEN gibi östrojenik toksinlere bağlı olgularda ise, rasyondaki kaynak ortadan kaldırıldıktan sonra çoğu vakada östrus siklusu zamanla normale dönmekte; ancak uzun süreli infertilite veya abort vakalarında reproduktif muayene ve sürü bazlı yeniden değerlendirme gerekmektedir (Mostrom ve Jacobsen, 2020).

Ağır metal toksisitesi olasılığı söz konusu olduğunda, biyoyakıt yan ürünleri veya proses ekipmanlarından kaynaklanabilecek Pb ve Cd maruziyetlerinde öncelikli adım kaynağın tanımlanarak rasyondan uzaklaştırılmasıdır. Klinik düzeyde ağır metal toksisitesi bulguları gösteren hayvanlarda, veteriner hekim kararıyla uygun olgularda kalsiyum EDTA gibi ajanlarla şelasyon tedavisi gündeme gelebilir; ancak bu uygulamalar doz, süre ve çekilme periyotları açısından dikkatli planlama gerektirmektedir. Sürü düzeyinde kronik maruziyetin saptanması halinde ise, et ve süt ürünlerinin mevzuata uygunluk açısından denetlenmesi ve gerektiğinde pazara arzının kısıtlanması gerektiği bildirilmiştir (Mehmood ve ark., 2023).

Yem kaynaklı gossipol ve glukosinolat gibi anti-besinsel bileşiklere maruziyet durumunda, ilgili küspenin rasyondan çıkarılması veya kullanım düzeyinin belirgin şekilde azaltılması temel yaklaşımdır. Erkek hayvanlarda fertilite sorunları, özellikle

sperm motilitesinde azalma gözlemlendiğinde, damızlık materyalin yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir; ileri düzeyde gossipol maruziyetinde ise bazı olgularda geri dönüş sınırlı kalabilmektedir. Glukosinolatların tiroit fonksiyonları üzerindeki olumsuz etkilerinde, iyot dengesinin ve rasyonun genel mineral kompozisyonunun yeniden düzenlenmesi önem taşımakta olup, klinik tabloya bağlı olarak veteriner hekim tarafından tiroit fonksiyonlarının izlenmesi gerekebilir (Wang ve ark., 2021).

Ham gliserolde yüksek düzeyde metanol ve sabun/tuz kalıntılarının bulunması toksisiteye yol açabilmektedir. Bu durumda öncelikli yaklaşım, ham gliserol ilave edilmiş rasyonun derhal temizlenmesi ve eğer mümkünse analize gönderilmesidir. Metanol maruziyetine bağlı nörolojik semptomlar veya metabolik asidoz tablosunda sıvı-elektrolit dengesi, asit-baz dengesi ve rumen düzenlenmeli ve glikojenez desteklenmelidir. Rumen asidozu veya iştahsızlık bulgularının varlığında ise rumen tamponları ve destekleyici ürünlerin kullanımı önerilmekte; ağır olgularda sonda uygulamaları gibi ek müdahaleler önerilmektedir (Silva ve ark., 2014).

Toksisite vakaları çoğunlukla bireysel hayvanlardan ziyade sürü düzeyinde besleme ve tedarik zinciri kaynaklı sorunların göstergesidir. Bu nedenle, yeni temin edilen DDGS, ham gliserol veya yağlı tohum küspelerinin kullanıma alınması sürecinde parti bazlı analiz sonuçlarının kayıt altına alınması ve izlenebilirlik sistemlerinin oluşturulması gereklidir. Özellikle sıcak ve nemli mevsimlerde mikotoksin yükünün artacağı varsayıldığından bu dönemlerde tedarik edilecek DDGS'nin kullanımının sınırlandırılması, biyoyakıt yan ürünleri tedarik eden firmalardan yem maddeleri kataloğu tanımları ile mevzuata uygun analiz raporlarının talep edilmesi ve süt ile et işletmelerinde rastgele yem ve ürün kalıntı analizleriyle sistemin doğrulanması, gelecekte ortaya çıkabilecek toksisite vakalarının

önlenmesinde tedavi uygulamaları kadar kritik bir rol oynamaktadır (Carrera ve ark., 2012).

8. YASAL DÜZENLEMELER

Türkiye’de biyoyakıt yan ürünlerinin (örneğin DDGS, ham gliserol, yağlı tohum küspeleri) hayvan beslemede kullanımı, 5996 sayılı Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu ve ilgili yönetmelikler çerçevesinde düzenlenmektedir. Bu ürünler yalnızca yem mevzuatına uygunluk, güvenilirlik ve kalite kontrol analizleri sağlandığında kullanılabilir; metanol, ağır metal, mikotoksin gibi bulaşanlar için limit değerler mevzuatla belirlenmiş olup, bu sınırların aşılması durumunda yem olarak kullanımları yasaktır.

9. SONUÇ

Karbon bazlı fosil yakıtlara alternatif aranması ile başlayan yolculuğun belki de ilk üyelerinden olan biyoyakıt endüstrisi, gösterdiği hızlı gelişim ile ruminant beslemede alternatif yem kaynakları olarak değerlendirilen DDGS, ham gliserol ve yağlı tohum küspeleri gibi yan ürünler ortaya çıkarmıştır. Hem besin maddesi yoğunlukları hem de ekonomik avantajları nedeniyle modern ruminant rasyonlarında önemli bir yer edinmektedir. Ruminantların rumen mikrobiyal ekosistemi sayesinde birçok anti-besinsel bileşiği belirli oranlarda detoksifiye edebilmesi, bu yan ürünlerin kullanımını monogastriklere kıyasla daha güvenli hâle getirirse de biyoyakıt üretim süreçlerinin doğası gereği ortaya çıkan mikotoksin konsantrasyonu artışı, ağır metal kalıntıları ve işlem kaynaklı kimyasal kontaminasyonlar dikkatle yönetilmesi gereken kritik risk alanlarını oluşturmaktadır.

Çalışma genelinde ortaya konduğu üzere, biyoyakıt yan ürünlerinin ruminant beslemede etkin ve güvenilir biçimde kullanılabilmesinin temel şartı; hammadde kaynağının doğrulanması, mikotoksin ve ağır metal analizlerinin düzenli olarak yapılması, metanol ve diğer kimyasal artıkların sınır değerler içinde bulunması, anti-besinsel faktörlerin işleme teknikleri ile azaltılması ve rasyon formülasyonunun hayvanın fizyolojik ihtiyaçlarına uygun şekilde planlanmasıdır. Bu yaklaşımlar hem verim parametrelerinin korunmasını hem de hayvansal ürünlerde halk sağlığını ilgilendiren kalıntı oluşumunun engellenmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, biyoyakıt endüstrisinin ruminant besleme açısından sunduğu potansiyel oldukça yüksek olmakla birlikte, bu potansiyelin sürdürülebilir ve güvenli şekilde kullanılması, güçlü bir yem güvenliği yönetimi, kapsamlı toksikolojik izleme programları ve mevzuata uygun üretim süreçleriyle mümkün olabilecektir. Biyoyakıt yan ürünleri, doğru işleme teknikleri ve etkin kalite kontrol mekanizmalarıyla desteklendiğinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan hayvancılık sektöründe önemli bir tamamlayıcı kaynak olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Atoó, A. F., Perez-Palencia, J. Y., Levesque, C. L., Underwood, K., Koch, K., Mueller, S., ... Hong, J. (2025). Effects of feeding expeller-extruded high oleic soybeans in broiler diets on growth performance, blood profile, and meat quality. *Poultry Science*, 104(4), 104960. doi:10.1016/j.psj.2025.104960
- Benchaar, C., Hassanat, F., Gervais, R., Chouinard, P. Y., Julien, C., Petit, H. V. ve Massé, D. I. (2013). Effects of increasing amounts of corn dried distillers grains with solubles in dairy cow diets on methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 96(4), 2413–2427. doi:10.3168/jds.2012-6037
- Böttger, C. ve Südekum, K. H. (2017). European distillers dried grains with solubles (DDGS): Chemical composition and in vitro evaluation of feeding value for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 224, 66–77. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.12.012
- Carrera, R. A. B., Veloso, C. M., Knupp, L. S., Júnior, A. H. de S., Detmann, E. ve Lana, R. de P. (2012). Protein co-products and by-products of the biodiesel industry for ruminants feeding. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(5), 1202–1211. doi:10.1590/S1516-35982012000500018
- Chrenková, M., Čerešňáková, Z., Formelová, Z., Poláčiková, M., Mlyneková, Z. ve Fl'ák, P. (2012). Chemical and nutritional characteristics of different types of DDGS for ruminants. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 21(3), 425–435. doi:10.22358/jafs/66108/2012
- Colović, R., Puvača, N., Cheli, F., Avantaggiato, G., Greco, D., Đuragić, O., ... Pinotti, L. (2019). Decontamination of

- mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed. *Toxins*, 11(11). doi:10.3390/toxins11110617
- De Boever, J. L., Blok, M. C., Millet, S., Vanacker, J. ve De Campeneere, S. (2014). The energy and protein value of wheat, maize and blend DDGS for cattle and evaluation of prediction methods. *Animal*, 8(11), 1839–1850. doi:10.1017/S1751731114001815
- Fonseca, N. V. B., Cardoso, A. da S., Hoffmann, A., Leite, R. G., Ferrari, A. C., Fernandes, M. H. M. da R. ve Reis, R. A. (2021). Characterization and effects of ddd on the intake and digestibility of finishing bulls in feedlots. *Acta Scientiarum - Animal Sciences*, 43(1), 1–8. doi:10.4025/actascianimsci.v43i1.51877
- Gadelha, I. C. N., Fonseca, N. B. S., Oloris, S. C. S., Melo, M. M. ve Soto-Blanco, B. (2014). Gossypol toxicity from cottonseed products. *Scientific World Journal*, 2014(Figure 1), 4–6. doi:10.1155/2014/231635
- Gołębiewska, K., Fraś, A. ve Gołębiewski, D. (2022). Rapeseed meal as a feed component in monogastric animal nutrition-A review. *Annals of Animal Science*, 22(4), 1163–1183. doi:10.2478/aoas-2022-0020
- Górka, P. ve Penner, G. B. (2020). Rapeseed and canola meal as protein sources in starter diets for calves: Current knowledge and directions of future studies. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 67(3), 313–321. doi:10.33988/auvfd.712730
- Khattab, M. S. A. (2015). Glycerol as Feedstuff for Ruminant. *Science International*, 3(3), 90–94. doi:10.17311/sciintl.2015.90.94

- Kholif, A. E. (2019). Glycerol use in dairy diets: A systemic review. *Animal Nutrition*, 5(3), 209–216. doi:10.1016/j.aninu.2019.06.002
- Kim, J. H., Park, G. H., Han, G. P. ve Kil, D. Y. (2021). Effect of feeding corn distillers dried grains with solubles naturally contaminated with deoxynivalenol on growth performance, meat quality, intestinal permeability, and utilization of energy and nutrients in broiler chickens. *Poultry Science*, 100(8), 101215. doi:10.1016/j.psj.2021.101215
- Kupczyński, R., Szumny, A., Wujcikowska, K. ve Pachura, N. (2020). Metabolism, ketosis treatment and milk production after using glycerol in dairy cows: A review. *Animals*, 10(8), 1–17. doi:10.3390/ani10081379
- Lee, S. Y., Lee, S. M., Cho, Y. B., Kam, D. K., Lee, S. C., Kim, C. H. ve Seo, S. (2011). Glycerol as a feed supplement for ruminants: In vitro fermentation characteristics and methane production. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 269–274. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.070
- Mehmood, K., Khan, A., Zhang, H., Ali Alkheraije, K. ve Tahir, I. (2023). A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 10(9).
- Meric, S. ve Koc, F. (2021). Mısırdan Elde Edilmiş Kurutulmuş Damıtma Tane ve Çözünürlerin (DDGS) Bazı Kalite ve Risk Kriterleri Yönünden İncelenmesi. *Hayvan Bilimi ve Ürünleri Dergisi*, 4(1), 96–109. doi:10.51970/jasp.933547

- Mostrom, M. S. ve Jacobsen, B. J. (2020). Ruminant Mycotoxicosis: An Update. *Veterinary Clinics of North America - Food Animal Practice*, 36(3), 745–774. doi:10.1016/j.cvfa.2020.08.011
- Nega, T. (2018). Review on Nutritional Limitations and Opportunities of using Rapeseed Meal and other Rape Seed by - Products in Animal Feeding. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(1), 43–48. doi:10.15406/jnhfe.2018.08.00254
- Oraby, M. I. ve Salem, N. Y. (2025). Impact of water pollution with lead and cadmium on rumen parameters, serum constituents, and antioxidant status of grazing Egyptian Nubian goats in Giza Governorate. *Comparative Clinical Pathology*, 34(2), 261–268. doi:10.1007/s00580-025-03641-6
- Paneru, D., Sharma, M. K., Shi, H., Goo, D., Choppa, V. S. R., Gyawali, I., ... Kim, W. K. (2025). Effects of deoxynivalenol contaminated corn distiller's dried grains with solubles on growth performance, body composition, immunological response, and gastrointestinal health in young pullets. *Poultry Science*, 104(1). doi:10.1016/j.psj.2024.104611
- Pecka-Kielb, E., Zachwieja, A., Mista, D., Zawadzki, W. ve Zielak-Steciwo, A. (2017). Use of Corn Dried Distillers Grains (DDGS) in Feeding of Ruminants. *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*, (25). doi:10.5772/66357
- Ramirez-Ramirez, H. A., Castillo Lopez, E., Jenkins, C. J. R., Aluthge, N. D., Anderson, C., Fernando, S. C., ... Kononoff, P. J. (2016). Reduced-fat dried distillers grains with solubles reduces the risk for milk fat depression and supports milk production and ruminal fermentation in

- dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 1912–1928.
doi:10.3168/jds.2015-9712
- Rao, S., Prasad, K. ve Rajendran, D. (2013). Recent Advances in Amelioration of Anti- Nutritional Factors in Livestock Feedstuffs. *Animal Nutrition and Reproductive Physiology* içinde (ss. 147–148).
doi:10.1515/9781438494012-037
- Rezaei, S., Hormaza Mejia, A., Wu, Y., Reed, J. ve Brouwer, J. (2025). Global warming impacts of the transition from fossil fuel conversion and infrastructure to hydrogen. *Applied Energy*, 397(February).
doi:10.1016/j.apenergy.2025.126363
- Salim, R., Nehvi, I. B., Mir, R. A., Tyagi, A., Ali, S. ve Bhat, O. M. (2023). A review on anti-nutritional factors: unraveling the natural gateways to human health. *Frontiers in Nutrition*, 10(August), 1–15.
doi:10.3389/fnut.2023.1215873
- Silva, V., Lopes, E., Andrade, E., Sousa, R., Zangeronimo, M. ve Pereira, L. (2014). Use of biodiesel co-products (Glycerol) as alternative sources of energy in animal nutrition: a systematic review. *Archivos del Medicina Veterinaria*, 120, 111–120.
- Syahniar, T. M., Ridla, M., Samsudin, A. A. B. ve Jayanegara, A. (2016). Glycerol as an energy source for ruminants: A meta-analysis of in vitro experiments. *Media Peternakan*, 39(3), 189–194. doi:10.5398/medpet.2016.39.3.189
- Wang, W. K., Yang, H. J., Wang, Y. L., Yang, K. L., Jiang, L. S. ve Li, S. L. (2021). Gossypol detoxification in the rumen and *Helicoverpa armigera* larvae: A review. *Animal Nutrition*, 7(4), 967–972.
doi:10.1016/j.aninu.2021.02.007

- Yan, Z., Liu, Z., Zhou, C. ve Tan, Z. (2025). Anti-Nutritional Factors of Plant Protein Feeds for Ruminants and Methods for Their Elimination. *Animals*, 15(8), 1–17. doi:10.3390/ani15081107
- Zengin, M., Sur, A., İlhan, Z., Azman, M. A., Tavşanlı, H., Esen, S., ... Demir, E. (2022). Effects of fermented distillers grains with solubles, partially replaced with soybean meal, on performance, blood parameters, meat quality, intestinal flora, and immune response in broiler. *Research in Veterinary Science*, 150(July), 58–64. doi:10.1016/j.rvsc.2022.06.027
- Zhang, Y. ve Caupert, J. (2012). Survey of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles from 2009 to 2011. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(2), 539–543. doi:10.1021/jf203429f

SÜRDÜRÜLEBİLİR İKLİM ADAPTASYONU İÇİN DİJİTAL DESTEKLİ AKILCI TARIM VE HAYVAN BESLEME UYGULAMALARI

Oğuz Koray BACAKSIZ¹

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğinin etkileri günümüzde en belirgin biçimde su kaynakları, tarım ve hayvancılık sektörlerinde ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık dalgalanmaları ve yağış rejimlerindeki düzensizlikler, kuraklık riskini artırarak kullanılabilir su miktarını azaltmaktadır (Naderi ve ark., 2024). Tarım sektörü, küresel ölçekte suyun en büyük tüketicisi konumunda olup, sulama faaliyetleri içilebilir suyun yaklaşık %70'ini kullanmaktadır. Bu durum yalnızca üretim kayıplarına yol açmakla kalmamakta, aynı zamanda gıda güvenliği, ekonomik istikrar ve toplumsal refah üzerinde kritik sonuçlar doğurmaktadır (Tabler ve ark., 2023).

Kuraklık, suya dayalı tarımsal üretimde verimliliği düşürmekte; azalan gıda miktarları birim fiyatların yükselmesine neden olmakta ve özellikle kırılgan ekonomilerde gıda enflasyonunu artırmaktadır (Dinar, Tieu ve Huynh, 2019). Tarım ve hayvancılık sektörlerinde su kıtlığı, mera kalitesinin düşmesi ve yem üretimindeki azalma hayvan besleme koşullarını zorlaştırmakta; verimlilik, fertilité ve hayvan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Godde ve ark., 2021).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Savaştepe Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, ORCID: 0000-0002-4139-0899.

İklim değişikliğinin ilerleyen dönemde daha da derinleşeceği öngörülmekte olup, hayvancılıkta uyum stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Kuraklığa dayanıklı yem bitkilerinin tercih edilmesi, kaba yemlerin uygun koşullarda muhafaza edilmesi ve suyun etkin kullanımı sürdürülebilir hayvancılığın temel unsurlarıdır (Bashiru ve Oseni, 2025). FAO, sürdürülebilir hayvancılığın doğal kaynakların korunması, çevresel yüklerin azaltılması, etik ilkelerin gözetilmesi ve işletme kârlılığının sağlanmasıyla mümkün olabileceğini vurgulamaktadır (Makkar ve Ankers, 2014).

Sonuç olarak, iklim değişikliği su kaynakları, tarım ve hayvancılık sektörlerini birbirinden bağımsız düşünülemez olacak ölçüde etkilemektedir. Uyum stratejilerinin geliştirilmemesi halinde su kıtlığı, yem temininde yaşanacak krizler ve gıda güvenliği sorunları, 21. yüzyılda insanlığın karşı karşıya kalacağı en önemli küresel meydan okumalar arasında yer almaya devam edecektir. Bu çalışmanın temel amacı, tarım ve hayvancılıkta iklim değişikliğine adaptasyonu desteklemek üzere geliştirilen yardımcı teknolojik uygulamaların güncel veriler ışığında derlenerek sistematik biçimde açıklanmasıdır.

2. KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TARIM VE HAYVANCILIĞA YANSIMALARI

Artan sıcaklık ortalamaları ve düzensiz yağış rejimleri, mera bitki çeşitliliğinin azalmasına, yem bitkilerinde verim kayıplarına ve besin değerinin düşmesine yol açmakta; bu durum ruminant ve monogastrik türlerde yem tüketiminin azalmasına ve performans kayıplarına neden olmaktadır (Balakrishnan, 2024). Mera ve yem kalitesindeki bozulmalar, özellikle lignin içeriğinin artması ve sindirilebilirliğin azalması yoluyla hayvan besleme verimliliğini olumsuz etkilerken, düşük kaliteli yem tüketimi birim brüt enerji başına metan üretimini artırarak sera gazı

emisyollarının yükselmesine katkıda bulunmaktadır (Cheng, McCarl ve Fei, 2022).

Hayvancılık sektörü, arazi kullanım değışiklikleri, yem üretimi ve gübre yönetimi gibi süreçler aracılığıyla küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %14,5'ine katkıda bulunmakta, özellikle metan ve nitröz oksit salımları iklim değışikliğini derinleştirmektedir. Artan sıcaklık stresi geviş getiren hayvanlarda yem alımını azaltarak süt ve et veriminde düşüşlere, monogastriklerde ise büyüme performansı ve yemden yararlanmanın bozulmasına yol açmaktadır. Bu süreç süt bileşimi, karkas özellikleri, yumurta verimi ve mineral dengesi gibi üretim parametrelerini de olumsuz etkilediğı bildirilmiştir (Jiménez ve ark., 2025).

Bitkiler ise, sıcaklık ve su stresi; fotosentez etkinliğini, azot döngüsünü ve karbonhidrat metabolizmasını bozarak yem bitkilerinin protein içeriğini ve sindirilebilirliğini düşürmektedir. C3 bitkileri artan CO₂ konsantrasyonundan sınırlı ölçüde olumlu etkilenebilse de kuraklık ve yüksek sıcaklıkların genel etkisi verim kaybı yönündedir. Ayrıca iklim değışikliği, mikotoksin üreten mantar popölasyonlarının yayılımını artırarak yem güvenliğini tehdit etmekte, hayvan sağığı ve üretiminde ek riskler oluşturduğu ifade edilmektedir (Mariem ve ark., 2021).

Genel olarak, iklim değışikliği yem üretimi, yem kalitesi, hayvansal performans ve çevresel sürdürülebilirlik üzerinde çok boyutlu baskılar oluşturmaktadır. Söz konusu etkilerin azaltılabilmesi için iklime dayanıklı yem bitkilerinin geliştirilmesi, uyumlu üretim sistemlerinin tasarlanması ve hayvan besleme stratejilerinin çevresel streslere duyarlı şekilde yeniden yapılandırılması temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

3. SÜRDÜRÜLEBİLİR GIDA SİSTEMLERİ VE KAYNAK YÖNETİMİ

Artan dünya nüfusunun gıda talebini karşılamak için tarımsal üretimin sınırlı doğal kaynaklar çerçevesinde artırılması gerekmektedir. Özellikle az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde gelir artışı, et ve süt ürünleri gibi protein kaynaklarına yönelik talebi hızla yükseltmekte; bu durum yem üretimi için ekilebilir alanlar ve meralar üzerinde ek baskılar oluşturmaktadır. Nitekim 2050 yılına kadar et tüketiminin %75, süt ürünleri tüketiminin ise %68 oranında artacağı öngörülmektedir (Rapiya, Mndela ve Ramoelo, 2025).

Küresel gıda talebini karşılamak için tarımsal verimin %25–70 oranında artırılması gerektiği öngörülmesine karşın, yaklaşık 800 milyon insan hâlen yetersiz beslenmekte olduğu bildirilmiştir (Adesogan ve ark., 2020). Bu durum yalnızca üretim ve lojistik sorunlarından değil, aynı zamanda ekonomik eşitsizliklerden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla gıda güvenliği, salt arz artışıyla değil; sürdürülebilirlik, eşitlik, geçim kaynaklarının güçlendirilmesi ve hayvan refahı gibi sosyoekonomik boyutlarla birlikte değerlendirilmelidir. Bu bağlamda sürdürülebilirlik, ekosistemi koruyan, ekonomik açıdan uygulanabilir ve toplumsal olarak kabul edilebilir üretim modellerini ifade etmekte; tarımsal sürdürülebilirlik ise karbon ayak izinin azaltılması, su kaynaklarının etkin kullanımı ve biyoçeşitliliğin korunması ilkeleri üzerine inşa edilmektedir (Sekaran ve ark., 2021).

Gıda güvenliğinin sağlanması, tarımsal ve hayvansal üretimin sürdürülebilirliğine dayanmaktadır. Bu süreçte uygun maliyetlerin elde edilmesi, meraların ve hayvancılığın bütünleşik yönetimini esas alan bütüncül yaklaşımları gerektirmektedir (Muñoz-Ulecia ve ark., 2023). Araştırmalar, tarım ve hayvancılığın sürdürülebilirliğini destekleyen bazı temel

hedefleri öne çıkarmaktadır: meraların ve hayvancılığın birlikte yönetimiyle sürdürülebilir gıda sistemlerinin inşası, mera temelli hayvancılığın ekonomik potansiyelinin değerlendirilmesi, iklim değişikliğinin mera verimliliği ve hayvancılık üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve sürdürülebilir üretimi teşvik eden yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi olarak ifade edilmektedir (Thornton ve ark., 2014).

4. AKILLI TARIM VE HAYVAN BESLEME SİSTEMLERİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Tarım, gıda güvenliğinin yanı sıra enerji ve su güvenliğinin de merkezinde yer almakta; ancak kaynak arzı ile talebi arasındaki giderek büyüyen uçurum, iklim değişikliği ve aşırı hava olayları nedeniyle daha da derinleşmektedir. Bununla birlikte tarım, su kirliliğinin önemli bir kaynağı olarak ekonomik kalkınma ile çevresel koruma arasında temel bir çelişki barındırmaktadır. Tarihsel süreçte tarım, sanayi devrimleriyle paralel bir dönüşüm yaşamış ve farklı aşamalardan geçmiştir:

- **Tarım 1.0:** Geleneksel el aletleri ile insan ve hayvan gücüne dayalı üretim.
- **Tarım 2.0:** Mekanizasyon, Yeşil Devrim ve kimyasal girdilerin yoğun kullanımı.
- **Tarım 3.0 (Hassas Tarım):** Bilgisayar ve elektronik teknolojileri aracılığıyla enerji, su ve kimyasal kullanımında verimlilik artışı.
- **Tarım 4.0:** Endüstri 4.0 ile dijitalleşme, veri temelli yönetim ve sürdürülebilir üretim stratejileri.

Günümüzde tarımın geleceği, iklim değişikliği, nüfus artışı ve kaynak kıtlığı karşısında sürdürülebilir kalkınmayı destekleyecek dijital dönüşüm ve bütüncül yönetim yaklaşımlarının geliştirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda “Tarım

4.0” veya “Akıllı Tarım” programı, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini ve etkinliğini artırmaya yönelik stratejik bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır (Dayıoğlu ve Türker, 2021).

Tarım 4.0 kapsamında, tarımsal üretim ve hayvancılık endüstrisinde yabancı ot kontrolünden haşere yönetimine ve hasada kadar geniş bir yelpazede dijitalleşme, otomasyon ve yapay zekâ uygulamalarının entegrasyonu, tarım ve çevre sorunlarına çözüm üretme potansiyeli taşımaktadır. Sensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve yapay zekâ gibi dijital teknolojilerin kullanımı, üretim süreçlerinin anlık izlenmesini, kaynak israfının önlenmesini ve birim alandan ya da hayvandan elde edilen verimin optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu dijital araçların iklim değişikliğiyle mücadelede ve sürdürülebilir tarımsal yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol üstlendiği literatürde vurgulanmaktadır (Araújo ve ark., 2021).

5. DİJİTAL ALTYAPININ ÇEKİRDEK UNSURLARI

5.1. Sensör Ağları ve Veri Toplama Sistemleri

Geleneksel veri toplama yöntemleri, çoğunlukla seyrek aralıklarla gerçekleştirilen manuel ölçümlere dayanmaktadır. Buna karşın modern sensör teknolojileri, sürekli ve yüksek çözünürlüklü gerçek zamanlı veri üreterek hayvanların yem ve besin kaynaklarına verdikleri tepkilere ilişkin daha kapsamlı kanıtlar sağlamaktadır. Sensörler, fiziksel çevrenin dijital verilere dönüştürülmesini mümkün kılan ve akıllı tarım sistemlerinin temel veri altyapısını oluşturan kritik bileşenlerdir. Bu teknolojiler, insan duyularının ötesinde hassas ölçümler gerçekleştirerek yönetsel kararların doğruluk ve güvenilirliğini artırmaktadır (Aarif, Alam ve Hotak, 2025).

Tarım endüstrisinde toprak sensörlerinin kullanımı, yerel koşulları uzamsal ve zamansal boyutlarda karakterize eden “aşağıdan yukarıya” yaklaşımları mümkün kılmakta; üretim verimliliğini artırırken çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu sensörler, toprak-bitki ilişkilerini ortaya koyan bölgesel veri tabanlarının oluşturulmasına, organik karbon takibine ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Toprağın nem içeriği, pH düzeyi, elektriksel iletkenliği (EC) ve organik madde miktarını ölçen sensörler, bitki besleme programlarının optimizasyonunda kritik bir rol üstlenmektedir (Viscarra Rossel ve Bouma, 2016).

İklim değişikliğinin etkilerini izlemek amacıyla sıcaklık, bağıl nem, güneşlenme süresi ve rüzgâr hızı gibi parametreleri ölçen istasyonlar, mikro iklim verisi sağlayarak bölgesel tahmin modellerini güçlendirmekte ve iklim koşullarının olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik stratejilere katkıda bulunmaktadır (Brijs ve ark., 2021).

Hayvancılıkta kullanılan pedometreler, ivmeölçerler, GPS cihazları, vücut sıcaklığı sensörleri ve rumen içi pH kapsülleri; hayvanların fizyolojik ve davranışsal durumlarını sürekli izlemekte, kızgınlık, geviş getirme ve sağlık durumu gibi parametreler hakkında veri sağlamaktadır. Kulak küpeleri, tasmalar, ceketler veya bacak halkaları şeklinde kullanılan giyilebilir sensörler, hayvanların aktivite düzeyleri, konumları, vücut sıcaklıkları ve fizyolojik tepkileri hakkında bilgi toplayarak beslenme, sağlık ve üreme döngülerinin yönetimine katkı sunmaktadır (Ding ve ark., 2025).

Hayvan besleme uygulamalarında başarı, yem materyalinin etkin kontrolü ve düzenlenmesine bağlıdır. Bu bağlamda spektroskopik teknolojiler, besin analizinde laboratuvar temelli ıslak kimyasal yöntemlere olan bağımlılığı önemli ölçüde azaltmış ve yem bileşenlerinin yerinde, hızlı ve

güvenilir biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Günümüzde Yakın Kızılötesi (NIR) spektroskopisi yem endüstrisinde baskın yöntem olarak öne çıkmaktadır. NIR spektroskopisi, organik moleküllerdeki kimyasal bağların (C–H, O–H, N–H) belirli spektral bölgelerde (780–2500 nm) sergilediği titreşim modlarını kullanarak protein, lipit ve karbonhidrat gibi organik bileşenlerin içerikleriyle güçlü korelasyonlar kurmaktadır. Bu prensip doğrultusunda, spektral veriler ile ıslak kimya analizlerinden elde edilen değerler arasında matematiksel modeller oluşturulabilmekte ve yem bileşenlerinin besin özellikleri hızlı biçimde belirlenebilmektedir (Kostyukov ve ark., 2023). Böylece NIR teknolojisi, yem hammaddelerinin kuru madde, protein ve enerji içeriklerini saniyeler içinde analiz ederek rasyonların hassas şekilde formüle edilmesine olanak sağlamaktadır (Maduro Dias, Nunes ve Borba, 2024).

5.2. Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri ve yapay zekâ (AI), son yıllarda tarım-gıda sektöründe giderek artan bir etkiye sahiptir. IoT, sensörler aracılığıyla fiziksel çevreden sürekli veri toplayarak dijital ortama aktarmakta; bu veriler bulut bilişim ve makine öğrenimi teknikleriyle işlenerek üretim, işleme ve tedarik zinciri süreçlerinde karar destek sistemlerine dönüştürülmektedir. Büyük veri, yalnızca yapılandırılmış ve yapılandırılmamış verileri değil, aynı zamanda gerçek zamanlı analitik ve otomatik karar mekanizmalarını da kapsamaktadır (Bassi ve diğerleri, 2013).

Tarım-gıda bağlamında IoT ve büyük veri entegrasyonu, üretim verimliliğini artırmak, kaynak kullanımını optimize etmek ve sürdürülebilirliği desteklemek açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu süreç, siber-fiziksel sistemler ve yüksek düzeyde otomasyonla birleşerek “Endüstri 4.0” paradigması içerisinde konumlanmaktadır. Disiplinler arası bir yaklaşım

çerçevesinde, tarım, gıda, elektronik ve bilgisayar bilimleri arasındaki etkileşim vurgulanmakta; IoT cihazları, veri işleme yöntemleri, teknolojinin dönüştürücü etkileri, uygulama zorlukları ve araştırma gereksinimleri tartışılarak tarım-gıda Endüstri 4.0'ın inşasına yönelik bütüncül bir perspektif sunulmaktadır (Gouiza, Jebari ve Reklaoui, 2024).

IoT, sensörlerden toplanan verilerin internet üzerinden bulut sistemlerine veya yerel sunuculara aktarılmasını sağlayan ağ altyapısına dayanmaktadır. Tarımsal alanların genişliği ve enerji kısıtları dikkate alındığında LoRaWAN (uzun mesafe, düşük enerji) ve NB-IoT gibi protokoller yaygınlaşırken, ZigBee ve 4G/5G teknolojileri veri yoğunluğuna bağlı olarak tercih edilmektedir. Bu sayede sulama sistemleri otonom hale gelmekte, hayvan hareketleri ve yem tüketimi kesintisiz kaydedilmekte ve tarımsal ekipmanlar arasında sürekli iletişim sağlanmaktadır (Misra ve ark., 2022).

5.3. Yapay Zekâ (AI/YZ) ve Büyük Veri Analitiği

Büyük Veri, verilerin sürekli artışıyla birlikte bunların toplanması, depolanması, yönetilmesi ve analiz edilmesini sağlayan teknolojileri ifade eden çok boyutlu bir olgudur ve genellikle “dört V” (hacim, hız, çeşitlilik, doğruluk) ile tanımlanmaktadır. Yapay Zekâ (AI), insan benzeri bilişsel işlevleri yerine getiren algoritma ve yazılımlara dayalı heterojen bir alan olup, büyük veri kümelerinin işlenmesi ve anlamlandırılmasında Makine Öğrenmesi teknikleriyle birlikte kullanılmaktadır (Tedeschi, 2022).

Tarım sektöründe bu teknolojiler, görüntü işleme ile bitki hastalıklarının tespiti, verim tahmini ve gübre/su uygulamalarının optimizasyonunu mümkün kılarken; hayvancılıkta RFID etiketleri ve akıllı sensörler aracılığıyla hayvanların bireysel takibi, yem bileşenlerinin besin değerlerinin hızlı belirlenmesi, rasyon optimizasyonu, metan emisyonu modellenmesi ve

hastalıkların erken teşhisi gerçekleştirilmektedir. Böylece, Büyük Veri ve Yapay Zekâ entegrasyonu tarım ve hayvancılık endüstrisinde verimlilik, sürdürülebilirlik ve yönetsel etkinliği artıran kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır (Zhang ve ark., 2025).

6. HAYVANCILIKTA BESLEME SİSTEMLERİNİN DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜ

6.1. Akıllı Besleme Uygulamaları

Hayvan beslemede dijitalleşme süreci, “Hassas Besleme” (Precision Feeding) yaklaşımını ortaya çıkarmıştır. Otomatik yemlikler ve sağım robotlarına entegre edilen yemleme modülleri, her hayvanın bireysel gereksinimlerine uygun besleme yapılmasını mümkün kılmaktadır. Çevresel sensörler, barınaklarda sıcaklık, nem ve gaz bileşimi (örneğin amonyak düzeyleri) gibi kritik parametreleri izleyerek hayvan refahı için optimal koşulların sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Yemleme ve sulama sistemlerine entegre edilen sensörler ise yem tüketimi, su alımı ve süt iletkenliği gibi göstergeleri ölçerek üretim süreçlerinin daha hassas yönetilmesine olanak tanımaktadır (Dooyum ve ark., 2018).

Modern teknolojiler, hesaplamalı modeller, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları aracılığıyla geniş veri kümelerini analiz ederek yem formülasyonunda yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Görüntü işleme teknikleriyle canlı ağırlık tahmini ve rumen pH sensörlerinden elde edilen verilerin birleştirilmesi, rasyonların enerji ve protein dengelerinin hayvan bazında ayarlanmasına imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım, yemden yararlanma oranını artırırken atık yem miktarını ve çevreye salınan azot/fosfor düzeylerini azalttığı bildirilmiştir (Akintan, Gebremedhin ve Uyeh, 2024).

Sensör teknolojileri ve otomatik izleme sistemleriyle desteklenen hassas besleme, yem oranlarının gerçek zamanlı ayarlanmasını sağlayarak üretim verimliliğini optimize etmekte ve israfı en aza indirmektedir (de Freitas Curti ve ark., 2023). IoT ve dijital bilgi işleme teknolojilerinin gelişimi, evcil hayvan besleme sistemlerini de dönüştürmüştür. Kediler ve köpekler için geliştirilen akıllı besleme cihazları, yem miktarını tahmin eden veri odaklı modellerle desteklenmektedir. Bu sistemler, büyüme, vücut ısı, kalp atış hızı, beslenme alışkanlıkları, aktivite ve idrar pH seviyesi gibi parametreleri içeren sanal veri tabanları üzerinden doğrusal regresyon ve sinir ağları gibi makine öğrenimi algoritmalarıyla analiz edilmektedir. Karşılaştırmalar, etkileşimli doğrusal regresyon modelinin en yüksek verimliliği sağladığını göstermiştir. Bu tür modellerin IoT ile entegrasyonu, evcil hayvan obezitesi gibi sorunların önlenmesine katkı sağlayarak hayvan refahını ve güvenliğini artırması amaçlanmaktadır (Ravi ve Choi, 2022).

6.2. Çevresel Stresin Azaltılmasında Teknolojik Yaklaşımlar

AI destekli sistemler, sıcaklık, nem ve hava kalitesi gibi parametreleri sensörler ve veri analitiği yardımıyla sürekli olarak değerlendirmekte; optimum değerlerden sapma durumunda havalandırma, ısıtma veya soğutma süreçlerini otomatik biçimde ayarlayarak hayvan refahını artırmaktadır. Bu yaklaşım, stres kaynaklı sorunların ve hastalıkların yaygınlığını azaltarak üretim performansını iyileştirmektedir (Park ve ark., 2022).

Başlangıçta çevresel izleme amonyak gibi toksik gazlara odaklanırken, günümüzde karbondioksit, kükürt dioksit, azot dioksit ve partikül madde gibi kirleticilerin tahmini için AI tabanlı modeller geliştirilmiştir. Doğrusal regresyon, destek vektör regresyonu ve gradyan güçlendirme karar ağaçlarının entegrasyonu ile oluşturulan hava kalitesi endeksi modelleri,

sensör verileriyle desteklenerek düşük hata oranlarıyla gerçek zamanlı tahminler sunmaktadır (Almalawi ve ark., 2022).

Uygulama örnekleri arasında, kümes ve ahırlarda farklı katmanlardaki sıcaklık, CO₂ ve rüzgâr hızını izleyen akıllı sistemler, IoT ve robotik teknolojilerle geliştirdiği otomatik izleme ve kontrol platformları yer almaktadır. Bu sistemler, sensörlerden elde edilen verileri bulut tabanlı analizle işleyerek mobil cihazlar üzerinden erişilebilir hale getirmekte ve büyük ölçekli hayvancılıkta hassas yetiştirmenin uygulanabilirliğini artırmaktadır (Godinho ve ark., 2025).

Hayvancılığa bütünsel teknolojiler çevresel yönetimi dönüştürerek hem hayvan refahını hem de üretim verimliliğini geliştiren sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. İklim değişikliğinin önemli sonuçlarından biri olan sıcaklık stresi, IoT tabanlı mikro iklim sensörleri ile yönetilmekte; ahır içi sıcaklık-nem indeksi (THI) kritik seviyeyi aştığında fan ve sisleme sistemleri otomatik olarak devreye girmektedir. Ayrıca, AI modelleri meteorolojik tahminleri analiz ederek olası sıcaklık dalgalanmalarına karşı proaktif önlemler alınmasını, örneğin rasyon yoğunluğunun ayarlanmasını, mümkün kılmaktadır (Zhang ve ark., 2024).

6.3. Hastalıkların Erken Tanısında Yapay Zekâ ve Veri Analitiği

Giyilebilir sensörler, IoT altyapıları ve veri analitiği ile desteklenen AI tabanlı sistemler, hayvan davranışlarının ve hastalıkların gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmaktadır. SmartHerd gibi platformlar, sınırlı internet bağlantısına sahip çiftliklerde dağıtık hesaplama çözümleri sunarken; sosyal davranış grafikleri ve bulaşma olasılığı modelleri mastitis gibi hastalıkların erken tespitine katkı sağlamaktadır (Taneja ve ark., 2019).

AI algoritmaları, klinik semptomlar, laboratuvar verileri ve tıbbi görüntüleri analiz ederek teşhis doğruluğunu artırmakta, CNN tabanlı modeller ise yüksek hassasiyetle otonom teşhis sistemleri geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Kesimhanelerde lezyonların otomatik teşhisi gibi uygulamalar, AI'nın pratik faydalarını göstermektedir. Ayrıca, makine öğrenimi algoritmaları çevresel stres faktörleri ile fizyolojik tepkiler arasındaki ilişkileri önyargısız biçimde modelleyerek ısı stresi yönetiminde kullanılmakta; temassız biyometrik sistemler kalp atış hızı, solunum hızı ve cilt sıcaklığı gibi parametreleri analiz ederek hayvan refahının otomatik değerlendirilmesini sağlamaktadır (Chatterjee, Ray ve Mohanty, 2021).

Sensör ve AI entegrasyonu, davranış değişiklikleri, iştah düşüşleri ve rumen anomalilerini klinik belirtiler ortaya çıkmadan tespit edebilmekte; bu da erken teşhisi kolaylaştırarak tedavi başarısını artırmakta ve antibiyotik kullanımını azaltmaktadır. Bolus sensörleri ise gastrointestinal pH ve sıcaklık gibi parametreleri ölçerek hayvanların iç fizyolojik durumu hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır (de Freitas Curti ve ark., 2023).

7. ENTEGRASYONUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE VERİMLİLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Dijital dönüşüm süreci, tarım ve hayvancılık sektörlerinde önemli fırsatlar sunmakla birlikte çeşitli teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Öncelikle, sensör ve otomasyon sistemlerinin yüksek ilk yatırım maliyetleri üreticiler için önemli bir bariyer oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, kırsal bölgelerde internet erişiminin ve bant genişliğinin yetersizliği, dijital altyapının etkin kullanımını sınırlamaktadır. Toplanan verilerin mülkiyeti ve güvenliği konusundaki belirsizlikler, veri yönetimi açısından kritik bir sorun teşkil etmektedir. Ayrıca, üreticilerin

dijital okuryazarlık düzeylerinin yetersizliği, teknolojilerin verimli kullanımını engelleyebilmektedir. Farklı marka ve cihazların entegrasyonundaki standardizasyon eksiklikleri ise sistemler arası uyumluluk sorunlarını beraberinde getirmektedir (Namkhah ve ark., 2023).

Bununla birlikte, dijital teknolojilerin yaygınlaşması ve ölçek ekonomilerinin devreye girmesiyle birlikte maliyetlerin düşmesi, altyapı ve eğitim alanındaki gelişmelerin hızlanması ve standardizasyon süreçlerinin ilerlemesi beklenmektedir. Dolayısıyla, mevcut bariyerlerin zamanla aşılacağı ve dijital dönüşümün sürdürülebilir bir şekilde yaygınlaşacağı öngörülmektedir (Neethirajan, 2023).

8. GELECEĞE YÖNELİK EĞİLİMLER

Tarım ve hayvancılığın geleceği, giderek daha otonom ve veriye dayalı sistemler üzerine inşa edilmektedir. Bu bağlamda, insan müdahalesinin en aza indirildiği tam otonom çiftlikler, üretim süreçlerinde etkinliği artıran yenilikçi yönetim modelleri olarak öne çıkmaktadır. İklim hedefleri doğrultusunda geliştirilen metan takibi teknolojileri, bireysel hayvanların emisyonlarını ölçen giyilebilir sensörler aracılığıyla çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Blockchain tabanlı izlenebilirlik sistemleri, gıda zincirinde şeffaflığı ve güveni artırarak tüketiciye güvenilir bilgi sunmaktadır. Ayrıca, dijital ikiz (Digital Twin) uygulamaları, çiftliklerin sanal kopyaları üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlarla olası risklerin önceden belirlenmesine ve yönetimsel kararların optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu eğilimler, düşük karbonlu ve iklim değişikliğine dirençli bir tarım sektörünün temel yapı taşlarını oluşturarak sürdürülebilir üretim ve çevresel sorumluluk açısından kritik bir dönüşüm sürecini temsil etmektedir (Şonea ve ark., 2023).

9. SONUÇ

Dijital teknolojiler, sensör sistemlerinden IoT altyapılarına, yapay zekâdan otomasyon ve robotik uygulamalara kadar geniş bir yelpazede tarım ve hayvancılıkta devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Sürekli veri toplama, anlık analiz ve otomatik kontrol mekanizmaları sayesinde bitki, hayvan ve çevre arasındaki dinamik ilişkiler daha doğru bir şekilde izlenebilmekte, böylece yem formülasyonu, besleme yönetimi, çevresel stres kontrolü ve hastalıkların erken teşhisi gibi kritik alanlarda yüksek düzeyde hassasiyet elde edilmektedir. Özellikle hassas besleme uygulamaları, bireysel hayvan gereksinimlerine dayalı rasyon düzenlemeleri ile hem üretim verimliliğini artırmakta hem de atık ve emisyon miktarlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

Dijital dönüşüm sürecinde altyapı eksiklikleri, yüksek yatırım maliyetleri, dijital okuryazarlık yetersizlikleri ve veri güvenliğine ilişkin belirsizlikler önemli sınırlılıklar oluşturmaktadır. Sektördeki bu bariyerlerin aşılabilmesi için kamu politikalarının destekleyici bir çerçeve sunması, üreticilere yönelik eğitim programlarının yaygınlaştırılması, kırsal internet altyapısının güçlendirilmesi ve standartlaştırılmış teknik protokollerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Geleceğe yönelik projeksiyonlar, tarım ve hayvancılık sektörlerinde otonom sistemlerin, dijital ikizlerin, metan takip teknolojilerinin ve blockchain tabanlı izlenebilirlik uygulamalarının daha yaygın hale geleceğini göstermektedir. Bu teknolojik dönüşüm, yalnızca üretim süreçlerini optimize etmekle kalmayacak; aynı zamanda düşük karbonlu, dayanıklı ve çevre dostu tarımsal üretim modellerinin oluşturulmasına olanak sağlayacaktır.

Sonuç olarak, dijitalleşme; iklim değişikliğine uyumlu, kaynak kullanımında verimli, hayvan refahını önceleyen ve gıda

güvenliğini destekleyen sürdürülebilir tarım ve hayvancılık sistemlerinin inşasında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada ele alınan teknolojik yaklaşımlar, geleceğin iklim dirençli üretim sistemlerinin şekillendirilmesi açısından stratejik bir rehber niteliği taşımakta olup, sektördeki dönüşümün bilimsel temellere dayalı olarak hızlandırılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aarif, M., Alam, A. ve Hotak, Y. (2025). Smart Sensor Technologies Shaping the Future of Precision Agriculture: Recent Advances and Future Outlooks. *Journal of Sensors*. doi:10.1155/js/2460098
- Adesogan, A. T., Havelaar, A. H., McKune, S. L., Eilittä, M. ve Dahl, G. E. (2020). Animal source foods: Sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? Perspective matters. *Global Food Security*, 25(May 2019). doi:10.1016/j.gfs.2019.100325
- Akintan, O., Gebremedhin, K. G. ve Uyeh, D. D. (2024). Animal Feed Formulation—Connecting Technologies to Build a Resilient and Sustainable System. *Animals*, 14(10), 1–16. doi:10.3390/ani14101497
- Almalawi, A., Alsolami, F., Khan, A. I., Alkhathlan, A., Fahad, A., Irshad, K., ... Alfakeeh, A. S. (2022). An IoT based system for magnify air pollution monitoring and prognosis using hybrid artificial intelligence technique. *Environmental Research*, 206(September 2021), 112576. doi:10.1016/j.envres.2021.112576
- Araújo, S. O., Peres, R. S., Barata, J., Lidon, F. ve Ramalho, J. C. (2021). Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, 11(4), 1–37. doi:10.3390/agronomy11040667
- Balakrishnan, P. (2024). Climate Change And Its Impact On Livestock Production Systems: Adaptation Strategies And Future Direction. *Revista Electronica De Veterinaria*, 25(1), 3649–3658. doi:10.69980/redvet.v25i1.1679
- Bashiru, H. A. ve Oseni, S. O. (2025). Simplified climate change adaptation strategies for livestock development in low-and middle-income countries. *Frontiers in Sustainable*

Food Systems, 9(April), 1–17.
doi:10.3389/fsufs.2025.1566194

Bassi, A., Bauer, M., Fiedler, M., Kramp, T., van Kranenburg, R., Lange, S. ve Meissner, S. (2013). Introduction to the Internet of Things. *Enabling Things to Talk: Designing IoT Solutions with the IoT Architectural Reference Model* içinde . doi:10.1007/978-3-642-40403-0

Brijs, J., Føre, M., Gräns, A., Clark, T. D., Axelsson, M. ve Johansen, J. L. (2021). Bio-sensing technologies in aquaculture: How remote monitoring can bring us closer to our farm animals. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1830). doi:10.1098/rstb.2020.0218

Chatterjee, P. S., Ray, N. K. ve Mohanty, S. P. (2021). LiveCare: An IoT-Based Healthcare Framework for Livestock in Smart Agriculture. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 67(4), 257–265. doi:10.1109/TCE.2021.3128236

Cheng, M., McCarl, B. ve Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, 13(1). doi:10.3390/atmos13010140

Dayıoğlu, M. A. ve Türker, U. (2021). Digital transformation for sustainable future-agriculture 4.0: A review. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(4), 373–399. doi:10.15832/ankutbd.986431

de Freitas Curti, P., Selli, A., Pinto, D. L., Merlos-Ruiz, A., de Carvalho Balieiro, J. C. ve Ventura, R. V. (2023). Applications of livestock monitoring devices and machine learning algorithms in animal production and reproduction: an overview. *Animal Reproduction*, 20(2), 1–14. doi:10.1590/1984-3143-AR2023-0077

- Dinar, A., Tieu, A. ve Huynh, H. (2019). Water scarcity impacts on global food production. *Global Food Security*, 23(May), 212–226. doi:10.1016/j.gfs.2019.07.007
- Ding, L., Zhang, C., Yue, Y., Yao, C., Li, Z., Hu, Y., ... Li, Q. (2025). Wearable Sensors-Based Intelligent Sensing and Application of Animal Behaviors: A Comprehensive Review. *Sensors*, 25(14), 1–30. doi:10.3390/s25144515
- Dooyum, U. D., Mallipeddi, R., Pamulapati, T., Park, T., Kim, J., Woo, S. ve Ha, Y. (2018). Interactive livestock feed ration optimization using evolutionary algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155(November 2017), 1–11. doi:10.1016/j.compag.2018.08.031
- Godde, C. M., Mason-D'Croz, D., Mayberry, D. E., Thornton, P. K. ve Herrero, M. (2021). Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Global Food Security*, 28(January). doi:10.1016/j.gfs.2020.100488
- Godinho, A., Vicente, R., Silva, S. ve Coelho, P. J. (2025). Wireless Environmental Monitoring and Control in Poultry Houses: A Conceptual Study. *Internet of Things*, 6(2), 1–24. doi:10.3390/iot6020032
- Gouiza, N., Jebari, H. ve Reklou, K. (2024). Integration of Iot-Enabled Technologies and Artificial Intelligence in Diverse Domains: Recent Advancements and Future Trends. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 102(5), 1975–2029.
- Jiménez, L., Capa-Mora, D., Fierro, N., Lasso, J., Roa, J., Bermeo, J., ... Carrera, R. (2025). Livestock and Climate Change: How Do Livestock Practices Impact Greenhouse Gas Emissions in Holders Fields in Zamora Chinchipe?

Environments - *MDPI*, 12(11), 1–17.
doi:10.3390/environments12110443

- Kostruykov, S. G., Matyakubov, H. B., Masterova, Y. Y., Kozlov, A. S., Pryanichnikova, M. K., Pynenkov, A. A. ve Khlyuchina, N. A. (2023). Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy. *Journal of Analytical Chemistry*, 78(6), 718–727. doi:10.1134/S1061934823040093
- Maduro Dias, C., Nunes, H. ve Borba, A. (2024). Near-Infrared Spectroscopy in Animal Nutrition: Historical Insights, Technical Principles, and Practical Applications. *Analytica*, 5(4), 481–498. doi:10.3390/analytica5040033
- Makkar, H. P. S. ve Ankers, P. (2014). Towards sustainable animal diets: A survey-based study. *Animal Feed Science and Technology*, 198, 309–322. doi:10.1016/j.anifeedsci.2014.09.018
- Mariem, S. Ben, Soba, D., Zhou, B., Loladze, I., Morales, F. ve Aranjuelo, I. (2021). Climate Change, Crop Yields, and Grain Quality of C3 Cereals: A Meta-Analysis of [CO₂], Temperature, and Drought Effects. *Plants*, 10(1052), 1–19.
- Misra, N. N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M. S., Upadhyay, R. ve Martynenko, A. (2022). IoT, Big Data, and Artificial Intelligence in Agriculture and Food Industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6305–6324. doi:10.1109/JIOT.2020.2998584
- Muñoz-Ulecia, E., Bernués, A., Briones-Hidrovo, A., Casasús, I. ve Martín-Collado, D. (2023). Dependence on the socio-economic system impairs the sustainability of pasture-based animal agriculture. *Scientific Reports*, 13(1), 1–11. doi:10.1038/s41598-023-41524-4

- Naderi, L., Karamidehkordi, E., Badsar, M. ve Moghadas, M. (2024). Impact of climate change on water crisis and conflicts: Farmers' perceptions at the ZayandehRud Basin in Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54(March), 101878. doi:10.1016/j.ejrh.2024.101878
- Namkhah, Z., Fatemi, S. F., Mansoori, A., Nosratabadi, S., Ghayour-Mobarhan, M. ve Sobhani, S. R. (2023). Advancing sustainability in the food and nutrition system: a review of artificial intelligence applications. *Frontiers in Nutrition*, 10(November), 1–8. doi:10.3389/fnut.2023.1295241
- Neethirajan, S. (2023). Artificial Intelligence and Sensor Innovations: Enhancing Livestock Welfare with a Human-Centric Approach. *Human-Centric Intelligent Systems*, 4(1), 77–92. doi:10.1007/s44230-023-00050-2
- Park, M., Britton, D., Daley, W., McMurray, G., Navaei, M., Samoylov, A., ... Xu, J. (2022). Artificial intelligence, sensors, robots, and transportation systems drive an innovative future for poultry broiler and breeder management. *Animal Frontiers*, 12(2), 40–48. doi:10.1093/af/vfac001
- Rapiya, M., Mndela, M. ve Ramoelo, A. (2025). Sustainable Food Systems Through Livestock–Pasture Integration. *Agriculture (Switzerland)*, 15(9). doi:10.3390/agriculture15090967
- Ravi, G. ve Choi, J. W. (2022). Data-Driven Intelligent Feeding System for Pet Care. *International Conference on Control, Automation and Systems, 2022-Novem(Iccas)*, 2013–2018. doi:10.23919/ICCAS55662.2022.10003775
- Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D. A. N., Kumar, S. ve Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in

- improving agriculture production and addressing food security – A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100190. doi:10.1016/j.jafr.2021.100190
- Şonea, C., Gheorghe-Irimia, R.-A., Tapaloaga, D. ve Tapaloaga, P.-R. (2023). Nutrition and Animal Agriculture in The 21st Century: A Review of Future Prospects. *Annals of the University of Craiova*, 51(1).
- Tabler, T., Liang, P., Maharjan, T., Thornton, J., Drewry, J., Moon, J. ve Wells, J. (2023). *Water scarcity is greatest threat to global food security*. University of Tennessee Extension Publition.
- Taneja, M., Jalodia, N., Byabazaire, J., Davy, A. ve Olariu, C. (2019). SmartHerd management: A microservices-based fog computing–assisted IoT platform towards data-driven smart dairy farming. *Software - Practice and Experience*, 49(7), 1055–1078. doi:10.1002/spe.2704
- Tedeschi, L. (2022). ASAS-NANP symposium: Mathematical modeling in animal nutrition: The progression of data analytics and artificial intelligence in support of sustainable development in animal science. *Journal of Animal Science*, 100(6), 1–11. doi:10.1093/jas/skac111
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. ve Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328. doi:10.1111/gcb.12581
- Viscarra Rossel, R. A. ve Bouma, J. (2016). Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agricultural Systems*, 148, 71–74. doi:10.1016/j.agry.2016.07.001
- Zhang, L., Guo, W., Lv, C., Guo, M., Yang, M., Fu, Q. ve Liu, X. (2024). Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current

applications and research progress. *Animal Research and One Health*, 2(1), 93–109. doi:10.1002/aro2.44

Zhang, S., Lai, C., Zhao, J. ve Wang, J. (2025). Big Data and AI-Powered Modeling: A Pathway to Sustainable Precision Animal Nutrition. *Advanced Science*, 12. doi:10.1002/advs.202507564

GIDA ENDÜSTRİSİNDE BİYOKORUYUCU KÜLTÜRLERİN KULLANIMI: LAKTİK ASİT BAKTERİLERİ

Enise Begüm GÖÇMEZ¹

Nisanur EKTİK SEZEN²

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği; bireylerin her zaman aktif ve sağlıklı bir yaşam sürdürebilmeleri için gerekli olan besin öğelerini ve gıda tercihlerini karşılayan yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya fiziksel, sosyal ve ekonomik olarak erişebilme durumu şeklinde tanımlanmaktadır (Mbow vd., 2019). Gıda üretim zincirinin her aşamasında ürünler; fiziksel, kimyasal veya biyolojik tehlikelerle kontamine olabilir ve bu durum hem gıda güvenliğini hem de halk sağlığını tehdit edebilir. Küresel ölçekte birçok ülke, artan nüfusun beslenme gereksinimlerini karşılayacak miktarda, kaliteli ve güvenli gıda temini konusunda ciddi güçlüklerle karşı karşıyadır (Cortés-Sánchez vd., 2024).

Son yıllarda tüketiciler arasında artan farkındalık, gıda güvenliğiyle ilgili beklentileri de değiştirmiştir. Bozulmaya neden olan ve patojen mikroorganizmaların etkilerini azaltmak amacıyla, kimyasal koruyucu veya katkı maddesi içermeyen ürünlere olan talep giderek artmaktadır (Karmakar vd., 2023). Geleneksel kimyasal koruyucuların olası toksik etkileri ve antimikrobiyal direnç gibi sağlık sorunları, doğal ve biyolojik

¹ Dr., Balıkesir Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, ORCID: 0000-0001-7364-506X.

² Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Besin/Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Bölümü, ORCID: 0000-0001-9389-4362.

kökenli koruma yöntemlerine yönelimi hızlandırmıştır. Bu bağlamda biyokoruma (biopreservation), gıdaların raf ömrünü ve mikrobiyolojik güvenliğini artırmada çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir yaklaşım olarak dikkat çekmektedir (Cortés-Sánchez vd., 2024; Marcelli vd., 2024).

Biyokoruma, ürünün kalitesini ve raf ömrünü uzatmak amacıyla mikroorganizmaların veya bunlar tarafından üretilen birincil ve/veya ikincil metabolitlerin (örneğin organik asitler, hidrojen peroksit, reuterin ve bakteriyosinler) kullanılmasına dayalı bir tekniktir. Çeşitli Gram-pozitif ve Gram-negatif bakteriler biyokoruyucu potansiyel gösterebilse de bu amaç için en yaygın kullanılan ve en etkili mikroorganizmalar laktik asit bakterileridir (LAB) (Souza vd., 2022). Laktik asit bakterileri; asit üretimi, düşük pH toleransı, bakteriyosin sentezi ve besin maddeleri için rekabet gibi özellikleriyle gıdalarda doğal bir mikrobiyal denge sağlayarak bozulmayı geciktirir ve güvenliğini artırır (Karmakar vd., 2023).

Biyokoruyucu kültürlerin özellikle laktik asit bakterileri temelinde ele alınması; gıda endüstrisinde kimyasal koruyuculara doğal alternatiflerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir üretim hedeflerinin desteklenmesi açısından önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu kitap bölümü, biyokoruyucu kültürlerin özellikle laktik asit bakterileri temelinde gıda endüstrisindeki kullanımını ele almakta; söz konusu mikroorganizmaların mekanizmalarını, etkilerini ve uygulama potansiyellerini güncel literatür ışığında tartışmayı amaçlamaktadır.

2. LAKTİK ASİT BAKTERİLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Laktik asit bakterileri, spor oluşturmayan, Gram pozitif, katalaz negatif, sitokrom içermeyen, fakültatif anaerobik ve aside

toleranslı mikroorganizmalardır. Bu bakteriler, şeker fermantasyonu sırasında laktik asidi temel son ürün olarak üretmeleriyle karakterize edilen, oldukça heterojen bir grubu temsil ederler (Pujato vd., 2024).

Laktik asit bakterileri doğada geniş bir dağılıma sahiptir ve bitkisel materyaller, süt ürünleri, et ve balık gibi gıdalar, insan ve hayvan gastrointestinal sistemi ile çeşitli çevresel ortamlarda doğal olarak bulunabilirler. Taksonomik olarak bu grup *Aerococcus*, *Alloiococcus*, *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Dolosigranulum*, *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus*, *Globicatella*, *Lactosphaera*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Vagococcus*, *Bifidobacterium* ve *Weissella* cinslerini kapsamaktadır (Cortés-Sánchez vd., 2024).

Fermantasyon yetenekleri sayesinde LAB, yüzyıllardır gıdaların biyolojik korunmasında (biyoprezervasyon) önemli rol oynamaktadır. Organik asit, bakteriyosin, hidrojen peroksit ve diğer antimikrobiyal bileşiklerin üretimi yoluyla gıdaların mikrobiyal stabilitesini artırır ve raf ömrünü uzatır. Bu yönüyle laktik asit bakterileri, gıda koruma açısından kullanılan en eski ve en güvenilir biyoteknolojik ajanlar arasında yer alır (Cirat vd., 2024). Bazı laktik asit bakterisi türleri, yalnızca biyokoruyucu etkileriyle değil, aynı zamanda konak sağlığı üzerinde olumlu etkiler göstermeleri nedeniyle de önem taşımaktadır. Bu türler, bağırsak mikrobiyotasını düzenleme, patojenlerle rekabet etme ve bağışıklık sistemini destekleme gibi özellikleriyle probiyotik olarak kabul edilmektedir (Cortés-Sánchez vd., 2024).

Laktik asit bakterilerinin geniş ekolojik dağılımı, metabolik çeşitliliği ve antimikrobiyal bileşik üretme kapasiteleri, onları gıda endüstrisinde biyokoruyucu kültür olarak kullanım için önemli adaylar hâline getirmiştir. Ancak her laktik asit bakterisi suşu aynı düzeyde biyokoruyucu potansiyele sahip

değildir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda kullanılacak kültürlerin seçimi; güvenlik, etkinlik ve teknolojik uyum gibi kriterlere dayanmalıdır.

3. KORUYUCU KÜLTÜRLERİN SEÇİM KRİTERLERİ

Laktik asit bakterileri, patojenik olmayan mikroorganizmalar olup, *Enterococcus* gibi bazı türlerin insan veya hayvanlarda fırsatçı patojen olarak davranabilmesi dışında “Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen (GRAS)” mikroorganizmalar arasında yer almaktadır (Özogul ve Hamed, 2018). Bu bakteriler, antimikrobiyal metabolit üretme kapasiteleri ve gıdalardaki bozulma mikroflorasını kontrol edebilme yetenekleri nedeniyle biyokoruyucu kültür olarak gıda endüstrisinde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir.

Son yıllarda giderek yaygınlaşan “Temiz Etiket (Clean Label)” yaklaşımı, kimyasal katkı maddelerinin azaltılmasını ve doğal koruma stratejilerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu eğilim, yeni biyokoruyucu kültürlerin tanımlanması, seçilmesi ve ticarileştirilmesi yönündeki araştırmaları hızlandırmıştır (Souza vd., 2022). Gıda endüstrisinde kullanılacak koruyucu kültürlerin seçimi; güvenlik, etkinlik, teknolojik dayanıklılık ve çevresel adaptasyon gibi belirli kriterlere dayanmalıdır.

Bir LAB suşunun biyokoruyucu kültür olarak değerlendirilebilmesi için aşağıdaki temel özellikleri taşıması gerekir:

1. Genetik stabilite: Uzun süreli kültürleme ve endüstriyel üretim koşullarında genetik bütünlüğünü koruyabilmelidir.
2. Antimikrobiyal etkinlik: Farklı gıda matrislerinde, düşük konsantrasyonlarda dahi bozulmaya neden olan

ve patojen mikroorganizmalara karşı geniş spektrumlu etki göstermelidir.

3. Düşük besin gereksinimi: Basit besi ortamlarında gelişim gösterebilmesi, endüstriyel üretim açısından avantaj sağlar.
4. Çevresel dayanıklılık: Gıda işleme, depolama, soğutma veya paketlenme gibi stres koşullarında canlılığını sürdürebilmelidir.
5. Güvenlik profili: İnsan sağlığı açısından patojenik veya toksik etki göstermemelidir (Souza vd., 2022).

Bu kriterlere uygun olarak seçilen LAB kültürleri, gıdalarda biyokoruma etkinliğini artırarak raf ömrünü uzatabilir, patojen gelişimini engelleyebilir ve kimyasal koruyucuların kullanımını azaltabilir. Örneğin, *Latilactobacillus sakei* gibi türlerin antimikrobiyal bileşik üretimi yoluyla balık ve et ürünlerinde mikrobiyal yükü düşürdüğü ve raf ömrünü uzattığı gösterilmiştir (Ozogul vd., 2024).

Bu çerçevede, koruyucu kültürlerin seçimi yalnızca mikrobiyolojik etkinliklerine değil, aynı zamanda teknolojik uygunluk, duyuusal etki ve ürün güvenliği gibi çok boyutlu parametrelere dayanmalıdır. Böylece hem gıda kalitesi korunmakta hem de “temiz etiket” yaklaşımına uygun sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlanmaktadır.

4. KORUYUCU KÜLTÜRLERİN ANTİBAKTERİYEL ÖZELLİKLERİ

Biyokoruyucu laktik asit bakterileri, antimikrobiyal etkilerini başlıca üç temel mekanizma aracılığıyla ortaya koymaktadır. İlk olarak, yer değiştirme veya dışlama mekanizması, bu mikroorganizmaların biyolojik yüzeylere güçlü bir şekilde tutunma ve uzun süre kolonize olabilme yeteneklerine

dayanmaktadır. Bu özellik, potansiyel patojen veya bozulma etmeni mikroorganizmaların bağlanma bölgelerine erişimini kısıtlayarak rekabetçi dışlama etkisi yaratır ve konak ya da gıda yüzeylerinde mikrobiyal yerleşimi sınırlandırır.

İkinci olarak, besin ve alan için rekabet mekanizması, aynı ortam içerisinde bulunan mikroorganizmaların sınırlı kaynaklar - özellikle karbon, azot ve mineraller- üzerindeki rekabetine dayanmaktadır. Bu rekabet sonucunda, laktik asit bakterileri metabolik etkinlikleriyle ortamdaki besinlerin erişilebilirliğini azaltarak patojenlerin çoğalmasını dolaylı biçimde baskılar (Ben Said vd., 2019).

Üçüncü mekanizma ise antimikrobiyal metabolit üretimidir. Laktik asit bakterileri, metabolik aktiviteleri sonucunda organik asitler, hidrojen peroksit, diasetil ve bakteriyosinler gibi çeşitli antimikrobiyal metabolitleri sentezleme kapasitesine sahiptir (Pujato vd., 2024).

Organik asitler; LAB, karbonhidrat fermantasyonu sonucu laktik asit, asetik asit, propiyonik asit, formik asit ve süksinik asit gibi organik asitleri sentezler. Bu asitler, pH'yı düşürerek mikroorganizmaların hücre içi dengesini bozar ve Gram negatif ile Gram pozitif bakteriler, mayalar ve küfler üzerinde güçlü inhibitör etki gösterir. Özellikle *E. coli*, *Pseudomonas* ve *Clostridium* gibi asit toleransı düşük mikroorganizmalar üzerinde etkili oldukları bildirilmiştir. Bu özellikleri, organik asitleri gıda güvenliğinde doğal bir koruyucu ajan haline getirmiştir (Bangar vd., 2022; Cirat vd., 2024).

Hidrojen peroksit; LAB tarafından aerobik koşullarda üretilen hidrojen peroksit, özellikle Gram negatif bakterilerde hücre zarındaki proteinlerin SH gruplarını oksitleyerek hücre hasarına yol açar (Marcelli vd., 2024). H₂O₂ üretimi, özellikle düşük sıcaklıklarda *Listeria monocytogenes* ve *Pseudomonas* spp. gibi patojenlerin gelişimini engelleyebilir. Bununla birlikte,

yüksek konsantrasyonlarda koku ve renk değişikliklerine yol açabileceğinden kontrollü kullanımı önemlidir (Reis vd., 2012)

Karbondioksit (CO₂); LAB tarafından üretilen CO₂, gıda matrisinde aerobik mikroorganizmaların çoğalmasını sınırlandırarak yarı anaerobik bir atmosferin oluşmasına katkı sağlar. Bu durum, özellikle Gram negatif bakteriler ve psikrotrofik mikroorganizmalar üzerinde inhibitör bir etki meydana getirir. LAB'nin metabolik faaliyetleri sonucu açığa çıkan CO₂, ortam koşullarını değiştirerek baskın mikrobiyal türlerin dağılımını etkilemekte, metabolit üretimini azaltmakta ve bunun sonucunda hem mikrobiyal büyümeyi hem de bozulma sürecini geciktirmektedir (Fischer ve Titgemeyer, 2023; Ben Said vd., 2019). Ayrıca CO₂, bazı peynir türlerinde karakteristik göz (delik) oluşumuna katkı sağlayarak ürünün duyuşal özelliklerini etkileyebilmektedir (Marcelli vd., 2024; Ben Said vd., 2019).

Diasetil; Bazı *Leuconostoc*, *Lactobacillus* ve *Pediococcus* türleri tarafından üretilen diasetil, NAD(P) rejenerasyonu sırasında oluşan bir metabolittir. Diasetilin hem *Listeria* gibi Gram-pozitif bakterileri hem de *Salmonella*, *Yersinia*, *E. coli* ve *Aeromonas* gibi Gram-negatif bakterileri inhibe edebildiği bilinmektedir (Karmakar vd., 2023). Ayrıca, tereyağ ve taze peynir gibi süt ürünlerinde karakteristik aroma ve lezzet oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Diasetil, ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından “GRAS” olarak sınıflandırılmıştır (Ben Said vd., 2019).

Reuterin; *Limosilactobacillus reuteri* (eski adıyla *Lactobacillus reuteri*) suşları tarafından gliserolün anaerobik metabolizması sırasında sentezlenen geniş spektrumlu bir antimikrobiyal bileşiktir. Reuterin, özellikle *L. reuteri* tarafından sentezlense de *Bacillus*, *Citrobacter*, *Clostridium*, *Enterobacter* ve *Klebsiella* gibi diğer bakteriler tarafından da üretilenmektedir (Vimont vd., 2019). Bu bileşik; Gram-pozitif ve Gram-negatif

bakteriler, mayalar, küf mantarları ve protozoalar dahil olmak üzere çok çeşitli mikroorganizmalara karşı güçlü inhibitör etki göstermektedir (Ortiz-Rivera vd., 2017). Reuterinin antimikrobiyal etkinliğinin, hücresel bileşenlerde yer alan tiol (-SH) grupları ile reaksiyona girerek oksidatif strese yol açmasından kaynaklandığı bildirilmektedir (Fischer ve Titgemeyer, 2023). Bu nedenle reuterin, yalnızca doğal bir biyokoruyucu olarak değil, aynı zamanda oksidatif stres aracılı antimikrobiyal mekanizmaların anlaşılmasında da önemli bir model bileşik olarak değerlendirilmektedir.

Bakteriyosinler; Bakteriyosinler, Gram pozitif ve Gram negatif bakteriler tarafından ribozomal olarak sentezlenen, antibakteriyel aktiviteye sahip proteinler veya kısa polipeptitlerdir (Sugrue vd., 2020). Bu moleküller, üreten mikroorganizma dışındaki bakterilere karşı hücre yüzeyinde bulunan özgül reseptörlerle etkileşime girerek etkilerini gösterir. Reseptör bağlanması genellikle hücre zarında gözenek oluşumuna, iyon dengesinin bozulmasına ve sonuçta hücre ölümüne yol açar.

Gıda mikrobiyolojisi açısından bakteriyosinlerin önemi, doğal ve güvenli biyokoruyucular olarak kullanılabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu çerçevede, en iyi bilinen bakteriyosinlerin laktik asit bakterileri tarafından üretilmesi ve bu mikroorganizmaların GRAS statüsüne sahip olmaları, söz konusu bileşiklerin gıdalarda güvenle uygulanabileceğini göstermektedir (Zimina vd., 2020). Ayrıca bakteriyosinlerin ısı ve pH değişimlerine karşı stabil olmaları ile belirli gıda sistemlerinde uygun çözünürlük ve dayanıklılık özellikleri sergilemeleri, bu biyokoruyucuların teknolojik açıdan işlevselliğini daha da artırmaktadır (Silva vd., 2018)

Bakteriyosinler, biyosentetik özellikleri ve yapısal özelliklerine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır: Sınıf I, küçük post-

translasyonel olarak modifiye edilmiş peptitleri (lantibiyotikler); Sınıf II, modifiye edilmemiş, genellikle küçük ve ısıya dayanıklı bakteriyosinleri ve Sınıf III, büyük molekül ağırlıklı, genellikle ısıya duyarlı peptitleri kapsamaktadır (Zimina vd., 2020).

Nisin *Lactococcus lactis* suşları tarafından üretilen bir bakteriyosin olup, lantibiyotik sınıfında yer almaktadır. Gıdaların biyolojik korunmasında en yaygın kullanılan bakteriyosinlerden biridir ve insan tüketimi için güvenli (GRAS) kabul edilmektedir. Nisinin et ürünlerinde koruyucu olarak kullanıldığı, ürünlerin raf ömrünü uzattığı ve özellikle *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Listeria* ve *Clostridium* gibi Gram pozitif bakterilere karşı güçlü antimikrobiyal etki gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca pastörize ve steril gıdalarda yeniden kontaminasyonu önlemek amacıyla da kullanılmaktadır (Rai vd., 2016; Hintoğlu ve Sevim, 2025).

Pediocinler Sınıf II bakteriyosinler arasında yer almakta olup özellikle süt ürünlerinde ticari koruyucu olarak değerlendirilmektedir. Diğer bakteriyosin sınıflarına kıyasla daha yüksek aktiviteye, pH ve sıcaklık stabilitesine sahip oldukları; ayrıca donma ve kaynatma işlemlerinden minimal düzeyde etkilendikleri rapor edilmiştir (Silva vd., 2018).

Laktisin ise *Lactococcus lactis*'in bazı suşları tarafından üretilmekte olup, Laktisin 3147 ile Laktisin 481 olmak üzere iki ana formda bulunurlar. Özellikle Laktisin 3147'nin toz formu, bebek sütü formülleri, doğal yoğurt, süzme peynir ve diğer süt ürünlerinde *Listeria monocytogenes* ve *Bacillus* türlerinin kontrolünde etkili bulunmuştur. Bu bakteriyosinlerin kullanımı, patojenlerin tamamen elimine edilmesini her zaman sağlamasa da, süt ürünlerinde mikrobiyal güvenliğin artırılması, raf ömrünün uzatılması ve patojenlerin yeniden kontaminasyon riskinin azaltılması açısından önemli bir koruyucu rol oynamaktadır (Ameer vd., 2019).

Nisin, pediocin ve laktisinlerin yanı sıra enterosin, sakasin ve lökosin gibi diğer bakteriyosinlerin de farklı gıda ürünlerinde biyolojik koruyucu olarak kullanılabildiği, bu bileşiklerin özellikle et, süt ve fermente ürünlerin mikrobiyal stabilitesini artırmada etkili olduğu bildirilmektedir (Rai vd., 2016).

5. LAKTİK ASİT BAKTERİLERİNİN FARKLI GIDA MATRİSLERİNDEKİ BİYOKORUYUCU UYGULAMALARI

Biyokoruyucu kültürlerin, gıda matrisinin doğal mikrobiyotasının bir parçası olması nedeniyle, ürünün duyuusal, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturma olasılığı oldukça düşüktür (Danielski vd., 2022). Bu durum, laktik asit bakterilerinin özellikle gıda kalitesini koruma ve raf ömrünü uzatma açısından uygun biyoteknolojik araçlar olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar biyokoruma stratejilerinin yalnızca fermente ürünlerde değil, aynı zamanda çiğ ve yarı işlenmiş gıdalarda da başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. LAB temelli biyokoruyucu kültürlerin süt ve süt ürünleri, kırmızı ve beyaz et, balık ve deniz ürünleri ile sebze ve meyve gibi farklı gıda sistemlerinde duyuusal özellikleri değiştirmeden saprofit ve patojen mikroorganizmaları baskıladığı çok sayıda araştırmayla ortaya konmuştur.

5.1. Süt ve Süt Ürünleri Uygulamaları

Laktik asit bakterileri, süt ve süt ürünlerinde hem biyokoruyucu ajan hem de yardımcı starter kültür olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu mikroorganizmalar, fermentasyon sırasında ürettikleri organik asitler, reuterin, bakteriyosinler ve antifungal metabolitler aracılığıyla hem mikrobiyal güvenliğini

artırmakta hem de ürünlerin raf ömrünü doğal yollarla uzatmaktadır (Ameer vd., 2019).

Pastörize süttten üretilen ve buzdolabı koşullarında depolanan süt ürünleri, psikrotrofik bakterilerin çoğalması açısından uygun bir ortam sunar. Bu nedenle, süt ürünlerinde biyokoruyucu kültürlerin özellikle *L. monocytogenes* kontrolüne yönelik olarak değerlendirildiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin, *Lactococcus lactis* CAU2013 suşunun kullanıldığı taze peynirlerde *L. monocytogenes* düzeyi, ticari starter kültür kullanılan peynirlere kıyasla yaklaşık 1 log daha düşük bulunmuş; bu durum, *L. lactis*'in yardımcı starter kültür olarak kullanılmasının ürün güvenliği ve raf ömrü açısından avantaj sağladığını göstermiştir (Yoon ve Kim, 2022). Benzer şekilde, *Limosilactobacillus reuteri* ve gliserolün birlikte kullanıldığı bir çalışmada, peynirin fizikokimyasal özelliklerini etkilemeden *L. monocytogenes*'in gelişiminin önemli ölçüde baskılandığı rapor edilmiştir (Olaimat vd., 2025).

Feta peyniri üzerinde yapılan bir başka araştırmada ise farklı LAB kombinasyonlarının *Listeria monocytogenes* üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ticari *Lactococcus lactis* starter kültürüyle birlikte dokuz LAB suşunun (çeşitli *Lactococcus*, *Lactobacillus* ve *Leuconostoc* türleri) oluşturduğu 13 kombinasyon test edilmiştir. Olgunlaşma sonunda bazı kombinasyonlarda *Listeria* tamamen elimine edilmiş ve kültürlerin peynirin duysal özelliklerini etkilemeden biyokoruyucu etki gösterdiği bildirilmiştir (Kamarinou vd., 2023). Bu bulgular, farklı LAB türlerinin sinerjik etkilerinin süt ürünlerinde patojen gelişimini önlemede önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Süt ürünlerinde mikrobiyal kontrolün bir diğer hedefi, *Clostridium tyrobutyricum* kaynaklı “geç şişme” kusurudur. Bu bakterinin gaz üretimi sonucu oluşan şişme, peynirlerde doku

bozukluğu, istenmeyen aroma ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Trevisiol vd. (2025), *Lacticaseibacillus casei* suşlarının Montasio peynirinde gaz üretimini baskılayarak ürünün tipik özelliklerini koruduğunu ve geç şişme kusurunu engellediğini göstermiştir. Bu bulgu, LAB'ın yalnızca mikrobiyal güvenlik değil, aynı zamanda teknolojik kalite açısından da koruyucu bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

LAB suşlarının antifungal özellikleri, süt ürünlerinde küf gelişiminin ve mikotoksin oluşumunun önlenmesinde de öne çıkmaktadır. Leyva-Salas vd. (2018), *Lactobacillus plantarum* L244 ve *L. rhamnosus* CIRM-BIA1113 suşlarının oluşturduğu kombinasyonların hem yoğurt hem de yarı sert peynir modellerinde *Penicillium commune* gelişimini 6 güne kadar geciktirdiğini ve duyu kaliteyi etkilemediğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Ramos-Pereira vd. (2021), *Lacticaseibacillus casei* Lc-51/3 ve *L. paracasei* Lp-25/1 izolatlarının *P. nordicum* ve *P. commune* büyümesini inhibe ettiğini, ayrıca okratoksin A ve siklopiazonik asit üretimini azalttığını rapor etmiştir.

5.2. Et ve Et Ürünleri Uygulamaları

Et ve et ürünleri, yüksek su ve besin içeriği nedeniyle mikrobiyal bozulmaya en yatkın gıda gruplarından. Proteinler, serbest amino asitler, peptitler ve nükleotidler gibi bileşenlerin çokluğu, bu ürünlerde hem bozulma etmenleri hem de gıda kaynaklı patojenler için uygun bir üreme ortamı oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. ve *Escherichia coli* O157:H7 gibi mikroorganizmaların kontrolünü gıda endüstrisi açısından önemli bir sorun haline getirmektedir. Kimyasal koruyucuların kullanımına yönelik kısıtlamalar ve tüketici talepleri, biyokoruyucu kültürlerin ve bunlara ait metabolitlerin et ürünlerinde doğal koruma ajanı olarak değerlendirilmesini teşvik etmektedir (Barcenilla vd., 2022).

Lactobacillus sakei ve *L. curvatus* içeren biyokoruyucu kültürlerin modifiye atmosferde paketlenmiş tavuk sosislerinde uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir çalışmada kontrol gruplarında 4 °C ve 10 °C’de depolanan ürünler 28. günde duysal bozulma göstermiştir. Buna karşın biyokoruyucu kültür uygulanan gruplarda 4 °C’de 60 gün boyunca bozulma gözlenmediği, 10 °C’de ise bozulmanın 42. günde başladığı belirtilmiştir (Ataş vd., 2021). Bir diğer çalışmada *Pediococcus acidilactici* ile inoküle edilen köfteler 10 gün boyunca 4°C’de muhafaza edilmiş ve *Salmonella* spp. sayısında 0,4 log₁₀ kob/g’lık bir azalma gözlenmiştir (İncili vd., 2020).

Et ürünlerinde doğal marinyasyon uygulamaları da biyokoruma açısından umut verici sonuçlar vermektedir. *Latilactobacillus curvatus*, *L. sakei* ve *Lactiplantibacillus plantarum* içeren LAB temelli marinyasyon soslarının, tavuk göğüs etlerinde *Salmonella* spp. ve *L. monocytogenes* gelişimini baskıladığı bildirilmiştir (Göçmez ve İlhak, 2025).

Biyokoruyucu etkinin yalnızca canlı bakterilerle değil, bunların ürettikleri postbiyotikler ve hücresiz süpernatantlarla (CFS) da elde edilebildiği bildirilmektedir. Yapılan bir araştırmada *Lactiplantibacillus plantarum*’un süpernatantının, hücre duvar bütünlüğünü bozarak *L. monocytogenes*’in büyümesini ve biyofilm oluşumunu engellediği ve bu uygulamanın tavuk etinde *Listeria* sayısını yaklaşık %85 oranında azalttığı belirtilmiştir (Liang vd., 2025). Benzer şekilde, *Leuconostoc pseudomesenteroides* T139, *Pediococcus acidilactici* T115 ve *Streptococcus thermophilus* T127 suşlarından elde edilen süpernatantların, *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes* ve *S. Typhimurium* sayılarında sırasıyla 0,82–1,41; 0,77–2,11 ve 0,71–1,78 log kob/g azalma sağladığı rapor edilmiştir (Ozturk ve Sengun, 2025). Bir başka çalışmada ise *Pediococcus acidilactici*, *L. plantarum* ve *L. sakei* kaynaklı postbiyotiklerin, gıda kaynaklı patojenleri inhibe ettiği ve tavuk

göğüs etinin raf ömrünü 9 gün uzattığı belirtilmiştir (Serter vd., 2024).

5.3. Balık ve Deniz Ürünleri Uygulamaları

Balık eti, yüksek besin içeriği nedeniyle bozulma etmenleri ve gıda patojenleri için oldukça uygun bir ortam oluşturmaktadır. Bu mikrobiyal gelişime elverişli yapı, ürünün raf ömrünün önemli ölçüde kısalmasına neden olabilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, laktik asit bakterilerinin bu ürünlerde biyokoruyucu olarak etkili olabileceğini ortaya koymuştur. Stupar vd. (2023) çalışmasında, *Leuconostoc mesenteroides* ve *Carnobacterium divergens* suşlarının 4 °C’de vakumla paketlenmiş somon filetolarında gelişerek yaklaşık 8 log kob/g düzeyine ulaştığı ve *Listeria innocua*’ya karşı bakteriyosin benzeri inhibitör etki gösterdiği bildirilmiştir. Benzer şekilde tütsülenmiş gökkuşağı alabalığında *L. monocytogenes* kontrolü için kullanılan ticari LAB miksinin (LC-LL) lökosin üretimi yoluyla hem sabit (5°C) hem de dalgalı (4-20°C) sıcaklıklarda patojenin gelişimini yaklaşık 4 log azalttığı rapor edilmiştir (Sánchez-Martín vd., 2025).

Laktik asit bakterilerinin deniz patojenleri üzerindeki etkileri de çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. *Lactobacillus delbrueckii*, *L. casei* ve *L. gasseri* suşlarının tuzlanmış balıklarda ve istiridyelerde *Vibrio parahaemolyticus* sayısını kısa sürede 10⁶’dan 10⁴ kob/g düzeyine düşürebildiği rapor edilmiştir (Khouadja vd., 2017). Pişmiş karideslerde yapılan bir başka çalışmada, *Lactococcus piscium*’un bozulma etmeni *Brochothrix thermosphacta*’nın gelişimini 3,2 log kob/g oranında azalttığı, ayrıca histamin ve tiramin üretmeyerek duyuşal özellikleri koruduğu saptanmıştır (Fall vd., 2012). Bunun yanında modifiye atmosferde paketlenmiş levreklerde *Latilactobacillus sakei* hücresiz süpernatantının bazı bitkisel özlerle (böğürtlen yaprağı ve makroalg özleri) kullanıldığında antimikrobiyal ve antioksidan

ajan olarak etkili bir koruma sağladığı rapor edilmiştir (Özoğul vd., 2024).

5.4. Meyve ve Sebze Uygulamaları

Taze ve minimal düzeyde işlenmiş meyve ve sebzeler, yüksek nem içerikleri ve besin maddeleri nedeniyle mikrobiyal gelişim için elverişli ortamlardır. Bu ürünlerin tüketimiyle ilişkili gıda kaynaklı hastalık vakalarındaki artış, kimyasal koruyuculara alternatif olarak biyokoruyucu mikroorganizmaların kullanımını gündeme getirmiştir. Laktik asit bakterileri, hem patojen mikroorganizmaları baskılayarak gıda güvenliğini artırmaları hem de ürünlerin duyuşal özelliklerini koruyarak raf ömrünü uzatmaları nedeniyle önemli biyokoruyucu ajanlar olarak değerlendirilmektedir (Ben Said vd., 2019).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, LAB suşlarının taze sebzelerde patojen kontrolü açısından etkili olduğu gösterilmiştir. *Lactococcus lactis*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus johnsonii* ve *L. acidophilus* içeren LAB karışımının, marul ve ıspanakta hasat öncesi uygulandığında *L. monocytogenes* ve *E. coli* O157 kontaminasyonunu anlamlı düzeyde azalttığı bildirilmiştir (Yin vd., 2023). Benzer şekilde, kimchi'den izole edilen probiyotik potansiyele sahip LAB suşlarının hem marul yüzeylerinde hem de paslanmaz çelik yüzeylerde *L. monocytogenes* biyofilm oluşumunu 1–2 log kob/cm² oranında azalttığı ve bu etkinin bakteriyosin üretimi ve yüzey rekabetiyle ilişkili olabileceği gösterilmiştir (Hossain vd., 2020).

Meyveler üzerine yapılan uygulamalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. *L. plantarum* ve *Pediococcus pentosaceus*'un birlikte kullanımı, çileklerde *Salmonella* spp. ve *L. monocytogenes*'e karşı önemli bir biyokoruyucu etki sağlamış, bu etki meyvenin görünümü, tadı veya dokusunda olumsuz bir değişikliğe yol açmadan gerçekleşmiştir (Yin vd., 2022).

6. SONUÇ

Laktik asit bakterileri, doğal kökenli biyokoruyucu mikroorganizmalar olarak gıda güvenliğini artıran ve bozulmayı geciktirerek ürünlerin raf ömrünü uzatan önemli ajanlardır. Organik asit, bakteriyosin, hidrojen peroksit ve antifungal metabolit üretimleri sayesinde hem patojen mikroorganizmaları hem de bozulmaya neden olan türleri etkili biçimde baskırlar. Bu süreçte gıdaların duysal ve teknolojik özelliklerini koruyarak kimyasal koruyuculara sürdürülebilir bir alternatif oluşturlar.

Tür ve suş düzeyinde gösterdikleri çeşitlilik, farklı gıda matrislerine özgü biyokoruma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle laktik asit bakterileri, modern gıda endüstrisinde temiz etiketli, doğal ve güvenli koruma yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayan, geleceğe yönelik umut vadeden biyoteknolojik araçlardır.

KAYNAKÇA

- Ataş, S., İncili, G. K., Durmuşoğlu, H., & Çalicioğlu, M. (2021). Effect of biopreservative cultures on the shelf life of modified atmosphere packaged chicken cocktail sausage. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 45(5), 796-804. <https://doi.org/10.3906/vet-2104-48>
- Ameer, S., & Aslam, S. (2019). Preservation of milk and dairy products by using biopreservatives. *Middle East Journal of Applied Science & Technology (MEJAST)*, (Peer Reviewed International Journal), 2, 72-79.
- Bangar, S. P., Suri, S., Trif, M., & Ozogul, F. (2022). Organic acids production from lactic acid bacteria: A preservation approach. *Food Bioscience*, 46, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101615>
- Barcenilla, C., Ducic, M., López, M., Prieto, M., & Álvarez-Ordóñez, A. (2022). Application of lactic acid bacteria for the biopreservation of meat products: A systematic review. *Meat Science*, 183, 108661. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108661>
- Ben Said, L., Gaudreau, H., Dallaire, L., Tessier, M., & Fliss, I. (2019). Bioprotective culture: A new generation of food additives for the preservation of food quality and safety. *Industrial Biotechnology*, 15(3), 138-147. <https://doi.org/10.1089/ind.2019.29175.lbs>
- Cirat, R., Capozzi, V., Benmechernene, Z., Spano, G., Grieco, F., & Fragasso, M. (2024). LAB antagonistic activities and their significance in food biotechnology: Molecular mechanisms, food targets, and other related traits of Interest. *Fermentation*, 10(4), 222. <https://doi.org/10.3390/fermentation10040222>

- Cortés-Sánchez, A. D. J., Jaramillo-Flores, M. E., Díaz-Ramírez, M., Espinosa-Chaurand, L. D., & Torres-Ochoa, E. (2024). Biopreservation and the safety of fish and fish products, the case of lactic acid bacteria: a basic perspective. *Fishes*, 9(8), 303. <https://doi.org/10.3390/fishes9080303>
- Danielski, G. M., Evangelista, A. G., Luciano, F. B., & de Macedo, R. E. F. (2022). Non-conventional cultures and metabolism-derived compounds for bioprotection of meat and meat products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(4), 1105-1118. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1835818>
- Fall, P. A., Pilet, M. F., Leduc, F., Cardinal, M., Duflos, G., Guérin, C., Joffraud, J. J., & Leroi, F. (2012). Sensory and physicochemical evolution of tropical cooked peeled shrimp inoculated by *Brochothrix thermosphacta* and *Lactococcus piscium* CNCM I-4031 during storage at 8 C. *International Journal of Food Microbiology*, 152(3), 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.015>
- Fischer, S. W., & Titgemeyer, F. (2023). Protective cultures in food products: from science to market. *Foods*, 12(7), 1541. <https://doi.org/10.3390/foods12071541>
- Göçmez, E. B., & İlhak, O. İ. (2025). Effect of marination with bioprotective culture-containing marinade on *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes* in chicken breast meat. *Journal of Food Science*, 90(4), e70174. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70174>
- Hintoğlu, I., Sevim, S. (2025). Antimikrobiyal güç: Bakteriyosinlerin gıda endüstrisindeki rolü ve potansiyeli. *Journal of Advanced Studies in Health Science and Obesity*, 1(2), 67–80. <https://doi.org/10.51271/jashso.23>

- Hossain, M. I., Mizan, M. F. R., Ashrafudoulla, M., Nahar, S., Joo, H. J., Jahid, I. K., Park, S. H., Kim, K. S., & Ha, S. D. (2020). Inhibitory effects of probiotic potential lactic acid bacteria isolated from kimchi against *Listeria monocytogenes* biofilm on lettuce, stainless-steel surfaces, and MBEC™ biofilm device. *LWT*, 118, 108864. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108864>
- İncili, G. K., Karatepe, P., & İlhak, O. İ. (2020). Effect of chitosan and *Pediococcus acidilactici* on *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium and *Listeria monocytogenes* in meatballs. *LWT - Food Science and Technology*, 117, 108706. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108706>
- Kamarinou, C. S., Papadopoulou, O. S., Doulgeraki, A. I., Tassou, C. C., Galanis, A., Chorianopoulos, N. G., & Argyri, A. A. (2023). Application of multi-functional lactic acid bacteria strains in a pilot scale feta cheese production. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1254598. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1254598>
- Karmakar, A., Ghosh, S., Islam, R., & Rajak, P. (2022). Natural antimicrobial as an alternative food preservatives in the dietary systems of human and livestock. Review. *Letters in Applied NanoBioScience* 12(4), 119 <https://doi.org/10.33263/LIANBS124.119>
- Khouadja, S., Haddaji, N., Hanchi, M., & Bakhrouf, A. (2017). Selection of lactic acid bacteria as candidate probiotics for *Vibrio parahaemolyticus* depuration in pacific oysters (*Crassostrea gigas*). *Aquaculture Research*, 48(4), 1885-1894. <https://doi.org/10.1111/are.13026>
- Leyva Salas, M., Thierry, A., Lemaitre, M., Garric, G., Harel-Oger, M., Chatel, M., ... & Coton, E. (2018). Antifungal activity of lactic acid bacteria combinations in dairy mimicking models and their potential as bioprotective

- cultures in pilot scale applications. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1787.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01787>
- Liang, M., Wang, H., Zhou, Z., Huang, Y., & Suo, H. (2025). Antibacterial mechanism of *Lactiplantibacillus plantarum* SHY96 cell-free supernatant against *Listeria monocytogenes* revealed by metabolomics and potential application on chicken breast meat preservation. *Food Chemistry: X*, 25, 102078.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102078>
- Marcelli, V., Osimani, A., & Aquilanti, L. (2024). Research progress in the use of lactic acid bacteria as natural biopreservatives against *Pseudomonas* spp. in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 196, 115129.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115129>
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M. G., Sapkota, T., Tubiello, F. N., Xu, Y. (2019). Food Security. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.
<https://hdl.handle.net/102.100.100/494856>
- Olaimat, A. N., Al-Aittan, F., Al-Holy, M., Al-Nabulsi, A., Haddad, R., Al-Qadiri, H., ... & Abughoush, M. (2025).

- Inhibition of *Listeria monocytogenes* in white-brined cheese by *Lactobacillus reuteri*: Effect of *L. reuteri* delivery method, brine concentration, and storage temperature. *Foods*, 14(22), 3964.
<https://doi.org/10.3390/foods14223964>
- Ortiz-Rivera, Y., Sánchez-Vega, R., Gutiérrez-Méndez, N., León-Félix, J., Acosta-Muñiz, C., & Sepulveda, D. R. (2017). Production of reuterin in a fermented milk product by *Lactobacillus reuteri*: Inhibition of pathogens, spoilage microorganisms, and lactic acid bacteria. *Journal of Dairy Science*, 100(6), 4258-4268.
<https://doi.org/10.3168/jds.2016-11534>
- Özoğul, Y., Kuley, E., Kosker, A. R., Uçar, Y., Yazgan, H., Durmuş, M., ... & Ozogul, F. (2024). The impacts of biopreservation with *Latilactobacillus sakei* cell-free supernatant in combination with plant-based extracts on the quality of modified atmosphere packed sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets. *LWT*, 209, 116756.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116756>
- Ozturk, B., & Sengun, I. Y. (2025). Effects of cell-free supernatants produced by lactic acid bacteria on the safety and quality of poultry meat. *British Poultry Science*, 1–13.
<https://doi.org/10.1080/00071668.2025.2500344>
- Özogul, F., & Hamed, I. (2018). The importance of lactic acid bacteria for the prevention of bacterial growth and their biogenic amines formation: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(10), 1660-1670.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1277972>
- Pujato, S. A., Mercanti, D. J., Briggiler Marcó, M., Capra, M. L., Quiberoni, A., & Guglielmotti, D. M. (2024). Bacteriocins from lactic acid bacteria: strategies for the bioprotection of dairy foods. *Frontiers in Food Science and*

- Technology*, 4, 1439891.
<https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1439891>
- Rai, M., Pandit, R., Gaikwad, S., & Kövics, G. (2016). Antimicrobial peptides as natural bio-preservative to enhance the shelf-life of food. *Journal of Food Science and Technology*, 53(9), 3381-3394.
- Ramos-Pereira, J., Mareze, J., Fernández, D., Rios, E. A., Santos, J. A., & López-Díaz, T. M. (2021). Antifungal activity of lactic acid bacteria isolated from milk against *Penicillium commune*, *P. nordicum* and *P. verrucosum*. *International Journal of Food Microbiology*, 355, 109331.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109331>
- Reis, J. A., Paula, A. T., Casarotti, S. N., & Penna, A. L. (2012). Lactic acid bacteria antimicrobial compounds: characteristics and applications. *Food Engineering Reviews*, 4(2), 124-140.
- Sánchez-Martín, J., Serrano-Heredia, S. M., Possas, A., Valero, A., & Carrasco, E. (2025). Evaluation of the antimicrobial effect of bioprotective lactic acid bacteria cultures against *Listeria monocytogenes* in vacuum-packaged cold-smoked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) at different temperatures. *Foods*, 14(11), 1951.
<https://doi.org/10.3390/foods14111951>
- Serter, B., Önen, A., & Osman, I. I. (2024). Antimicrobial efficacy of postbiotics of lactic acid bacteria and their effects on food safety and shelf life of chicken meat. *Annals of Animal Science*, 24(1), 277-287.
<https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0081>
- Silva, C. C., Silva, S. P., & Ribeiro, S. C. (2018). Application of bacteriocins and protective cultures in dairy food

- preservation. *Frontiers in Microbiology*, 9, 594.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00594>
- Souza, L. V., Martins, E., Moreira, I. M. F. B., & De Carvalho, A. F. (2022). Strategies for the development of bioprotective cultures in food preservation. *International Journal of Microbiology*, 2022(1), 6264170.
<https://doi.org/10.1155/2022/6264170>
- Stupar, J., Hoel, S., Strømseth, S., Lerfall, J., Rustad, T., & Jakobsen, A. N. (2023). Selection of lactic acid bacteria for biopreservation of salmon products applying processing-dependent growth kinetic parameters and antimicrobial mechanisms. *Heliyon*, 9(9), e19887.
- Sugrue, I., O'Connor, P. M., Hill, C., Stanton, C., & Ross, R. P. (2020). Actinomyces produces defensin-like bacteriocins (actifensins) with a highly degenerate structure and broad antimicrobial activity. *Journal of Bacteriology*, 202(4), 10-1128. <https://doi.org/10.1128/jb.00529-19>
- Trevisiol, F., Renoldi, N., Rossi, A., Di Filippo, G., Marino, M., & Innocente, N. (2025). *Lacticaseibacillus casei* as anti-blowing agents: Impact on the evolution of ripening and sensory profile of montasio cheese. *Food and Bioprocess Technology*, 18(2), 1764-1776.
- Vimont, A., Fernandez, B., Ahmed, G., Fortin, H. P., & Fliss, I. (2019). Quantitative antifungal activity of reuterin against food isolates of yeasts and moulds and its potential application in yogurt. *International Journal of Food Microbiology*, 289, 182-188.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.005>
- Yin, H. B., Chen, C. H., Gu, G., Nou, X., & Patel, J. (2023). Pre-harvest biocontrol of *Listeria* and *Escherichia coli* O157 on lettuce and spinach by lactic acid

bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 387, 110051.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.110051>

Yin, H. B., Chen, C. H., Colorado-Suarez, S., & Patel, J. (2022). Biocontrol of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* on fresh strawberries with lactic acid bacteria during refrigerated storage. *Foodborne Pathogens and Disease*, 19(5), 324-331.
<https://doi.org/10.1089/fpd.2021.0091>

Yoon, S. H., & Kim, G. B. (2022). Inhibition of *Listeria monocytogenes* in fresh cheese using a bacteriocin-producing *Lactococcus lactis* CAU2013 strain. *Food Science of Animal Resources*, 42(6), 1009. 10.5851/kosfa.2022.e48

Zimina, M., Babich, O., Prosekov, A., Sukhikh, S., Ivanova, S., Shevchenko, M., & Noskova, S. (2020). Overview of global trends in classification, methods of preparation and application of bacteriocins. *Antibiotics*, 9(9), 553.
<https://doi.org/10.3390/antibiotics9090553>

VETERİNER HEKİMLİKTE BİLİMSEL YAKLAŞIMLAR 1

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com