

Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde Akademik Çalışmalar ve Yeni Vizyonlar

Editör: Prof. Dr. Ayşe Gül HARLIOĞLU



**TARIM, ORMAN VE
SU BİLİMLERİNDE
AKADEMİK ÇALIŞMALAR VE
YENİ VİZYONLAR**

Editör

Prof. Dr. Ayşe Gül HARLIOĞLU*

* <https://orcid.org/0000-0001-9478-6419> E-mail: aharlioglu@frat.edu.tr



Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde Akademik Çalışmalar ve Yeni Vizyonlar
Editör: Prof. Dr. Ayşe Gül HARLIOĞLU

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN
Basım Tarihi: Mart 2026
Yayıncı Sertifika No: 49837
E-ISBN: 978-625-8756-20-3

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

"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. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz.

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
Kanatlı Hayvan Beslemede Karbon Ayak İzi Yönetimi:	
Entegre Yaklaşımlar ve Gelecek Trendler	
Kalbiye KONANÇ	
2. Bölüm	17
Geçiş Dönemi Beslemede Enerji ve Mineral Kaynaklarının	
Metabolik Hastalıklarla İlişkisi	
Yaşar Deray SAYGI	
3. Bölüm	33
Ormancılıkta İklim Dostu Bir Araç Olarak Biyokömür Kullanımı	
Melis ÇERÇİOĞLU	
4. Bölüm	52
Türkiye’de Göçer Küçükbaş Hayvan Yetiştiriciliğinin Mevcut Durumu,	
Sorunları ve Çözüm Önerileri	
Hilal TOZLU ÇELİK	
5. Bölüm	67
Canlılarda Fenotipik Ortalama ve Genotipik Değer İlişkisi	
Saim BOZTEPE , Uğur ZÜLKADİR	
6. Bölüm	76
Ağır Metallerin Sucul Ekosisteme Girişi ve Etkileri	
Zühal KARAMAN Banu KUTLU	

1. Bölüm

Kanatlı Hayvan Beslemede Karbon Ayak İzi Yönetimi: Entegre Yaklaşımlar ve Gelecek Trendler

Kalbiye KONANÇ¹

ÖZET

Kanatlı hayvan üretimi, yüksek biyolojik verimlilik ve kısa üretim döngüsü sayesinde küresel hayvansal protein arzında önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte artan üretim hacmi, yem üretimi, enerji kullanımı ve gübre yönetimi gibi süreçlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını da beraberinde getirmektedir. Kanatlı hayvan üretiminde karbon ayak izinin önemli bir kısmı yem hammaddelerinin üretiminden kaynaklandığı için besleme stratejileri çevresel sürdürülebilirliğin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde kanatlı hayvan beslemede karbon ayak izi yönetimine yönelik entegre yaklaşımlar ele alınmaktadır. Yem kaynaklarının karbon yoğunluğunun azaltılması, alternatif ve yerel protein kaynaklarının kullanımı, hassas besleme uygulamaları, enzim destekli rasyonlar ve fitobiyotik ile fermente yem katkılarının potansiyel katkıları değerlendirilmiştir. Ayrıca yumurta ve et üretiminde karbon yoğunluğu kavramı ile yaşam döngüsü analizi yaklaşımı tartışılarak besleme stratejilerinin çevresel etkilerinin nasıl değerlendirilebileceği açıklanmıştır. Bölümde performans, besin maddesi kullanım etkinliği ve çevresel göstergelerin birlikte değerlendirilmesinin sürdürülebilir kanatlı hayvan üretim sistemlerinin geliştirilmesinde temel bir gereklilik olduğu vurgulanmaktadır. Bu çerçevede kanatlı hayvan besleme biliminin, üretim verimliliği ile çevresel etki azaltımını bir arada ele alan disiplinler arası yaklaşımlarla gelecekte daha önemli bir rol üstleneceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Karbon ayak izi, Kanatlı hayvan besleme, Sürdürülebilir üretim, Hassas besleme, Fitobiyotikler, Fermente yem katkıları

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Ordu Üniversitesi, Ulubey Meslek Yüksekokulu, Veterinerlik Bölümü, kalbiye-serdaroglu@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7984-6129>

ABSTRACT

Poultry production plays a strategic role in the global supply of animal protein due to its high biological efficiency and relatively short production cycle. However, increasing production volumes also contribute to greenhouse gas emissions originating from feed production, energy use, and manure management. Since a substantial proportion of the carbon footprint in poultry systems is associated with feed production, nutritional strategies represent one of the most effective tools for improving environmental sustainability. This chapter discusses integrated approaches for carbon footprint management in poultry nutrition. Strategies such as reducing the carbon intensity of feed ingredients, utilizing alternative and locally available protein sources, implementing precision feeding practices, and applying enzyme, phytobiotic, and fermented feed additives are evaluated in terms of their potential environmental benefits. In addition, the concept of carbon intensity in egg and meat production and the application of life cycle assessment (LCA) are examined to better understand how nutritional interventions influence environmental outcomes. The chapter highlights the importance of integrating performance indicators, nutrient utilization efficiency, and environmental metrics when designing sustainable poultry feeding systems. It is anticipated that interdisciplinary approaches combining nutrition, environmental assessment, and emerging analytical tools will play a key role in advancing sustainable poultry production in the future.

Keywords: Carbon footprint, Poultry nutrition, Sustainable poultry production, Precision feeding, Phytobiotics, Fermented feed additives

GİRİŞ

Küresel hayvansal üretim sektörü, sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumludur (FAO, 2023). Ruminant sistemler enterik metan üretimi nedeniyle daha yüksek emisyon yoğunluğuna sahip olmakla birlikte, kanatlı hayvan üretimi de özellikle yem üretimi, enerji kullanımı ve gübre yönetimi kaynaklı karbon salınımı açısından dikkate değer bir paya sahiptir (Attia ve ark., 2024). Kanatlı hayvan sektörünün görece daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olması, bu sistemi sürdürülebilir protein üretiminde stratejik bir konuma yerleştirmektedir. Bununla birlikte artan küresel protein talebi üretim hacmini artırmakta ve toplam emisyon miktarının yükselmesine neden olmaktadır (Kang ve ark., 2025). Bu nedenle güncel yaklaşım, yalnızca üretim artışını değil, birim ürün başına düşen karbon ayak izinin azaltılmasını hedeflemektedir.

Kanatlı hayvan üretiminde karbon ayak izinin büyük bir kısmı yem üretimi ve yem hammaddelerinin tarımsal süreçlerinden kaynaklanmaktadır (Attia ve ark., 2024; Kang ve ark., 2025). Özellikle bitkisel protein kaynakları, arazi kullanım değişikliği, gübre kullanımı ve lojistik süreçler nedeniyle önemli karbon yükü oluşturmaktadır. Kümes içi iklimlendirme, aydınlatma sistemleri ve gübre yönetimi de toplam emisyonu etkileyen diğer faktörlerdir (Attia ve ark., 2024). Bu bağlamda besleme stratejileri, karbon ayak izini azaltmada en etkili müdahale alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Karbon ayak izi genellikle kg CO₂-eşdeğeri/kg ürün olarak ifade edilmekte ve yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA) çerçevesinde değerlendirilmektedir (Zisis ve ark., 2023). LCA yaklaşımı, üretim sisteminin yem üretimi, enerji kullanımı, nakliye ve atık yönetimi gibi tüm aşamalarını kapsayarak çevresel etkinin bütüncül biçimde analiz edilmesini sağlar. Bu perspektif, hangi üretim basamağında iyileştirme yapılmasının en yüksek çevresel kazanımı sağlayacağını ortaya koymaktadır.

Karbon ayak izini azaltmaya yönelik stratejiler genel olarak üç ana eksenle değerlendirilebilir: (1) yem kaynaklarının karbon yoğunluğunu azaltmak, (2) yemden yararlanma etkinliğini artırmak ve (3) azot-fosfor atılımını azaltarak dolaylı emisyonları sınırlamak. Besleme stratejileri bu üç yaklaşımın merkezinde yer almaktadır. Yem kompozisyonunun optimize edilmesi, alternatif protein kaynaklarının kullanımı ve hassas besleme uygulamaları hem ekonomik verimliliği hem de çevresel performansı iyileştirebilir (Bist ve ark., 2024).

Ham protein düzeyinin gereksinime uygun şekilde optimize edilmesi ve amino asit dengesinin sağlanması azot atılımını azaltarak nitroz oksit emisyonlarının sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir (Attia ve ark., 2024). Benzer şekilde sindirilebilirliği artıran enzim destekli formülasyonlar yem dönüşüm oranını iyileştirerek yem üretiminden kaynaklanan dolaylı karbon yükünü

azaltabilir. Bu stratejiler, performans ile çevresel sürdürülebilirlik arasında doğrudan bir bağlantı kurmaktadır.

Son yıllarda fitobiyotikler ve fermente yem katkıları yalnızca performans artırıcı uygulamalar olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim stratejilerinin bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Bist ve ark., 2024; Obianwuna ve ark., 2024; Atuahene ve ark., 2025). Bu katkıların bağırsak mikrobiyotasını modüle etmesi, sindirim etkinliğini artırması ve yemden yararlanmayı iyileştirmesi, birim ürün başına düşen yem tüketimini azaltabilir. Bu durum dolaylı olarak karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Ancak bu ilişkinin nicel düzeyde ortaya konabilmesi için performans verilerinin yaşam döngüsü analizleri ile entegre edilmesi gerekmektedir (Zisis ve ark., 2023; Katu ve ark., 2025).

Sürdürülebilir kanatlı hayvan üretimi yalnızca çevresel boyutla sınırlı değildir; ekonomik uygulanabilirlik ve üretici kabulü de önemli kriterlerdir (Katu ve ark., 2025). Karbon azaltım stratejilerinin sektörde yaygınlaşabilmesi için maliyet-etkin olması ve üretim verimliliğini olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Bu nedenle karbon ayak izi yönetimi, performans, refah, ekonomi ve çevresel göstergeleri birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım gerektirir.

Bu bölümde kanatlı hayvan üretiminde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik besleme temelli stratejiler, alternatif protein kaynakları, hassas besleme uygulamaları, fonksiyonel yem katkıları ve yaşam döngüsü analizi perspektifi kapsamında ele alınacaktır. Amaç, performans odaklı besleme yaklaşımları ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi bilimsel ve analitik temelde ortaya koymaktır.

YEM KAYNAKLARININ OPTİMİZASYONU VE ALTERNATİF PROTEİNLER

Karbon ayak izinin azaltılmasında temel stratejilerden biri, yüksek emisyon yoğunluğuna sahip yem hammaddelerinin daha düşük karbon yoğunluğuna sahip alternatiflerle ikame edilmesidir (Mottet ve ark., 2017). Kanatlı hayvan üretiminde çevresel etkinin en büyük belirleyicisi yemdir; yaşam döngüsü analizleri, toplam sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünün yem hammaddelerinin üretimi, işlenmesi ve taşınmasından kaynaklandığını göstermektedir (De Vries ve de Boer, 2010; Poore ve Nemecek, 2018). Bu nedenle yem kaynaklarının optimizasyonu sürdürülebilir kanatlı hayvan üretiminin temel bileşenlerinden biridir.

Geleneksel rasyonlarda en yaygın protein kaynağı soya küspesidir (Ravindran, 2013). Soya, yüksek sindirilebilir protein içeriği ve dengeli amino asit profili nedeniyle besleme açısından avantajlıdır (Lázaro ve ark., 2003).

Ancak küresel ölçekte değerlendirildiğinde soya üretimi arazi kullanım değişikliği, ormansızlaşma ve yüksek tarımsal girdi kullanımı ile ilişkilendirilmektedir (Pendriil ve ark., 2019; Tim ve ark., 2023). Özellikle tropikal bölgelerde geniş tarım alanlarının açılması karbon salımını artırmakta ve biyolojik çeşitlilik üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle protein kaynağı seçimi yalnızca besinsel kalite değil, çevresel etki kriterleri de dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Yem kaynaklarının optimizasyonu iki ana yaklaşımı içermektedir: mevcut hammaddelerin daha verimli kullanımı ve alternatif protein kaynaklarının rasyona entegrasyonu (Leinonen ve Kyriazakis, 2016). Sindirilebilir amino asit bazlı formülasyonlar, enzim destekli rasyonlar ve hassas besleme uygulamaları sayesinde protein fazlalığı azaltılabilir, azot atılımı düşürülebilir ve yem dönüşüm oranı iyileştirilebilir (Cowieson ve Bedford, 2009). Bu stratejiler birim ürün başına yem ihtiyacını azaltarak dolaylı karbon yükünü sınırlar (Leinonen ve ark., 2012).

Alternatif protein kaynakları çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır (Mézes, 2018). Yerel olarak üretilen bitkisel proteinler ithal soya bağımlılığını azaltabilir ve taşıma kaynaklı emisyonları düşürebilir (Van Krimpen ve ark., 2013). Baklagiller, yağlı tohum küspeleri ve tarımsal yan ürünler bu kapsamda değerlendirilmektedir (Laudadio, 2018). Bununla birlikte antinutrisyonel faktörler, amino asit dengesi ve sindirilebilirlik gibi sınırlılıklar dikkatle ele alınmalıdır; fermantasyon ve enzim uygulamaları bu kısıtların azaltılmasına katkı sağlayabilir (Adeola ve Cowieson, 2011).

Son yıllarda böcek unu, tek hücre proteini ve alg kaynaklı proteinler gibi yeni nesil alternatifler de araştırılmaktadır. Bu kaynaklar düşük arazi kullanım gereksinimi ve yüksek biyoyararlanım potansiyeli ile dikkat çekmektedir (Veldkamp ve ark., 2012). Özellikle organik yan ürünlerin değerlendirilmesi döngüsel ekonomi açısından önem taşımaktadır (Smetana ve ark., 2019; Gasco ve ark., 2023). Ancak bu alternatiflerin ekonomik fizibilitesi ve üretim ölçeği henüz tam olarak olgunlaşmamıştır (Gasco ve ark., 2020).

Protein kaynağı optimizasyonunda yalnızca ham protein düzeyi değil, protein kalitesi ve sindirilebilir amino asit dengesi de önemlidir. Gereksinim temelli formülasyonlar gereksiz azot atılımını azaltarak amonyak ve nitroz oksit emisyonlarını sınırlayabilir (Nahm, 2002). Benzer şekilde fosforun biyoyararlanımını artıran enzim uygulamaları doğal kaynak kullanımını optimize eder ve çevresel yükü azaltır (Selle ve Ravindran, 2007).

Alternatif proteinlerin çevresel değerlendirmesi yalnızca arazi kullanımı üzerinden değil; enerji tüketimi, su kullanımı ve işleme süreçleri de dahil edilerek yaşam döngüsü analizi çerçevesinde yapılmalıdır (Ran ve ark., 2016). Bu

bütüncül yaklaşım, gerçek sürdürülebilirlik potansiyelinin ortaya konulmasını sağlar.

Sonuç olarak yem kaynaklarının optimizasyonu ve alternatif proteinlerin rasyona entegrasyonu, kanatlı hayvan üretiminde karbon ayak izinin azaltılmasında temel stratejiler arasında yer almaktadır (Leinonen ve Kyriazakis, 2016). Gelecekte yapılacak çalışmaların, alternatif proteinlerin performans, sindirilebilirlik ve çevresel çıktılar açısından entegre biçimde değerlendirildiği disiplinler arası tasarımlara odaklanması önem taşımaktadır.

HASSAS BESLEME (PRECISION NUTRITION) VE AZOT-FOSFOR YÖNETİMİ

Aşırı proteinli diyetler gereksiz azot atılımına ve çevresel yük artışına neden olmaktadır (Chalova ve ark., 2016). Rasyonların ideal amino asit dengesine göre formüle edilmesi ve ham protein düzeyinin düşürülmesi, hem yem maliyetini hem de çevresel etkiyi azaltabilmektedir. Sentetik amino asit kullanımı, azot kullanım etkinliğini artırarak gübre kaynaklı emisyonların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (D'Mello, 2003). İdeal protein konsepti çerçevesinde düşük proteinli ancak dengeli rasyonlar, performans kaybı olmaksızın azot atılımını azaltabilmektedir (Hernández ve ark., 2012).

Kanatlı hayvanlarda rasyondaki fazla amino asitler deaminasyona uğrayarak ürik asit formunda atılmakta ve dışkı ile çevreye geçmektedir (Klasing, 1998; Sturkie, 2012). Altlıkta mikrobiyal parçalanma sonucu oluşan amonyak, hem kümes içi hava kalitesini olumsuz etkilemekte hem de atmosferik kirliliğe katkı sağlamaktadır (Liu ve ark., 2007). Ayrıca azotun toprak ve su sistemlerine taşınması nitrat birikimi ve ekosistem bozulması riskini artırmaktadır. Bu nedenle protein fazlalığının azaltılması hem ekonomik hem de çevresel açıdan önem taşımaktadır.

Hassas besleme (precision nutrition), hayvanın genetik potansiyeli, yaşı ve fizyolojik durumuna göre besin maddelerinin gereksinime en yakın düzeyde sağlanmasını amaçlayan bir yaklaşımdır (Abd El-Hack ve ark., 2025). Bu strateji, yalnızca performansın optimize edilmesini değil, aynı zamanda fazla besin maddesi kullanımından kaynaklanan çevresel kayıpların azaltılmasını hedeflemektedir. Geleneksel rasyonlarda kullanılan güvenlik payları, özellikle protein ve fosfor açısından gereksinimin üzerinde beslemeye yol açabilmektedir (Dijkstra ve ark., 2007). Hassas besleme bu fazlalıkları minimize ederek sürdürülebilir üretime katkı sağlar.

Fosfor yönetimi hassas beslemenin diğer önemli bileşenidir. Bitkisel hammaddelerde fosforun büyük kısmı fitat formunda bulunmakta ve kanatlı hayvanlar endojen fitaz üretmediği için bu fosforu etkin şekilde

değerlendirememektedir. Sindirilmeyen fosforun çevreye atılması ötrofikasyon riskini artırmaktadır (Carpenter ve ark., 1998). Rasyona eklenen mikrobiyal fitaz, fitat bağlı fosforu serbestleştirerek fosfor sindirilebilirliğini artırmakta ve inorganik fosfor ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca fitazın amino asit sindirilebilirliği ve enerji kullanımını iyileştirdiği bildirilmiştir (Walk ve ark., 2013). Bu etkiler yem verimliliğini artırarak dolaylı olarak çevresel yükü azaltmaktadır.

Enzim destekli besleme stratejileri ve hassas formülasyon uygulamaları karbon ayak izi açısından önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir. Yem üretimi, kanatlı hayvan üretiminde toplam emisyonların en büyük bölümünü oluşturmaktadır (Ritchie ve ark., 2022). Bu nedenle yem bileşimindeki her iyileştirme, arazi kullanımı, enerji tüketimi ve emisyon düzeyinde azalma anlamına gelmektedir. Fazla protein kullanımının azaltılması ve besin maddelerinin gereksinime uygun sağlanması, birim ürün başına emisyonu düşürebilir (Ferket ve ark., 2002).

Hassas besleme yalnızca makro besin maddeleri ile sınırlı değildir; bağırsak mikrobiyotası da besin kullanım verimliliğinde önemli rol oynamaktadır (Naeem ve Bourassa, 2025). Mikrobiyal denge sindirim enzim aktivitesini ve kısa zincirli yağ asidi üretimini etkileyerek besin emilimini artırabilir (Kogut, 2022). Probiyotikler, prebiyotikler ve fitobiyotikler sindirim etkinliğini destekleyerek yem dönüşüm oranını iyileştirebilir (Alagawany ve ark., 2018). Yemden yararlanmadaki küçük iyileşmeler dahi toplam üretim zinciri boyunca önemli çevresel kazanımlar sağlayabilmektedir.

Gelecekte hassas besleme uygulamalarının gerçek zamanlı izleme sistemleri, sindirilebilirlik modelleri ve veri temelli rasyon optimizasyonu ile daha entegre hale gelmesi beklenmektedir (Sonea ve ark., 2023). Araştırmaların yalnızca performans kriterlerine değil, azot ve fosfor atılımı, amonyak emisyonu ve karbon ayak izi gibi çevresel göstergelere de odaklanması gerekmektedir. Bu yönüyle hassas besleme, sürdürülebilir kanatlı hayvan üretiminde ekonomik verimlilik ile ekolojik sorumluluğu birleştiren stratejik bir yaklaşımdır.

FİTOBİYOTİKLER VE FERMENTE KATKILARIN DOLAYLI ÇEVRESEL ETKİLERİ

Fitobiyotikler ve fermente yem katkıları genellikle performans ve bağırsak sağlığı açısından değerlendirilmekle birlikte, sindirim verimliliği ve besin maddesi kullanım etkinliği üzerinden dolaylı çevresel etkiler de oluşturabilir (Pirgozliev ve ark., 2019). Bağırsak mikrobiyotasının dengelenmesi ve sindirilebilirliğin artması, yem dönüşüm oranının iyileşmesine katkı sağlar (Yadav ve Jha, 2019). Yemden yararlanmadaki artış, birim canlı ağırlık artışı

başına daha az yem tüketimi anlamına gelir ve bu durum yem üretimine bağlı karbon emisyonunu azaltır.

Fitobiyotikler; fenolik bileşikler, flavonoidler, terpenler ve diğer sekonder metabolitleri içeren bitki kökenli ürünlerdir (Yang ve ark., 2015). Antioksidan, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar özellikleri sayesinde bağırsak mikrobiyotasını düzenleyebilir ve epitel bütünlüğünü destekleyebilirler (Seidavi ve ark., 2021). Patojen baskılanması ve yararlı bakterilerin desteklenmesi, besin maddelerinin daha etkin emilimine katkı sağlar. Sindirim etkinliğinin artması, dışkı ile atılan azot ve mineral miktarının azalması anlamına gelir ve bu durum özellikle azot ve fosfor kaynaklı çevresel yükün düşürülmesi açısından önemlidir.

Bazı bitkisel bileşiklerin amonyak oluşumunu azaltıcı etkileri bildirilmiştir (Karásková ve ark., 2015). Amonyak volatilizasyonunun azalması hem çevresel emisyonları hem de hayvan refahı üzerindeki olumsuz etkileri sınırlar. Ayrıca oksidatif stresin azaltılması metabolik verimliliği artırabilir ve yem dönüşüm oranında iyileşmeye katkı sağlayabilir (Surai ve ark., 2019). Yemden yararlanmadaki küçük iyileşmeler bile toplam yem ihtiyacını azaltarak tarımsal üretim baskısını ve buna bağlı karbon ayak izini düşürebilir.

Fermente yem katkıları ise mikroorganizmalar aracılığıyla besin maddelerinin biyoyararlanımını artırmayı hedefleyen ürünlerdir (Lian ve ark., 2024). Fermantasyon sürecinde kompleks karbonhidratlar parçalanabilir, antinutrisyonel faktörler azaltılabilir ve biyolojik olarak aktif bileşikler açığa çıkabilir (Predescu ve ark., 2024). Özellikle fitat, tanen ve non-starch polisakaritlerin kısmen parçalanması sindirilebilirliği artırarak dışkı ile atılan sindirilmemiş fraksiyonu azaltabilir (Jeyakumar ve Lawrence, 2022). Bu durum azot ve fosfor atılımını düşürerek dolaylı çevresel kazanım sağlar.

Fermente katkıları ayrıca bağırsakta kısa zincirli yağ asidi üretimini destekleyerek epitel sağlığını ve besin emilimini iyileştirebilir (Caetano ve Castelucci, 2022). Patojen yükünün azalması ve inflamasyonun sınırlanması enerji kaybını azaltır (Ducatelle ve ark., 2023). Enerjinin bağışıklık yanıtı yerine büyüme ve üretim süreçlerine yönlendirilmesi biyolojik verimliliği artırır; bu da birim ürün başına yem tüketimini düşürerek dolaylı çevresel fayda oluşturur.

Fitobiyotik ve fermente katkıların çevresel etkileri aynı zamanda gıda zinciri boyutunda da değerlendirilebilir. Antioksidan özellikler ürün oksidatif stabilitesini artırarak raf ömrünü uzatabilir ve gıda kayıplarını azaltabilir (Aminzare ve ark., 2019). Gıda israfının azalması, sürdürülebilirlik zincirinde önemli bir karbon tasarrufu sağlar. Ayrıca yerel bitkisel kaynakların veya fermente tarımsal yan ürünlerin kullanımı, ithal katkılara bağımlılığı azaltarak taşıma kaynaklı emisyonları düşürebilir ve döngüsel ekonomi yaklaşımını destekleyebilir (Braamhaar ve ark., 2026).

Bununla birlikte bu katkı maddelerinin çevresel etkilerinin net biçimde ortaya konulabilmesi için performans verilerinin azot ve fosfor atılımı, amonyak emisyonu ve karbon ayak izi gibi göstergelerle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Leinonen ve Kyriazakis, 2016). Gelecekte yapılacak çalışmaların yalnızca büyüme performansına değil, çevresel çıktılara da odaklanması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak fitobiyotikler ve fermente yem katkıları, besin kullanım verimliliğini artırarak ve atılım profilini iyileştirerek dolaylı çevresel kazanımlar sağlayabilen stratejik besleme araçlarıdır. Entegre besleme sistemleri içerisinde değerlendirildiklerinde, hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirliğe katkı sunma potansiyeline sahiptirler.

YUMURTA VE ET ÜRETİMİNDE KARBON YOĞUNLUĞU YAKLAŞIMI

Karbon yoğunluğu, genellikle kg CO₂-eşdeğeri/kg ürün olarak ifade edilen ve birim ürün başına düşen sera gazı emisyonunu esas alan bir değerlendirme yaklaşımıdır (Poore ve Nemecek, 2018). Hayvansal üretimde bu gösterge; kilogram canlı ağırlık artışı, kilogram karkas veya bir düzine yumurta başına düşen CO₂-eq emisyonu şeklinde hesaplanmaktadır. Bu yöntem, üretim verimliliği ile çevresel etkiyi aynı çerçevede değerlendirme imkânı sunar.

Kanatlı hayvan üretiminde karbon yoğunluğunu belirleyen en önemli faktör yemdir. Yaşam döngüsü analizleri, toplam sera gazı emisyonlarının büyük bölümünün yem üretimi, işlenmesi ve taşınması aşamalarında ortaya çıktığını göstermektedir (Leinonen ve ark., 2012). Bu nedenle yem dönüşüm oranındaki küçük iyileşmeler dahi birim ürün başına düşen emisyonu anlamlı ölçüde azaltabilmektedir. Daha verimli yem kullanımı, aynı miktarda ürünün daha az kaynakla üretilmesini sağlayarak tarımsal üretim baskısını ve buna bağlı emisyonları düşürür.

Yumurta üretiminde karbon yoğunluğu; yem tüketimi, verim düzeyi, mortalite oranı ve enerji kullanımı ile yakından ilişkilidir (Leinonen ve ark., 2012). Yüksek yumurta verimi, düşük kayıp oranı ve iyi sürü sağlığına sahip sistemlerde karbon yoğunluğu daha düşüktür (Dekker ve ark., 2011). Verim süresinin uzatılması ve sürü kayıplarının azaltılması, sabit üretim girdilerinin daha fazla ürün hacmine yayılmasını sağlayarak birim yumurta başına düşen karbon yükünü azaltır.

Etlik piliç üretiminde ise büyüme hızı, kesim yaşı, yem dönüşüm oranı ve karkas randımanı karbon yoğunluğunu belirleyen temel parametrelerdir (Kalhor ve ark., 2016; Leinonen ve Kyriazakis, 2016). Daha kısa sürede hedef ağırlığa ulaşan ve düşük mortalite oranına sahip sürülerde bakım enerjisi azalmakta, bu durum birim karkas başına düşen emisyonu düşürmektedir. Ancak değerlendirme yalnızca

büyüme hızına dayandırılmamalı; sağlık durumu ve yem verimliliği birlikte ele alınmalıdır.

Besleme stratejileri karbon yoğunluğunu doğrudan etkileyen temel araçlardandır. Düşük proteinli ve amino asit dengelenmiş rasyonlar azot atılımını azaltırken, enzim destekli formülasyonlar besin maddesi kullanım etkinliğini artırabilir. Fitobiyotikler ve fermente katkıları ise bağırsak sağlığını destekleyerek yemden yararlanma oranını iyileştirebilir (Yadav ve Jha, 2019). Bu iyileşmeler, birim ürün başına daha az yem tüketimi anlamına gelir ve dolaylı olarak karbon yoğunluğunu düşürür. Ayrıca ürün kayıplarının azaltılması ve raf ömrünün uzatılması, üretim zinciri boyunca ek karbon tasarrufu sağlayabilir.

Karbon yoğunluğu yaklaşımı, farklı üretim sistemleri ve besleme stratejilerinin karşılaştırılmasına olanak tanıyan önemli bir karar destek aracıdır. Sürdürülebilirlik sertifikasyonları ve çevresel etiketleme sistemleri açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bununla birlikte karbon yoğunluğu tek başına yeterli bir sürdürülebilirlik göstergesi değildir; su ayak izi, arazi kullanımı ve biyolojik çeşitlilik etkileri gibi parametreler de birlikte değerlendirilmelidir (Clark ve ark., 2020). Buna rağmen ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir gösterge olması nedeniyle yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Sonuç olarak yumurta ve et üretiminde karbon yoğunluğu yaklaşımı, verimlilik ile çevresel etki arasındaki ilişkiyi nicel olarak ortaya koymaktadır. Üretim ve besleme sistemlerinde yapılacak her iyileştirme, birim ürün başına düşen emisyonu azaltma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle karbon yoğunluğu perspektifi, sürdürülebilir kanatlı hayvan üretim stratejilerinin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Kanatlı hayvan üretim sistemleri, küresel hayvansal protein arzında stratejik bir role sahiptir. Artan nüfus, değişen tüketim eğilimleri ve sürdürülebilir üretim talepleri, sektörü yalnızca verimlilik değil aynı zamanda çevresel performans açısından da yeniden yapılandırmaktadır. Bu bağlamda kanatlı hayvan besleme bilimi, klasik performans optimizasyonunun ötesine geçerek karbon ayak izi azaltımı, besin maddesi kayıplarının kontrolü ve kaynak kullanım etkinliğinin artırılmasına odaklanmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan yem kaynaklarının optimizasyonu, hassas besleme stratejileri ile fitobiyotik ve fermente katkı uygulamaları; sürdürülebilir üretim sistemlerinin tamamlayıcı bileşenlerini oluşturmaktadır. Her bir yaklaşım bireysel olarak iyileştirme potansiyeline sahip olmakla birlikte, çevresel kazanımın en belirgin hale gelmesi bu stratejilerin entegre biçimde uygulanmasıyla mümkündür.

Yem yönetimi, üretim zincirinin çevresel etkisini belirleyen temel aşamadır. Gereksinim temelli formülasyonlar, alternatif ve yerel protein kaynaklarının kullanımı ve besin maddesi verimliliğinin artırılması; azot ve fosfor atılımını azaltarak birim ürün başına düşen emisyonları düşürmektedir. Bu yaklaşım, karbon yoğunluğunun iyileştirilmesine doğrudan katkı sağlar.

Hassas besleme uygulamaları, besin maddelerinin hayvan gereksinimlerine uygun düzeylerde sunulmasını hedefleyerek metabolik verimliliği artırır. Düşük ham proteinli ancak amino asit dengeli rasyonlar ve enzim destekli formülasyonlar, azot ve fosfor yönetiminde etkin araçlardır. Bu stratejiler, yalnızca atılımı azaltmakla kalmaz; aynı zamanda kümes içi çevresel koşulların iyileştirilmesine ve hayvan refahının desteklenmesine de katkı sağlar.

Fitobiyotikler ve fermente katkıları ise sindirim etkinliğini ve bağırsak mikrobiyotasını destekleyerek yemden yararlanmayı iyileştirebilen biyolojik temelli araçlardır. Yem dönüşüm oranındaki iyileşmeler, aynı üretim düzeyine daha az kaynak kullanarak ulaşılmasını sağlar ve böylece yem üretimine bağlı dolaylı emisyonları azaltır. Bu katkıların çevresel etkilerinin daha net ortaya konulabilmesi için performans göstergelerinin yaşam döngüsü analizleri ile birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Gelecekte kanatlı hayvan besleme araştırmalarının daha disiplinler arası bir yapıya dönüşmesi beklenmektedir. Mikrobiyota çalışmaları, metabolomik analizler ve sindirilebilirlik araştırmalarının çevresel etki değerlendirmeleri ile entegre edilmesi; biyolojik ve ekolojik verimliliğin birlikte ele alınmasını sağlayacaktır. Ayrıca yerel ve alternatif protein kaynaklarının performans ve çevresel çıktılar açısından bütüncül değerlendirilmesi, sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sunacaktır.

Dijitalleşme ve veri temelli karar destek sistemleri de hassas besleme uygulamalarının etkinliğini artıracaktır. Gerçek zamanlı izleme teknolojileri, rasyonların dinamik olarak optimize edilmesine imkân tanıyarak kaynak kullanımını daha verimli hale getirebilir. Bu tür teknolojik gelişmeler, ekonomik verimlilik ile çevresel sürdürülebilirliğin eş zamanlı iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak sürdürülebilir kanatlı hayvan üretimi, yalnızca emisyon azaltımına odaklanan tek boyutlu bir yaklaşım yerine; verimlilik, besin maddesi yönetimi ve çevresel performansın birlikte ele alındığı entegre sistemleri gerektirmektedir. Besleme bilimi bu dönüşümün merkezinde yer almakta ve doğru yem kaynaklarının seçimi, hassas besin maddesi yönetimi ve yenilikçi katkı stratejileri aracılığıyla karbon ayak izinin azaltılmasına önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekte geliştirilecek entegre metodolojiler, sürdürülebilirlik hedeflerinin hem bilimsel hem de uygulamalı düzeyde daha etkin biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. Abd El-Hack, M. E., Allam, A. A., Aldhalmi, A. K., Kamal, M., Arif, M., Alawam, A. S., ... & Ashour, E. A. (2025). Integrating metabolomics for precision nutrition in poultry: optimizing growth, feed efficiency, and health. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1594749.
2. Adeola, O., & Cowieson, A. J. (2011). Board-invited review: opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve nonruminant animal production. *Journal of animal science*, 89(10), 3189-3218.
3. Alagawany, M., Abd El-Hack, M. E., Farag, M. R., Sachan, S., Karthik, K., & Dhama, K. (2018). The use of probiotics as eco-friendly alternatives for antibiotics in poultry nutrition. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 10611-10618.
4. Aminzare, M., Hashemi, M., Ansarian, E., Bimakr, M., Hassanzad Azar, H., Mehrasbi, M. R., ... & Afshari, A. (2019). Using natural antioxidants in meat and meat products as preservatives: A review. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 7(5), 417-426.
5. Attia, Y. A., Aldhalmi, A. K., Youssef, I. M., Bovera, F., Tufarelli, V., & Abd El Hack, M. E. (2024). Climate change and its effects on poultry industry and sustainability. *SpringerLink*.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00627-2>
6. Atuahene, D., Sam, B. A., Idan, F., Sana, S. S., Knop, R., Suthar, T., ... & Shaikh, A. M. (2025). Probiotics, prebiotics, and synbiotics in pigs and poultry: A review of gut health, performance, and environmental outcomes. *Veterinary Sciences*, 12(11), 1054.
7. Bist, R. B., Bist, K., Poudel, S., Subedi, D., Yang, X., Paneru, B., ... & Chai, L. (2024). Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects. *Poultry Science*, 103(12), 104295.
8. Braamhaar, D. J., van Selm, B., van der Lee, J., & Oosting, S. J. (2026). Circular food systems in Kenya: Exploring the role of livestock. *Agricultural Systems*, 231, 104536.
9. Caetano, M. A. F., & Castelucci, P. (2022). Role of short chain fatty acids in gut health and possible therapeutic approaches in inflammatory bowel diseases. *World journal of clinical cases*, 10(28), 9985.
10. Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*, 8(3), 559-568.
11. Chalova, V. I., Kim, J. H., Patterson, P. H., Ricke, S. C., & Kim, W. K. (2016). Reduction of nitrogen excretion and emissions from poultry: a review for conventional poultry. *World's Poultry Science Journal*, 72(3), 509-520.

12. Clark, M., Macdiarmid, J., Jones, A. D., Ranganathan, J., Herrero, M., & Fanzo, J. (2020). The role of healthy diets in environmentally sustainable food systems. *Food and nutrition bulletin*, 41(2_suppl), S31-S58.
13. Cowieson, A. J., & Bedford, M. R. (2009). The effect of phytase and carbohydrase on ileal amino acid digestibility in monogastric diets: complimentary mode of action?. *World's Poultry Science Journal*, 65(4), 609-624.
14. De Vries, M., & de Boer, I. J. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock science*, 128(1-3), 1-11.
15. Dekker, S. E. M., De Boer, I. J., Vermeij, I., Aarnink, A. J., & Koerkamp, P. G. (2011). Ecological and economic evaluation of Dutch egg production systems. *Livestock Science*, 139(1-2), 109-121.
16. Dijkstra, J., Kebreab, E., Mills, J. A. N., Pellikaan, W. F., López, S., Bannink, A., & France, J. (2007). Predicting the profile of nutrients available for absorption: from nutrient requirement to animal response and environmental impact. *Animal*, 1(1), 99-111.
17. Ducatelle, R., Goossens, E., Eeckhaut, V., & Van Immerseel, F. (2023). Poultry gut health and beyond. *Animal nutrition*, 13, 240-248.
18. FAO/International Assessment. (2023). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/tackling-climate-change-through-livestock-global-assessment-emissions-mitigation_en?
19. Ferket, P. R., Van Heugten, E., Van Kempen, T. A. T. G., & Angel, R. (2002). Nutritional strategies to reduce environmental emissions from nonruminants. *Journal of Animal science*, 80(E-suppl_2), E168-E182.
20. Gasco, L., Acuti, G., Bani, P., Dalle Zotte, A., Danieli, P. P., De Angelis, A., ... & Roncarati, A. (2020). Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Italian Journal of Animal Science*, 19(1), 360-372.
21. Gasco, L., Renna, M., Bellezza Oddon, S., Rezaei Far, A., Naser El Deen, S., & Veldkamp, T. (2023). Insect meals in a circular economy and applications in monogastric diets. *Animal Frontiers*, 13(4), 81-90.
22. Hernández, F., López, M., Martínez, S., Megías, M. D., Catalá, P., & Madrid, J. (2012). Effect of low-protein diets and single sex on production performance, plasma metabolites, digestibility, and nitrogen excretion in 1-to 48-day-old broilers. *Poultry Science*, 91(3), 683-692.

23. Jeyakumar, E., & Lawrence, R. (2022). Microbial fermentation for reduction of antinutritional factors. In *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. 239-260). Elsevier.
24. Kalthor, T., Rajabipour, A., Akram, A., & Sharifi, M. (2016). Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment. *Information processing in agriculture*, 3(4), 262-271.
25. Kang, H. Y., Hwang, Y. W., Lee, J. H., Cho, S. J., Jeon, Y. S., Kim, N. S., & Kim, J. (2025). Evaluating the greenhouse gas emissions footprint of chicken meat production in South Korea: A life cycle perspective. *Food and Bioproducts Processing*, 150, 230-239.
26. Karásková, K., Suchý, P., & Straková, E. (2015). Current use of phytogenic feed additives in animal nutrition: a review. *Czech Journal of Animal Science*, 60(12), 521-530.
27. Katu, J. K., Tóth, T., Ásványi, B., Hatvan, Z., & Varga, L. (2025). Effect of fermented feed on growth performance and gut health of broilers: a review. *Animals*, 15(13), 1957.
28. Klasing, K. C. (1998). *Comparative avian nutrition* (pp. ix+350).
29. Kogut, M. H. (2022). Impact of the gut microbiota on the immune system. In *Avian Immunology* (pp. 353-364). Academic Press.
30. Laudadio, V. (2018). *Feeding Forage in Poultry: A Promising Alternative for the Future of Production Systems*. Agriculture.
31. Lázaro, R., Mateos, G. G., Latorre, M. A., & Piquer, J. (2003). Whole soybeans in diets for poultry. *American Soybean Association*. Madrid, Spain, 1-4.
32. Leinonen, I., Williams, A. G., Wiseman, J., Guy, J., & Kyriazakis, I. (2012). Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry science*, 91(1), 8-25.
33. Leinonen, I., & Kyriazakis, I. (2016). How can we improve the environmental sustainability of poultry production?. *Proceedings of the Nutrition Society*, 75(3), 265-273.
34. Lian, X., Shi, M., Liang, Y., Lin, Q., & Zhang, L. (2024). The effects of unconventional feed fermentation on intestinal oxidative stress in animals. *Antioxidants*, 13(3), 305.
35. Liu, Z., Wang, L., Beasley, D., & Oviedo, E. (2007). Effect of moisture content on ammonia emissions from broiler litter: A laboratory study. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 58(1), 41-53.
36. Mézes, M. (2018). Alternative protein sources in the nutrition of farm animals. *Acta Agraria Debreceniensis*, 21-31.

37. Mottet, A., De Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global food security*, 14, 1-8.
38. Naeem, M., & Bourassa, D. (2025). Probiotics in poultry: unlocking productivity through microbiome modulation and gut health. *Microorganisms*, 13(2), 257.
39. Nahm, K. H. (2002). Efficient feed nutrient utilization to reduce pollutants in poultry and swine manure. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(1), 1-16.
40. Obianwuna, U. E., Chang, X., Oleforuh-Okoleh, V. U., Onu, P. N., Zhang, H., Qiu, K., & Wu, S. (2024). Phytobiotics in poultry: revolutionizing broiler chicken nutrition with plant-derived gut health enhancers. *Journal of animal science and biotechnology*, 15(1), 169.
41. Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., & Kastner, T. (2019). Deforestation displaced: trade in forest-risk commodities and the prospects for a global forest transition. *Environmental Research Letters*, 14(5), 055003.
42. Pirgozliev, V., Rose, S. P., & Ivanova, S. (2019). Feed additives in poultry nutrition, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(Suppl 1), 8–11
43. Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
44. Predescu, N. C., Stefan, G., Rosu, M. P., & Papuc, C. (2024). Fermented feed in broiler diets reduces the antinutritional factors, improves productive performances and modulates gut microbiome—a review. *Agriculture*, 14(10), 1752.
45. Ran, Y., Lannerstad, M., Herrero, M., Van Middelaar, C. E., & De Boer, I. J. (2016). Assessing water resource use in livestock production: A review of methods. *Livestock Science*, 187, 68-79.
46. Ravindran, V. (2013). Main ingredients used in poultry feed formulations. *Poultry Development Review*. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-al705e.pdf>, 67-69.
47. Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2022). Environmental impacts of food production. *Our world in data*.
48. Seidavi, A., Tavakoli, M., Slozhenkina, M., Gorlov, I., Hashem, N. M., Asroosh, F., ... & Swelum, A. A. (2021). The use of some plant-derived products as effective alternatives to antibiotic growth promoters in organic poultry production: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 47856-47868.
49. Selle, P. H., & Ravindran, V. (2007). Microbial phytase in poultry nutrition. *Animal feed science and technology*, 135(1-2), 1-41.

50. Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285-296.
51. Sonea, C., Gheorghe-Irimia, R. A., Tapaloaga, D., Gurau, M. R., Udrea, L., & Tapaloaga, P. R. (2023). Optimizing animal nutrition and sustainability through precision feeding: A mini review of emerging strategies and technologies. *Annals of "Valahia" University of Târgoviște. Agriculture*, 15(2), 7-11.
52. Surai, P. F., Kochish, I. I., Fisinin, V. I., & Kidd, M. T. (2019). Antioxidant defence systems and oxidative stress in poultry biology: An update. *Antioxidants*, 8(7), 235.
53. Tim, S., Peng, L., Zions, J., & Waite, R. (2023). The global land squeeze: managing the growing competition for land. World Resources Institute.
54. Van Krimpen, M. M., Bikker, P., Van der Meer, I. M., Van der Peet-Schwering, C. M. C., & Vereijken, J. M. (2013). Cultivation, processing and nutritional aspects for pigs and poultry of European protein sources as alternatives for imported soybean products.
55. Veldkamp, T., Van Duinkerken, G., van Huis, A., Lakemond, C. M. M., Ottevanger, E., Bosch, G., & Van Boekel, T. (2012). Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets: a feasibility study= Insecten als duurzame diervoedergrondstof in varkens-en pluimveevoeders: een haalbaarheidsstudie.
56. Walk, C. L., Bedford, M. R., Santos, T. S., Paiva, D., Bradley, J. R., Wladecki, H., ... & McElroy, A. P. (2013). Extra-phosphoric effects of superdoses of a novel microbial phytase. *Poultry Science*, 92(3), 719-725.
57. Yadav, S., & Jha, R. (2019). Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of animal science and biotechnology*, 10(1), 2.
58. Yang, C., Chowdhury, M. K., Hou, Y., & Gong, J. (2015). Phytogetic compounds as alternatives to in-feed antibiotics: potentials and challenges in application. *Pathogens*, 4(1), 137-156.
59. Zisis, F., Giamouri, E., Mitsiopolou, C., Christodoulou, C., Kamilaris, C., Mavrommatis, A., ... & Tsiplakou, E. (2023). An overview of poultry greenhouse gas emissions in the Mediterranean area. *Sustainability*, 15(3), 1941.

2. Bölüm

Geçiş Dönemi Beslemesinde Enerji ve Mineral Kaynaklarının Metabolik Hastalıklarla İlişkisi

Yaşar Deray SAYGI¹

1.Giriş

Geçiş dönemi, süt sığırlarında doğumdan yaklaşık üç hafta önce başlayıp doğumdan sonraki üç haftaya kadar süren ve hayvanın metabolik dengeyi sağlamak için uyum mekanizmalarını en yoğun biçimde kullandığı fizyolojik açıdan kritik bir süreçtir (Drackley, 1999; Ingvarstsen & Andersen, 2000). Geçiş döneminde fetüsün son gelişim evresine ulaşması ve kolostrum ile erken laktasyon süt üretiminin başlaması, süt sığırlarının enerji ve besin maddesi gereksinimlerinin ani ve belirgin şekilde artmasına yol açmaktadır. Buna karşın, doğumdan önce ve doğum sırasında kuru madde tüketiminin düşmesi, enerji alımı ile enerji ihtiyacı arasındaki dengeyi bozarak negatif enerji dengesine (NED) neden olmaktadır. NED'nin şiddetlenmesi, vücut yağ depolarının aşırı kullanılmasıyla birlikte ketozis ve yağlı karaciğer sendromu başta olmak üzere, şirdenin yer değiştirmesi ve bağıışıklık sisteminin baskılanması gibi metabolik sorunların daha sık görülmesine neden olmaktadır (Grummer, 1995; Overton & Waldron, 2004).

Geçiş döneminde metabolik hastalıkların ortaya çıkışında yalnızca enerji yetersizliği değil, aynı zamanda mineral metabolizmasındaki bozulmalar da önemli rol oynamaktadır. Özellikle doğumla birlikte süt sentezi için ani şekilde artan kalsiyum gereksiniminin karşılanamaması, klinik ve subklinik hipokalsemi riskini artırmakta; bu durum, rumen faaliyetlerinin azalmasına, yem alımının düşmesine ve buna bağlı metabolik sorunların gelişmesine neden olmaktadır. (Goff, 2008). Bunun yanı sıra fosfor ve magnezyum gibi minerallerin yetersiz veya dengesiz alımı, enerji metabolizması ve hormonal düzenleme mekanizmalarını olumsuz etkileyerek geçiş dönemindeki metabolik adaptasyonu daha da zorlaştırmaktadır (NRC, 2001). Bu nedenle, geçiş döneminde kullanılan enerji ve mineral kaynaklarının miktarı, yapısı ve hayvan tarafından ne ölçüde değerlendirilebildiği, süt sığırlarında metabolik sağlığın korunmasında kritik bir rol oynamaktadır. Enerji alımının yetersiz olması NED'nin şiddetlenmesine neden olurken, aşırı enerji alımı ise aşırı kondisyon kaybına ve doğum sonrası

¹ Öğr. Gör. Dr., Kayseri Üniversitesi Safiye Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu

metabolik stresin artmasına yol açabilmektedir. Benzer şekilde, kalsiyum, fosfor ve magnezyum dengesizlikleri, metabolik hastalıkların görülme sıklığını artırmakta; bu durum sürü sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta ve ekonomik verimlilik açısından önemli kayıplara yol açmaktadır (Goff, 2008; Overton & Waldron, 2004). Bu doğrultuda, geçiş dönemi beslemesinde kullanılan enerji ve mineral kaynaklarının metabolik hastalıklar üzerindeki etkisi, modern süt sığıru yetiştiriciliğinde hem araştırma hem de uygulama açısından açısından büyük önem taşımaktadır.

2. Geçiş Döneminde Enerji Metabolizması

2.1. Negatif Enerji Dengesi

Erken laktasyon döneminde süt sentezinin hızla artması, süt sığırlarında enerji gereksiniminin kısa sürede önemli ölçüde yükselmesine neden olmaktadır. Doğumdan sonra kuru madde alımının sınırlı kalması, enerji alımı ile enerji gereksinimi arasındaki dengenin bozulmasına ve negatif enerji dengesi (NED) oluşmasına neden olmaktadır (Bauman & Currie, 1980; Ingvarsen & Andersen, 2000). Bu metabolik durum, geçiş döneminde enerji metabolizmasının yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir. Negatif enerji dengesi koşullarında, organizmanın artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla vücut yağ depoları hızla tüketilmektedir. Bu süreçte vücut yağ dokusundan kana yoğun miktarda serbest yağ asitleri (NEFA) geçmekte ve bu yağ asitleri öncelikle karaciğer olmak üzere farklı dokular tarafından kullanılmaktadır (Grummer, 1995). Ancak karaciğer kapasitesinin yetersiz kalması durumunda bu yağ asitleri trigliserit şeklinde birikerek yağlı karaciğer oluşumuna neden olabilmektedir (Drackley, 1999). Karaciğerde aşırı trigliserit birikimi, glukoneogenez kapasitesinin azalmasına, keton cisimciklerinin üretimini artmasına ve ketozis riskinin yükselmesine yol açmaktadır. Bu metabolik bozukluklar yalnızca süt verimini olumsuz etkilemekle kalmayıp, bağışıklık sisteminin zayıflamasına ve geçiş dönemi sırasında diğer hastalıkların daha sık ortaya çıkmasına yol açabilmektedir (Overton & Waldron, 2004). Bu nedenle negatif enerji dengesi, geçiş döneminde enerji metabolizmasının merkezinde yer alan ve birçok metabolik hastalığın ortaya çıkmasında önemli bir rol oynayan temel bir fizyolojik sorun olarak kabul edilmektedir.”

2.2. Enerji Kaynakları

Geçiş döneminde enerji beslemesi, süt sığırlarının doğum öncesi ve sonrası dönemde yaşadığı metabolik değişimlere uyum sağlayabilmesi ve negatif enerji dengesinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte hayvanın enerji gereksinimi rasyonlardaki karbonhidrat, yağ ve glukojenik kaynaklardan

sağlanmaktadır (NRC, 2001). Ancak geçiş döneminde enerji kaynaklarının yalnızca miktarı değil, aynı zamanda rumende fermente olma özellikleri, sindirilebilirlikleri ve metabolik etkileri de büyük önem taşımaktadır. Rasyondaki enerji kaynaklarının uygun şekilde seçilmemesi ve dengelenmemesi durumunda, geçiş döneminde ineklerde metabolik problemlerin ortaya çıkma olasılığı artmaktadır (Drackley, 1999; Overton & Waldron, 2004).

Erken laktasyonda süt üretiminin hızla artması, glukoz ve enerji gereksiniminde ani bir yükselmeye neden olurken, kuru madde tüketiminin sınırlı kalması enerji açığını daha da artırmaktadır. Bu nedenle geçiş dönemi rasyonlarının temel amacı, rumen fonksiyonlarını bozmayacak şekilde enerji yoğunluğunu artırmak ve metabolik adaptasyonu desteklemektir (Ingvarsen & Andersen, 2000).

2.2.1. Nişasta ve Fermente Olabilir Karbonhidratlar

Nişasta, geçiş dönemi rasyonlarında en önemli enerji kaynaklarından biri olup, özellikle mısır, arpa ve buğday gibi tahıllar yüksek nişasta içerikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Rasyondaki nişasta, rumen mikroorganizmaları tarafından fermente edilerek uçucu yağ asitlerine dönüştürülmekte ve bu süreçte özellikle propiyonat üretimi artmaktadır. Propiyonat, karaciğerde glukoneogenez yoluyla glukoz sentezine katkı sağlayarak erken laktasyon döneminde artan glukoz ihtiyacının karşılanmasında kritik rol oynamaktadır (Bauman & Currie, 1980; NRC, 2001). Geçiş döneminde yeterli düzeyde glukoz temini, keton cisimciklerinin aşırı üretiminin önlenmesi ve süt veriminin sürdürülebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle nişasta kaynaklarının uygun düzeyde kullanımı, negatif enerji dengesinin şiddetini azaltmada etkili bir besleme stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Grummer, 1995).

Bununla birlikte, geçiş döneminde rasyonda aşırı miktarda hızlı fermente olabilen nişasta kaynaklarının bulunması rumen pH'sının düşmesine ve subakut rumen asidozu (SARA) gelişimine yol açabilmektedir. SARA, rumen mikrobiyal dengesini bozarak lif sindiriminin azalmasına, rumen motilitesinin zayıflamasına ve sonuç olarak yem tüketiminin düşmesine neden olmaktadır (Overton & Waldron, 2004). Yem tüketiminin azalması, negatif enerji dengesini derinleştirerek ketozis ve yağlı karaciğer sendromu riskini artırmaktadır. Ayrıca nişasta kaynağının fiziksel yapısı ve işleme yöntemi (öğütme derecesi, flakeleme, buharlama) nişastanın rumendeki fermente olma hızını doğrudan etkilemektedir. Çok ince öğütülmüş veya yüksek oranda işlenmiş tahıllar rumende hızlı fermantasyona neden olarak asidoz riskini artırabilmektedir. Bu nedenle geçiş

dönemi rasyonlarında nişasta düzeyinin yanı sıra nişasta kaynağının türü ve işlenme şeklinin de dikkate alınması gerekmektedir (NRC, 2001).

2.2.2. Lif Kaynakları

Lif, geçiş dönemi beslemesinde rumen sağlığının korunması ve sindirim sisteminin düzenli çalışması açısından vazgeçilmez bir besin ögesidir. Rasyonda yeterli düzeyde nötral deterjan lif (NDF) bulunması, salya salgısının artırılması yoluyla rumen pH'sının dengede tutulmasına ve rumen motilitesinin sürdürülmesine katkı sağlamaktadır (Ingvartsen & Andersen, 2000). Geçiş döneminde özellikle fiziksel olarak etkili lif (peNDF) kaynaklarının kullanımı önemlidir. Uzun partikül yapısına sahip kaliteli kaba yemler, çiğneme aktivitesini artırarak rumen tamponlama kapasitesini desteklemekte ve asidoz riskini azaltmaktadır. Ancak lifin yalnızca miktarı değil, aynı zamanda sindirilebilirliği de enerji metabolizması açısından önem taşımaktadır. Sindirilme oranı düşük ve aşırı lignin içeren lif kaynaklarının rasyonda yer alması, kuru madde tüketimini azaltarak rasyonun sağladığı enerjiyi düşürmektedir. Bu durum geçiş döneminde enerji yetersizliğini artırmakta ve negatif enerji dengesine bağlı metabolik hastalıkların görülme riskini yükseltmektedir (Overton & Waldron, 2004; NRC, 2001). Bu nedenle geçiş dönemi rasyonlarında lif ve nişasta arasında dengeli bir oran sağlanması, hem rumen sağlığının korunması hem de yeterli enerji temininin sağlanması açısından temel bir besleme stratejisi olarak kabul edilmektedir.

2.2.3. Yağ Kaynakları

Yağlar, birim ağırlık başına yüksek enerji içermeleri nedeniyle geçiş dönemi rasyonlarında enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kuru madde tüketiminin sınırlı olduğu bu dönemde, yağ ilavesi rasyonun enerji yoğunluğunu artırarak negatif enerji dengesinin hafifletilmesine yardımcı olmaktadır (Drackley, 1999). Geçiş dönemi rasyonlarında genellikle rumende parçalanmadan ince bağırsağa ulaşabilen korunmuş yağlar ve by-pass yağ asitleri tercih edilmektedir. Bu yağ kaynakları, rumen fermentasyonunu olumsuz etkilemeden enerji alımını artırabilmeleri nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Uygun düzeylerde kullanıldıklarında vücut yağ yıkımını sınırlayarak ketozis ve yağlı karaciğer sendromu riskini azaltabilmektedirler (Drackley, 1999; NRC, 2001). Bununla birlikte, rasyonda aşırı düzeyde yağ bulunması yem tüketiminin baskılanmasına, lif sindiriminin azalmasına ve rumen mikrobiyal aktivitesinin olumsuz etkilenmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle geçiş dönemi rasyonlarında toplam yağ oranının dikkatle sınırlandırılması ve yağ kaynağının türüne göre uygun kullanım düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, geçiş dönemi beslemesinde karbonhidrat, lif ve yağ kaynaklarının dengeli ve bilinçli Şekilde kullanılması, enerji metabolizmasının desteklenmesi ve metabolik hastalık riskinin azaltılması açısından büyük önem taŐıtmaktadır.

3. Geçiş Döneminde Mineral Metabolizması

3.1. Kalsiyum Metabolizması ve Hipokalsemi

Geçiş dönemi, süt sığırlarında mineral metabolizmasının en yoğun Şekilde yeniden düzenlendiği fizyolojik evrelerden biridir. Bu dönemde özellikle kalsiyum metabolizması, hem süt sentezinin başlaması hem de kas, sinir ve bağışıklık fonksiyonlarının sürdürülmesi açısından kritik öneme sahiptir. Doğumla birlikte kolostrum ve süt üretiminin başlaması, kalsiyum ihtiyacını hızla artırır. Bu nedenle kandaki kalsiyum düzeyinin korunabilmesi için kemiklerden kalsiyum salınımının ve bağırsaklardan emilimin kısa sürede artırılması gerekmektedir (Goff, 2008). Ancak bu düzenleyici mekanizmaların yeterince hızlı veya etkin çalıŐmaması durumunda, kandaki kalsiyum düzeyi fizyolojik sınırların altına düşmekte ve klinik ya da subklinik hipokalsemi ortaya çıkmaktadır. Klinik hipokalsemi, çoğunlukla doğumu izleyen ilk 24–48 saat içerisinde kas gücünde azalma, ayağa kalkmada güçlük ve yem tüketiminde düşüş gibi belirgin semptomlarla ortaya çıkarken; subklinik hipokalsemi daha sık görülmekte ve genellikle belirgin klinik bulgular olmaksızın ilerlemektedir (Horst et al., 1997; Goff, 2008). Subklinik hipokalsemi, klinik formuna kıyasla daha az dikkat çekici olmasına rağmen, sürü sağlığı ve verimlilik açısından ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Düşük serum kalsiyum düzeyleri, düz kas fonksiyonlarını olumsuz etkileyerek rumen ve uterus motilitesinin azalmasına yol açmakta; bu durum yem tüketiminin baskılanması, uterus involsyonunun gecikmesi ve plasenta retensiyonu (plesantanın atılamaması) riskinin artmasına neden olmaktadır (Goff & Horst, 1997). Ayrıca kalsiyumun hücresel sinyal iletiminde oynadığı rol nedeniyle, hipokalsemi bağışıklık hücrelerinin fonksiyonlarını zayıflatarak mastitis ve metritis gibi enfeksiyöz hastalıklara yatkınlığı artırabilmektedir (Horst et al., 1997).

Kalsiyum dengesinin korunmasında paratiroid hormonu (PTH), aktif D vitamini [$1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$] ve kalsitonin başta olmak üzere çeşitli hormonal düzenleyiciler görev almaktadır. Geçiş döneminde bu düzenleyici sistemlerin etkin çalışabilmesi; rasyonla sağlanan kalsiyum miktarı, kalsiyumun emilebilirliği ile fosfor ve magnezyumun dengeli düzeylerde bulunmasına bağlıdır. Doğum ncesi dönemde aşırı kalsiyum içeren rasyonların tüketilmesi, PTH aktivitesini baskılayarak doğumdan sonra kalsiyum mobilizasyonunun yetersiz kalmasına ve hipokalsemi riskinin artmasına neden olabilmektedir (Goff,

2008). Bu nedenle güncel geçiş dönemi besleme yaklaşımları, kalsiyum metabolizmasını doğum sonrası artan gereksinime hazırlamayı hedeflemekte; kuru dönemde düşük kalsiyumlu rasyonların uygulanması, anyon-kasyon dengesi (DCAD) stratejileri ve uygun mineral formlarının kullanımı öncelikli uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu besleme uygulamaları ile doğum sonrası kalsiyum dengesinin korunması, hipokalsemi görülme sıklığının azaltılması ve buna bağlı ikincil metabolik hastalıkların önlenmesi amaçlanmaktadır.

3.2. Rasyon Kasyon–Anyon Dengesi (DCAD) ve Kalsiyum Metabolizması

Rasyon Kasyon–Anyon Dengesi (Dietary Cation–Anion Difference; DCAD), geçiş döneminde kalsiyum metabolizmasının kontrol altına alınmasında yaygın olarak kullanılan önemli bir besleme yöntemidir. DCAD, rasyonda yer alan başlıca pozitif yüklü iyonlar (kasyonlar: sodyum ve potasyum) ile negatif yüklü iyonlar (anyonlar: klor ve kükürt) arasındaki farkı ifade etmekte ve hayvanın asit–baz dengesini doğrudan etkilemektedir (Goff & Horst, 1997).

Doğum öncesi dönemde rasyon kasyon–anyon dengesinin (DCAD) negatif değerlere ayarlanması, ineklerde hafif ve kontrollü bir metabolik asidoz oluşturarak kalsiyum metabolizmasının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu fizyolojik durum, paratiroid hormonunun (PTH) kemik ve böbrek dokularındaki reseptörlere duyarlılığını artırmakta ve PTH'nin biyolojik etkinliğini güçlendirmektedir. Artan PTH aktivitesi sonucunda kemik dokusundan kalsiyum mobilizasyonu hızlanmakta, aynı zamanda aktif D vitamini sentezi uyarılarak intestinal kalsiyum emilimi desteklenmektedir. Bu mekanizmalar sayesinde doğum sonrası dönemde süt senteziyle birlikte ani şekilde yükselen kalsiyum gereksinimine karşı hayvanın metabolik adaptasyon kapasitesi artmakta ve hipokalsemi riski önemli ölçüde azaltılmaktadır (Goff, 2008).

Negatif rasyon kasyon–anyon dengesi (DCAD) stratejileri kapsamında, doğum öncesi dönemde rasyonlara çoğunlukla klor (Cl^-) ve kükürt (S^{2-}) içeren anyonik tuzlar ilave edilmektedir. Bu anyonik bileşiklerin kullanımı, hayvanda hafif düzeyde metabolik asidoz oluşturarak paratiroid hormonunun hedef dokulardaki etkinliğini artırmakta ve kalsiyum homeostazının doğum sonrası döneme daha etkin bir şekilde adapte olmasını sağlamaktadır. Literatürde, negatif DCAD uygulamalarının klinik ve subklinik hipokalsemi ile ilişkili süt humması vakalarının görülme sıklığını anlamlı düzeyde azalttığı bildirilmiştir (Horst et al., 1997). Buna ek olarak, DCAD yaklaşımının sağladığı iyileşmiş kalsiyum dengesi, hipokalsemiye sekonder olarak gelişebilen plasenta retensiyonu (plasantanın atılamaması), metritis ve displaced abomasum gibi doğum sonrası metabolik ve üreme sorunlarının ortaya çıkma riskini dolaylı olarak azaltmaktadır. Bu bağlamda, negatif DCAD uygulamaları yalnızca

hipokalseminin önlenmesine yönelik bir besleme stratejisi olarak değil, aynı zamanda geçiş döneminde genel metabolik stabilitenin ve sürü sağlığının desteklenmesine yönelik bütüncül bir yönetim aracı olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, DCAD uygulamalarının başarısı yalnızca anyon-kasyon oranının ayarlanmasına değil, aynı zamanda rasyonda kullanılan mineral kaynaklarının türüne ve hayvanın kuru madde tüketiminin korunmasına da bağlıdır. Anyonik tuzların lezzetliliği düşürebilmesi nedeniyle yem tüketiminde azalma riski bulunmaktadır; bu durum enerji dengesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle DCAD uygulamaları sırasında rasyon formülasyonunun dikkatle yapılması ve hayvanların yem tüketiminin yakından izlenmesi gerekmektedir (Charbonneau et al., 2006). Kalsiyum kaynaklarının seçimi de DCAD stratejilerinin etkinliğini belirleyen önemli bir faktördür. Doğum öncesi dönemde yüksek çözünürlüğe sahip kalsiyum tuzlarının kullanımı, kalsiyum metabolizmasının düzenlenmesine katkı sağlarken; magnezyum düzeyinin yeterli olması PTH yanıtının etkinliği açısından kritik rol oynamaktadır. Magnezyum yetersizliği, DCAD uygulamalarının olumlu etkilerini sınırlandırabilmektedir (Goff, 2008).

Sonuç olarak, rasyon kasyon–anyon dengesinin uygun şekilde düzenlenmesi, geçiş döneminde kalsiyum homeostazının korunmasına yönelik etkili bir besleme stratejisi olarak değerlendirilmektedir. DCAD yaklaşımının doğru mineral kaynakları ve dengeli bir rasyon yapısı ile birlikte uygulanması, hipokalsemi riskinin azaltılmasına ve doğum sonrası metabolik sağlığın desteklenmesine önemli katkılar sunmaktadır.

3.3. Fosfor ve Magnezyum Metabolizması

Fosfor, süt sığırlarında enerji metabolizmasının temel bileşenlerinden biri olup, özellikle adenosin trifosfat (ATP) sentezi, fosfolipid yapılarının oluşumu ve asit–baz dengesinin korunması açısından kritik fizyolojik işlevlere sahiptir. Geçiş döneminde artan fetal büyüme, kolostrum sentezi ve erken laktasyon süt üretimi, fosfor gereksinimini önemli ölçüde artırmaktadır. Yetersiz fosfor alımı veya fosforun düşük sindirilebilirliğe sahip formlardan sağlanması durumunda, enerji metabolizması olumsuz etkilenmekte; iştahsızlık, verim düşüşü ve üreme performansında bozulmalar görülebilmektedir. Ayrıca, fosfor yetersizliği, kas fonksiyonlarının zayıflamasına bağlı olarak doğum sonrası dönemde ineklerin ayağa kalkmakta güçlük çekmesine ve normalden daha uzun süre yatmasına neden olabilmekte; bu durum ise dolaylı olarak çeşitli metabolik hastalıkların görülme riskini artırmaktadır (NRC, 2001; Goff, 2008).

Magnezyum, geçiş döneminde kalsiyum dengesinin korunmasında önemli bir role sahiptir. Bu mineral, paratiroid hormonunun (PTH) kemik ve böbrek gibi

hedef dokular üzerinde etkili olabilmesi ve PTH'nin kalsiyum düzenleyici mekanizmalarının düzgün çalışabilmesi için gereklidir. Rasyonla yetersiz magnezyum alımı, PTH salınımını ve dokuların PTH'ye yanıtını baskılayarak kalsiyum emilimini sınırlandırmakta ve hem klinik hem de subklinik hipokalsemi riskini artırmaktadır (Horst et al., 1997; NRC, 2001). Bu durum özellikle doğum öncesi dönemde DCAD uygulamalarının etkinliğini de azaltabilmektedir.

Geçiş dönemi rasyonlarında fosfor ve magnezyumun yalnızca miktar olarak değil, aynı zamanda kaynak ve sindirilebilirlik açısından da dengeli şekilde sağlanması büyük önem taşımaktadır. Yüksek potasyum içeren kaba yemlerin magnezyum emilimini baskılayabildiği, bu nedenle magnezyum eksikliğinin pratik sürü koşullarında sık görülebildiği bildirilmektedir (Goff, 2008). Bu bağlamda, geçiş dönemi besleme stratejilerinde uygun fosfor–kalsiyum oranının korunması, yeterli ve sindirilebilirliği yüksek magnezyum kaynaklarının kullanılması, kalsiyum metabolizmasının desteklenmesi ve hipokalsemiye bağlı sekonder metabolik bozuklukların önlenmesine katkı sağlamaktadır.

3.4. İz Mineraller

İz mineraller, geçiş dönemi beslemesinde miktar olarak düşük düzeylerde bulunmalarına karşın, metabolik fonksiyonlar, immun fonksiyonlar ve antioksidan savunma sistemlerinin etkinliği açısından hayati öneme sahiptir. Özellikle çinko (Zn), bakır (Cu) ve selenyum (Se), hücresel bağışıklık mekanizmalarının düzenlenmesi, doku bütünlüğünün korunması ve oksidatif stresin sınırlandırılmasında kritik roller üstlenmektedir. Geçiş döneminde artan metabolik yük ve oksidatif stres, bu iz minerallere olan gereksinimi artırmakta; yetersiz alım durumunda ise hastalıklara karşı direnç önemli ölçüde azalmaktadır (Overton & Waldron, 2004; NRC, 2001).

Çinko, epitel dokuların bütünlüğünün korunması ve bağışıklık hücrelerinin fonksiyonları için gerekli olup, özellikle meme dokusunda bariyer fonksiyonunun sürdürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çinko yetersizliği, meme başı kanalının savunma kapasitesini zayıflatarak mastitis gelişme riskini artırabilmektedir. Bakır ise birçok oksidatif enzim sisteminin yapısal bileşeni olarak görev yapmakta ve nötrofil fonksiyonlarının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Bakır eksikliği durumunda bağışıklık yanıtı zayıflamakta ve enfeksiyonlara duyarlılık artmaktadır (Goff, 2008).

Selenyum, antioksidan savunmada görev yapan glutatyon peroksidaz enziminin temel bileşenlerinden biri olup, hücrelerin oksidatif strese karşı korunmasında önemli bir işleve sahiptir. Geçiş döneminde selenyum alımının yetersiz olması, immün sistem fonksiyonlarının zayıflamasına ve inflamatuvar yanıtların yeterince kontrol edilememesine yol açabilmektedir. Araştırmalar,

düşük selenyum düzeylerine sahip ineklerde mastitis görülme sıklığının arttığını ve özellikle plasenta retensiyonu (plasantanın atılamaması) riskinin daha yüksek olduğunu göstermektedir (Overton & Waldron, 2004; Goff, 2008). Geçiş dönemi rasyonlarında iz minerallerin yalnızca miktar olarak değil, aynı zamanda kimyasal form ve sindirilebilirlik açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. Organik iz mineral kaynaklarının (şelatlı veya proteinat formlar) inorganik kaynaklara kıyasla daha yüksek emilim ve doku tutulumu sağladığı, bu durumun bağışıklık fonksiyonları ve hastalık direnci üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir (NRC, 2001). Bu bağlamda, iz mineral beslemesinin geçiş dönemi yönetiminde bütüncül bir yaklaşımla ele alınması, sürü sağlığının korunması ve üretim kayıplarının azaltılması açısından temel bir strateji olarak kabul edilmektedir.

4. Metabolik Hastalıklarla İlişki

Geçiş döneminde enerji ve mineral beslemesindeki yetersizlikler veya dengesizlikler, süt sığırlarında metabolik hastalıkların ortaya çıkmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle enerji alımının gereksinimlerin altında kalması ve temel minerallerin metabolik olarak etkin şekilde karşılanamaması, ketozis, yağlı karaciğer sendromu, hipokalsemi ve displaced abomasum gibi hastalıkların oluşmasına ortam hazırlamaktadır (Drackley, 1999; Goff, 2008). Bu hastalıklar yalnızca bireysel hayvan sağlığını değil, aynı zamanda sürü verimliliğini, üreme performansını ve işletme ekonomisini de olumsuz yönde etkilemektedir. Negatif enerji dengesi (NED), doğum sonrası erken laktasyon döneminde metabolik hastalıkların temel tetikleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Enerji alımının sınırlı kaldığı bu dönemde vücut yağ rezervlerinin aşırı kullanımı sonucunda dolaşıma yüksek miktarda non-esterifiye yağ asitleri (NEFA) salınmakta, bu durum karaciğer üzerinde ciddi bir metabolik yük oluşturmaktadır. Karaciğerin NEFA'yı okside etme veya lipoproteinler aracılığıyla dolaşıma verme kapasitesinin aşılması halinde, trigliserit birikimi artmakta ve yağlı karaciğer sendromu gelişebilmektedir. Bu süreç aynı zamanda keton cisimlerinin üretimini artırarak subklinik veya klinik ketozis riskini yükseltmektedir (Drackley, 1999; Grummer, 1995).

Mineral metabolizmasındaki bozulmalar da metabolik hastalıkların oluşumunda önemli bir diğer faktördür. Özellikle kalsiyum homeostazının yeterince sağlanamaması, doğum sonrası dönemde klinik veya subklinik hipokalsemiye yol açmaktadır. Hipokalsemi, kas fonksiyonlarının zayıflamasına bağlı olarak rumen ve abomasum hareketlerinin azalmasına neden olmakta; bu durum yem tüketiminin düşmesi, enerji açığının artması ve displaced abomasum riskinin yükselmesiyle ilişkilendirilmektedir. Bunun yanı sıra hipokalsemi, uterus

kasılmalarını da olumsuz etkileyerek doğum sonrası dönemde plasenta retensiyonu ve metritis gibi üreme sistemi komplikasyonlarının daha sık görülmesine yol açmaktadır (Goff, 2008; Horst et al., 1997).

Fosfor ve magnezyum dengesizlikleri de metabolik hastalıkların dolaylı nedenleri arasında yer almaktadır. Fosfor yetersizliği, enerji metabolizmasını ve kasların çalışmasını olumsuz etkileyerek hayvanın ayağa kalkma yeteneğini azaltır; bu durum ise doğum sonrası dönemde genel kondisyon kaybına ve hastalık riskinin artmasına yol açabilmektedir. Magnezyum eksikliği ise paratiroid hormonunun etkinliğini baskılayarak kalsiyum emilimini sınırlamakta ve hipokalsemi riskini artırmaktadır. Bu mineral etkileşimleri, metabolik hastalıkların çoğu zaman birlikte görülmesinin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (NRC, 2001; Goff, 2008).

4.1. Ketozis ve Besleme İlişkisi

Ketozis, geçiş dönemindeki süt sığırlarında en sık karşılaşılan metabolik hastalıklardan biri olup, temel olarak negatif enerji dengesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Doğum sonrası erken laktasyonda süt veriminin hızla artmasına karşın kuru madde tüketiminin yeterli düzeye ulaşamaması, vücudun enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla yağ dokusu rezervlerini kullanmasına neden olmaktadır. Bu süreçte yoğun lipoliz gerçekleşmekte ve dolaşıma yüksek miktarda non-esterifiye yağ asitleri (NEFA) salınmaktadır. Karaciğerde NEFA'nın kısmen okside edilmesi sonucunda keton cisimleri (β -hidroksibütirat, asetoasetat ve aseton) oluşmakta; bu bileşiklerin kanda aşırı birikimi subklinik veya klinik ketozis tablosuna yol açmaktadır (Grummer, 1995; Drackley, 1999).

Besleme açısından, rasyonun enerji yoğunluğu ve nişasta düzeyi ketozis riskini doğrudan etkilemektedir. Yetersiz fermente olabilir karbonhidrat içeren rasyonlar rumende propiyonat üretimini sınırlandırarak glukoz sentezini azaltmakta ve keton cisimlerinin oluşumunu teşvik etmektedir. Ayrıca aşırı kondisyonlu ineklerde doğum öncesi dönemde yağ dokusu birikiminin fazla olması, doğum sonrası dönemde daha şiddetli bir negatif enerji dengesine ve dolayısıyla ketozis riskinin artmasına neden olmaktadır (Overton & Waldron, 2004). Bu nedenle ketozisin önlenmesinde, geçiş döneminde dengeli enerji alımının sağlanması ve kuru madde tüketiminin desteklenmesi temel stratejiler arasında yer almaktadır.

4.2. Yağlı Karaciğer Sendromunun Beslenme Temelli Mekanizmaları

Yağlı karaciğer sendromu, geçiş döneminde negatif enerji dengesinin derinleşmesiyle birlikte ortaya çıkan önemli bir metabolik bozukluktur. Doğum sonrası dönemde artan NEFA akışı, karaciğerin bu yağ asitlerini okside etme veya

çok düşük yoğunluklu lipoproteinler (VLDL) aracılığıyla dolaşıma verme kapasitesini aşabilmektedir. Bu durumda NEFA'lar trigliserit formunda karaciğer hücrelerinde birikmekte ve hepatic fonksiyonlar olumsuz yönde etkilenmektedir (Drackley, 1999).

Beslenme yönetimi açısından, yetersiz enerji alımı, düşük protein düzeyi ve kolin gibi lipotropik maddelerin eksikliği yağlı karaciğer gelişimini kolaylaştırmaktadır. Karaciğer fonksiyonlarının bozulması, glukoneogenez kapasitesini sınırlayarak ketozis riskini artırmakta; aynı zamanda bağışıklık fonksiyonlarının baskılanmasına ve enfeksiyonlara yatkınlığın artmasına neden olmaktadır. Yağlı karaciğer sendromu, genellikle ketozis, hipokalsemi ve displaced abomasum gibi diğer metabolik hastalıklarla birlikte görülmekte ve bu durum, geçiş dönemindeki metabolik sorunların birbirini tetiklediğini göstermektedir (Grummer, 1995; Overton & Waldron, 2004).

4.3. Hipokalsemi ve Sekonder Metabolik Hastalıklar

Hipokalsemi, geçiş döneminde özellikle doğum sonrası erken dönemde artan kalsiyum gereksiniminin yeterince karşılanamaması sonucu ortaya çıkmaktadır. Süt sentezi ile birlikte ani şekilde yükselen kalsiyum ihtiyacı, kemik dokusu ve bağırsaklardan sağlanan kalsiyum ile dengelenemediğinde klinik veya subklinik hipokalsemi gelişmektedir. Subklinik hipokalsemi, çoğu zaman belirgin klinik bulgular göstermemekle birlikte, metabolik ve fonksiyonel bozukluklar açısından önemli riskler taşımaktadır (Goff, 2008).

Hipokalsemiye bağlı olarak kas fonksiyonlarının zayıflaması, rumen ve abomasum motilitesinin zayıflamasına yol açmakta; bu durum yem tüketiminin azalması ve displaced abomasum riskinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca uterus kasılmalarının yetersizliği, plasenta ve metritis gibi postpartum üreme sorunlarının görülme sıklığını artırmaktadır. Bu sekonder hastalıklar, hem süt verimini hem de üreme performansını olumsuz etkileyerek sürü bazında ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Horst et al., 1997; Goff, 2008).

Bu nedenle hipokalseminin önlenmesi, yalnızca tek bir metabolik hastalığın kontrol altına alınması anlamına gelmemekte; aynı zamanda geçiş döneminde görülebilecek çok sayıda sekonder metabolik ve enfeksiyöz problemin önlenmesi açısından da temel bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Uygun DCAD uygulamaları, dengeli mineral beslemesi ve kuru madde tüketiminin desteklenmesi, bu süreçte en etkili yönetim araçları arasında yer almaktadır.

4.4. Metabolik Hastalıkların Sürü Sağlığı, Üreme Performansı ve Ekonomik Etkileri

Geçiş dönemi, süt sığırlarında fizyolojik ve metabolik uyum süreçlerinin en yoğun yaşandığı kritik bir evredir. Bu dönemde enerji ve mineral metabolizmasında meydana gelen yetersizlikler veya dengesizlikler, çeşitli metabolik hastalıkların ortaya çıkmasına zemin hazırlamakta; söz konusu hastalıklar yalnızca bireysel hayvan sağlığını değil, aynı zamanda sürü performansı ve işletme ekonomisini de çok yönlü olarak etkilemektedir. Ketozis, yağlı karaciğer sendromu, hipokalsemi ve displaced abomasum gibi geçiş döneminde en sık görülen ve çoğu zaman birbiriyle ilişkili seyreden metabolik bozukluklar arasında yer almaktadır (Herdt, 2000; Ingvarsten, 2006).

Metabolik hastalıkların sürü sağlığı üzerindeki önemli etkilerinden biri, bağışıklık sisteminin fonksiyonel kapasitesinin azalmasıdır. Doğum öncesi ve doğum sonrası dönemde enerji alımının gereksinimlerin altında kalması, lökosit fonksiyonlarını baskılamakta ve hayvanların enfeksiyonlara karşı direncini düşürmektedir. Özellikle subklinik ketozis ve subklinik hipokalsemi gibi klinik belirti göstermeyen metabolik bozukluklar, mastitis, metritis ve plasenta retensiyonu gibi postpartum hastalıkların görülme sıklığını artırarak sürü sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir (LeBlanc, 2010). Mineral metabolizmasındaki bozulmalar, sindirim sistemi fonksiyonları üzerinde de belirgin etkilere sahiptir. Kalsiyum yetersizliğine bağlı olarak düz kas fonksiyonlarının zayıflaması, rumen ve abomasum motilitesinin azalmasına yol açmakta; bu durum yem tüketiminin düşmesi, sindirim etkinliğinin bozulması ve displaced abomasum riskinin artması ile sonuçlanmaktadır. Bu tür fizyolojik aksaklıklar, sürü genelinde süt veriminde dalgalanmalara ve performans kayıplarına neden olmaktadır (Radostits et al., 2007).

Metabolik hastalıkların üreme performansı üzerindeki etkileri de dikkat çekicidir. Negatif enerji dengesi, ovaryum aktivitesinin baskılanmasına ve doğum sonrası ilk ovulasyonun gecikmesine neden olmakta; buna bağlı olarak kızgınlık belirtileri zayıflamakta, tohumlama başarısı düşmekte ve gebelik oranları azalmaktadır (Butler, 2003). Bunun yanı sıra hipokalsemiye bağlı uterus kasılma gücündeki azalma, uterin involüsyonun gecikmesine ve uterus enfeksiyonlarına yatkınlığın artmasına yol açarak servis periyodunun uzamasına ve doğum aralığının artmasına neden olmaktadır (Goff, 2008; LeBlanc, 2010).

Metabolik hastalıkların ekonomik etkileri, çoğu zaman yalnızca tedavi maliyetleriyle sınırlı kalmamakta; uzun vadeli ve dolaylı kayıplar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Veteriner hizmetleri ve ilaç giderleri gibi doğrudan maliyetlerin yanı sıra, süt verimindeki azalma, üreme performansındaki düşüş, artan sürüden çıkarma oranları ve iş gücü kayıpları işletme ekonomisi üzerinde önemli bir yük

oluşturmaktadır (NRC, 2001; Ingvarstsen, 2006). Özellikle subklinik metabolik hastalıklar, fark edilmeden ilerleyerek ciddi üretim ve gelir kayıplarına yol açabilmektedir.

Sonuç olarak, geçiş döneminde ortaya çıkan metabolik hastalıklar; sürü sağlığı, üreme verimliliği ve ekonomik sürdürülebilirlik üzerinde çok boyutlu olumsuz etkilere sahiptir. Bu nedenle modern süt sığırı işletmelerinde, geçiş dönemi boyunca enerji ve mineral beslemesinin dikkatle planlanması, rasyonların fizyolojik gereksinimlere uygun şekilde düzenlenmesi ve risk altındaki hayvanların erken dönemde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Etkin bir geçiş dönemi yönetimi, metabolik hastalıkların görülme sıklığını azaltarak hayvan refahını artırmakta ve işletme kârlılığının korunmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

5. Sonuç

Geçiş dönemi, süt sığırlarında fizyolojik denge mekanizmalarının eş zamanlı ve yüksek düzeyde yeniden düzenlendiği, metabolik yüklenmenin çok boyutlu olarak ortaya çıktığı kritik bir adaptasyon evresi olarak değerlendirilmektedir. Bu dönemde enerji ve mineral metabolizmasına ilişkin düzenleyici sistemler arasındaki uyumun bozulması, metabolik istikrarın sürdürülebilirliğini sınırlandırmakta ve çok sayıda patofizyolojik sürecin eşzamanlı olarak tetiklenmesine zemin hazırlamaktadır. Özellikle laktasyonun başlangıcında, hayvanın besin maddesi ihtiyacı hızla artarken yem tüketiminin sınırlı kalması, metabolik dengenin kolayca bozulmasına neden olmaktadır.

Enerji metabolizmasındaki dengesizlikler, periferik dokulardan karaciğere taşınan yağ miktarı ve hızını artırır. Bu artış, karaciğerin metabolik kapasitesini zorlayarak keton cisimleri üretiminin ve karaciğerde lipit birikiminin artmasına yol açar. Bu süreçler, çoğu zaman klinik belirti göstermeksizin ilerleyebilmekte ve metabolik bozuklukların zincirleme biçimde ortaya çıkmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle geçiş döneminde görülen metabolik hastalıklar, tek başına ortaya çıkan sorunlar değil, birbirini etkileyen ve güçlendiren fizyolojik bozuklukların bir sonucu olarak değerlendirilmelidir. Mineral metabolizmasına ilişkin düzenleyici mekanizmalar da bu karmaşık adaptasyon sürecinin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Kalsiyum, fosfor ve magnezyum dengesinde meydana gelen küçük değişimler bile hormonal düzenlemeyi olumsuz etkileyerek kas çalışması, sindirim sistemi hareketleri ve üreme organlarının normal fizyolojik işlevlerinde dolaylı bozulmalara neden olabilmektedir. Özellikle kalsiyum homeostazının yeterince desteklenememesi, metabolik hastalıkların klinik tablosunu derinleştiren ve postpartum dönemde komplikasyon riskini artıran temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. İz

mineraller, antioksidan savunma ve bağıklık sistemi üzerindeki etkileriyle bu dönemde metabolik stresin olumsuz etkilerini azaltmaya yardımcı olur.

Bu çerçevede geçiş dönemi beslemesine ilişkin stratejiler, yalnızca gereksinimlerin nicel olarak karşılanmasına odaklanmak yerine, besin öğelerinin metabolik yanıtlar üzerindeki düzenleyici etkilerini de kapsayacak şekilde ele alınmalıdır. Rasyon katyon–anyon dengesi uygulamaları, enerji yoğunluğunun kontrollü biçimde artırılması, mineral formlarının biyolojik etkileşiminin dikkate alınması ve rumen ortamının stabilitesinin korunması, metabolik adaptasyonun yönlendirilmesinde bütüncül araçlar olarak ön plana çıkmaktadır.

Sonuç olarak, geçiş döneminde ortaya çıkan metabolik hastalıklar; besleme yönetimi, endokrin düzenleme ve doku düzeyindeki metabolik yanıtlar arasındaki etkileşimlerin bir sonucu olarak gelişmektedir. Bu hastalıkların etkin şekilde önlenmesi ve kontrol altına alınabilmesi, geçiş döneminin kendine özgü biyolojik dinamiklerinin doğru biçimde anlaşılmasını ve yönetim uygulamalarının bu çok katmanlı yapıya uyumlu olarak planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Metabolik adaptasyonun desteklediği bütüncül bir geçiş dönemi yönetimi ise sürü sağlığının korunması ve üretim performansının sürdürülebilirliği açısından uzun vadeli kazanımların temelini oluşturmaktadır.

Kaynakça

- Bauman, D. E., & Currie, W. B. (1980). Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: A review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *Journal of Dairy Science*, 63(9), 1514–1529. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(80\)83111-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(80)83111-0).
- Butler, W.R. (2003). *Energy balance relationships with follicular development, ovulation and fertility in postpartum dairy cows*. *Livestock Production Science*, 83, 211–218.
- Charbonneau, E., Pellerin, D., & Oetzel, G. R. (2006). Impact of lowering dietary cation-anion difference in nonlactating dairy cows: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 89(2), 537–548.
- Drackley, J. K. (1999). Biology of dairy cows during the transition period: The final frontier? *Journal of Dairy Science*, 82(11), 2259–2273. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75474-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75474-3)
- Goff, J. P., & Horst, R. L. (1997). Physiological changes at parturition and their relationship to metabolic disorders. *Journal of Dairy Science*, 80(7), 1260–1268.
- Goff, J. P. (2008). The monitoring, prevention, and treatment of milk fever and subclinical hypocalcemia in dairy cows. *Veterinary Journal*, 176(1), 50–57.
- Grummer, R. R. (1995). Impact of changes in organic nutrient metabolism on feeding the transition dairy cow. *Journal of Animal Science*, 73(9), 2820–2833.
- Herd, T.H. (2000). *Ruminant adaptation to negative energy balance*. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 16, 215–230.
- Horst, R. L., Goff, J. P., Reinhardt, T. A., & Buxton, D. R. (1997). Strategies for preventing milk fever in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 80(7), 1269–1280.
- Ingvarsen, K. L., & Andersen, J. B. (2000). Integration of metabolism and intake regulation: A review focusing on periparturient animals. *Journal of Dairy Science*, 83(7), 1573–1597.
- Ingvarsen, K.L. (2006). *Feeding- and management-related diseases in the transition cow*. *Animal Feed Science and Technology*, 126, 175–213.
- LeBlanc, S. J. (2010). Monitoring metabolic health of dairy cattle in the transition period. *Journal of Reproduction and Development*, 56(Suppl), S29–S35. <https://doi.org/10.1262/jrd.1056S29>
- National Research Council (NRC, 2001). *Nutrient Requirement of Dairy Cattle*. 7th revised ed., National Academy Press, Washington D.C.

- Overton, T. R., & Waldron, M. R. (2004). Nutritional management of transition dairy cows: Strategies to optimize metabolic health. *Journal of Dairy Science*, 87(E. Suppl.), E105–E119.
- Radostits, O.M., Gay, C.C., Hinchcliff, K.W., Constable, P.D. (2007). *Veterinary Medicine*. Saunders Elsevier.

3. Bölüm

Ormanlıkta İklim Dostu Bir Araç Olarak Biyokömür Kullanımı

Melis ÇERÇİOĞLU¹

Özet

İklim değışikliğinin etkileriyle mücadelede orman ekosistemlerinin rolü giderek önem kazanmaktadır. Orman yönetimi faaliyetleri sırasında ortaya çıkan düşük değerli odunsu artıkların açıkta yakılması, sera gazı emisyonlarına ve toprak degradasyonuna yol açmaktadır. Bu artıkların biyokömüre dönüştürülmesi, hem karbonun atmosfere salımını engellemekte hem de toprak sağlığını iyileştiren çok yönlü bir araç sunmaktadır. Bu kitap bölümü, biyokömürün üretim yöntemlerini, orman topraklarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini, karbon tutma potansiyelini ve orman yangınlarıyla mücadeledeki rolünü ele almaktadır. Biyokömürün, özellikle orman yangını riskini azaltma çalışmalarından elde edilen biyokütlenin değerlendirilmesi, toprak karbonunun uzun vadeli depolanması ve degrade orman alanlarının rehabilitasyonu gibi konularda ormancılık yönetimine entegre edilebilecek iklim dostu bir araç olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca farklı iklim bölgelerindeki güncel çalışmalardan yola çıkılarak biyokömür uygulamalarının başarı koşulları değerlendirilmekte ve Türkiye için öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür, orman toprakları, karbon tutumu, iklim değışikliği, toprak sağlığı

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, İzmir
melis.cercioglu@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6985-7745

Giriş

İklim değişikliği, 21. yüzyılın en büyük çevresel sorunlarından biri olarak orman ekosistemlerini tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar, değişen yağış rejimleri ve şiddetlenen kuraklık, yangın ve böcek salgınları gibi doğal bozunumların sıklığını ve etkisini artırmaktadır (Page-Dumroese vd., 2015; Vannini vd., 2025; Li vd., 2018; Cui vd., 2021; Bruckman & Pumpanen, 2019). Bu durum, ormanların karbon tutma kapasitesini azaltmakta ve orman topraklarının sağlığını tehdit ederek ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. Orman yangınları sonucu oluşan pirojenik karbonun küresel karbon döngüsündeki rolü Jones vd. (2019) tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Biyokömür kullanımı, iklim değişikliğini azaltmak için çok sayıda çevresel fayda sağlayan umut verici bir arazi yönetimi stratejisi olarak son zamanlarda önerilmektedir (Bruckman et al., 2016).

Biyokömür, biyokütlenin (odun, tarımsal atıklar, orman budama atıkları vb.) oksijensiz veya düşük oksijenli ortamda yüksek sıcaklıkta (genellikle 300-700°C) pirolizi sonucu elde edilen, karbonca zengin, gözenekli bir malzemedir (Resim 1; Lehmann & Joseph, 2009; Rodriguez Franco vd., 2024; Thomas & Gale, 2015; Lehmann, 2007). Tarihsel olarak Amazon Havzası'ndaki "Terra Preta" (Kara Toprak) uygulamalarına kadar uzanan geçmişle bilinen biyokömür, modern ormancılıkta sadece bir atık yönetim stratejisi değil, aynı zamanda karbon tutma, toprak sağlığını iyileştirme ve ekosistem hizmetlerini artırma potansiyeli olan çok yönlü bir araçtır (Glaser vd., 2001; Mao vd., 2012). Biyokömür topraklara uygulanarak, toprak kalitesini iyileştirmekte (Weng vd., 2017), toprak kirliliğini azaltmakta (Ahmad vd., 2014), bitki gelişimi/ürün verimini arttırmakta (Biederman ve Harpole, 2013) ve uzun dönemde karbon tutumuna (Wang vd., 2016b) destek olmaktadır. Biyokömürün toprak fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki olumlu etkileri, daha dirençli ve üretken orman ekosistemlerinin oluşmasına katkıda bulunmaktadır. En önemlisi, biyokömür atmosferden karbonu alarak toprakta yüzyıllar boyunca tutma kapasitesiyle, iklim değişikliğiyle mücadelede "negatif emisyon" sağlayan bir araçtır (Smith, 2016; Woolf vd., 2010).

Ormanlar, biyokömür uygulamasının iklimsel faydalarını en üst düzeye çıkarmada tarımsal alanlara göre özel bir avantaja sahiptir. Ağaç örtüsü, zemindeki biyokömüre gölge sağlayabilmekte ve koyu biyokömürün yüzey albedosundaki olumsuz etkisini azaltabilmektedir (Smith, 2016). Biyoenerji tedariki için hedeflenen kısa rotasyonlu ormancılıkta, üretilen kereste atıkları ve hasat artıkları, biyokömür üretimi için uygun maliyetli bir hammadde sağlayabilir (Sohi ve Kuppens, 2016). Bu biyokömür daha sonra orman tabanının yüzeyine uygulanabilir ve orman büyümesini ve yenilenmesini kolaylaştırmak için saha

hazırlama operasyonlarında uygulanabilir. Biyokömürü içeren bu dairesel sistem, karbon emisyonlarını azaltarak ve karbon yakalama ve depolamaya katkıda bulunarak, biyokömür kullanımını temiz bir enerji teknolojisi ve sürdürülebilir bir arazi yönetimi yaklaşımının parçası haline getirmektedir (Gaunt ve Lehmann, 2008).



Resim 1. Biyokömür (Hanssen vd., 2023)

Biyokömür Üretimi: Yöntemler, Teknolojiler ve Süreçler

Biyokütlenin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda ısıtılması (pirolizi) ile elde edilen biyokömür, bozulmaya karşı dirençli olan yapısı, yüksek spesifik yüzey alanı ve negatif yüzey yükü gibi özelliklerinden dolayı toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirebilecek ve bitkisel üretimin verimliliğini arttırabilecek bir katkı maddesi olarak düşünülmektedir (Madari vd., 2017; Zheng vd., 2017).

Biyokömür üretimi, temel olarak biyokütlenin termokimyasal dönüşümüne dayanır. Üretim yöntemi, nihai ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkiler (Lehmann & Joseph, 2009; Wang vd., 2020). Hagenbo vd. (2022), orman artıklarından biyokömür üretiminin teknik potansiyelini değerlendirirken, üretim yöntemlerinin ekonomik fizibilitenin yanı sıra karbon tutma etkinliğini de belirlediğini vurgulamaktadır. Ippolito vd. (2020), farklı hammadde ve piroliz sıcaklıklarının biyokömür özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir meta-analiz ile değerlendirmiştir. Tomczyk vd. (2020) ise piroliz sıcaklığı ve hammadde türünün biyokömürün fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir.

Orman yönetiminde, yangın riskini azaltma ve orman sağlığını iyileştirme amaçlı müdahaleler sonucu ortaya çıkan düşük değerli odunsu artıkların

değerlendirilmesi önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu artıklar tipik olarak açık alanlarda yığılmakta (Resim 2) ve yakılmaktadır. Bu yöntem, hava kalitesini olumsuz etkilemekte ve toprakta istilacı türlerin yerleşebileceği yanık izleri bırakmaktadır. Biyokömür üretimi, bu artıkların havaya karışmasını engelleyerek, orman sağlığını iyileştirmekte ve restorasyon çalışmalarının ekonomik fizibilitesini artırmaktadır. Üretilen biyokömür, hasat ve yangınlardan etkilenen orman topraklarını iyileştirmek, besin tutumunu artırmak, erozyonu azaltmak veya yeniden bitkilendirme çalışmalarında kullanılabilir (Amonette vd., 2021).

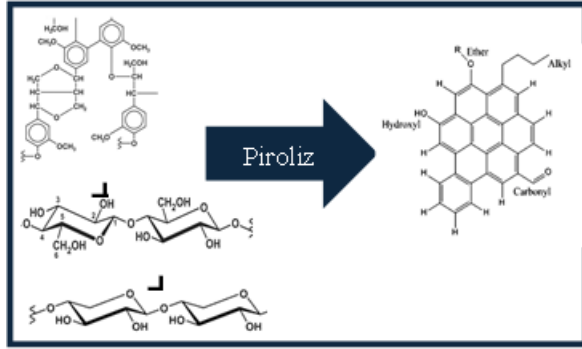


Resim 2. Taşınabilir ve yerinde biyokömür üretimi için kullanılan Ring of Fire fırını (Fotoğraf: wilsonbiochar.com; Amonette vd., 2021)

Piroliz ve piroliz türleri

Piroliz, biyokütlenin oksijensiz ortamda termal olarak ayrıştırılması işlemidir (Şekil 1). Piroliz koşulları (sıcaklık, ısıtma hızı, kalma süresi) biyokömür verimini ve özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir (Li vd., 2018; Wu vd., 2025; Tomczyk vd., 2020). Crombie vd. (2013), piroliz koşullarının biyokömür stabilitesi üzerindeki etkilerini üç farklı yöntemle değerlendirmiştir. Brewer vd. (2009), hızlı piroliz ve gazlaştırma sistemlerinden elde edilen biyokömürlerin karakterizasyonunu yapmıştır. Farklı piroliz türlerinin temel özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Yavaş piroliz en yüksek biyokömür verimini sağlarken, gazlaştırma en düşük verime sahiptir ancak en yüksek karbon içeriği ve yüzey alanını üretir. Yavaş piroliz, ormancılıkta en sık tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemde düşük ısıtma hızı ve uzun kalma süresi, biyokütledeki karbonun daha yüksek oranda aromatik halkalara dönüşmesini sağlayarak biyokömürün kimyasal kararlılığını artırır (Li vd., 2018; Bruckman ve Pumpanen, 2019; Crombie vd., 2013). Lehmann (2007), biyokömürün toprakta yüzyıllar boyunca kalabilen kararlı bir karbon havuzu oluşturduğunu belirtmektedir. Yavaş piroliz sistemleri, yüksek karbon verimliliği (%30-55) sayesinde iklim değişikliğiyle

mücadelede en etkili yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Amonette vd., 2021).



Şekil 1. Piroliz prosesi (Brewer, 2012)

Çizelge 1. Farklı piroliz türlerinin karşılaştırılması (Liu vd., 2018; Ippolito vd., 2020; Brewer vd., 2009; ve Amonette vd., 2021'den özetlenmiştir)

Piroliz türü	Scaklık (°C)	Isıtma hızı	Kalma süresi	Biyokömür verimi (%)	C içeriği (%)	Yüzey alanı (m ² /g)	pH
Yavaş piroliz	300-500	Düşük (5-10°C/dk)	Saatler-günler	25-35-55	70-85	50-200	6-8
Hızlı piroliz	400-600	Çok yüksek (>1000°C/s)	Saniyeler (<2 s)	15-25	50-70	100-400	7-9
Orta hızlı piroliz	400-600	Orta (10-200°C/s)	Dakikalar	20-30	60-80	150-300	7-8
Gazlaştırma	600-900	Orta-yüksek	Saniyeler-dakikalar	5-15	80-90	200-800	8-10
Hidrotermal karbonizasyon	180-250	Düşük	Saatler	50-80	50-70	10-50	4-6

Hammadde türünün biyokömür özelliklerine etkisi

Page-Dumroese vd. (2015), orman artıklarından üretilen biyokömürün özelliklerini inceledikleri çalışmada, farklı ağaç türlerinden elde edilen biyokömürlerin kimyasal bileşimlerinin önemli ölçüde farklılaştığını göstermiştir. Özellikle pH, elektriksel iletkenlik ve besin elementi içerikleri, kullanılan hammaddeye bağlı olarak geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Meşe biyokömürü özellikle yüksek kalsiyum içeriğine sahipken, batı kırmızı sedir biyokömürü asidik karakterdedir (Çizelge 2). Glaser vd. (2002), odun bazlı biyokömürlerin tarımsal atıklardan üretilenlere göre daha yüksek karbon stabilitesine sahip olduğunu belirtmektedir. Liang vd. (2006), biyokömürün

kasyon değişim kapasitesini artırarak toprak verimliliğine katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Çizelge 2. Farklı odunsu hammaddelerden üretilen biyokömürlerin kimyasal özellikleri (Page-Dumroese vd., 2015).

<i>Hammadde</i>	<i>pH</i>	<i>EC</i> ($\mu S/cm$)	<i>C</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>Ca</i> (ppm)	<i>K</i> (ppm)	<i>Mg</i> (ppm)
Karışık iğne yapraklı	8.1	103	89	0.26	6700	3900	990
Yangın sonrası kurtarma	7.4	258	94	0.34	8700	4600	1400
Böcek zararı görmüş	8.1	90	86	0.18	5100	3400	930
Meşe (<i>Quercus garryana</i>)	7.9	180	87	0.62	35000	8600	2300
Batı kırmızı sedir	5.4	789	92	0.31	9800	4300	1300
Douglas göknarı	7.6	156	91	0.28	7200	4100	1100

Batı Amerika'da on yıllar süren yangın söndürme çalışmalarını ve orman yönetimindeki değişiklikler, aşırı yoğun ormanlara yol açarken, iklim değişikliği de yüksek sıcaklıklı orman yangınları riskini artırmıştır. Yangın riskini azaltmayı ve orman sağlığını iyileştirmeyi hedefleyen müdahaleler, tomrukçuluk faaliyetleriyle oluşana ek olarak büyük miktarlarda düşük değerli biyokütle üretmektedir. Bu malzemeler tipik olarak baltalık alanlarında toplanır (Resim 3) ve yakılarak emisyonlara ve peyzajda istilacı türlerin sıklıkla yerleştigi yanık izlerine neden olur. Bu orman artıklarıyla biyokömür üretimi, hava kalitesine fayda sağlayacak, orman sağlığını iyileştirecek ve restorasyon ile tehlikeli yakıt azaltma çalışmalarının ekonomik fizibilitesini artıracaktır. Biyokömür, hasat ve orman yangınlarından etkilenen orman topraklarını iyileştirmek, besin tutumunu artırmak, erozyonu azaltmak veya diğer yeniden bitkilendirme zorluklarını ele almak için yerinde kullanılabilir. Ayrıca tarım topraklarında, maden arazilerinin ıslahında, inşaat malzemelerinde veya diğer amaçlarla kullanılmak üzere ihraç edilebilir (Amonette vd., 2021).



Resim 3. Humboldt, Kaliforniya yakınlarında yakılmak üzere yığılmış orman artıkları. Tomrukçulukta baltalık alanlarının yakılması yaygındır çünkü bunları toplamak/işlemek/yemel bir biyokütle enerji tesisine ulaştırmak genellikle ekonomik olarak mümkün olmamaktadır (Fotoğraf: Han-Sup Han; Amonette vd., 2021).

Biyokömürün Orman Topraklarının Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Biyokömürün orman topraklarına uygulanması, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek toprak sağlığını doğrudan olumlu etkilemektedir (Li vd., 2018; Bruckman & Pumpanen, 2019; Lehmann vd., 2011).

Biyokömürün ılıman bölgelerde ve tropikal ekosistemlerde toprak kalitesini ve ürün verimliliğini arttırdığına dair raporlar yayınlanmaktadır (Güereña ve ark., 2013). Biyokömür besin maddelerinin yıkanmasını azaltır (Laird vd., 2010a); faydalı su miktarını artırır (Rogovska vd., 2014); topraktaki mikrobiyal aktiviteyi (Steiner vd., 2008; Lehmann vd., 2011), pH, kation ve anyon değişim kapasitesi, toplam karbon ve azot (Rondon vd., 2006; Verheijen vd., 2009; Lawrinenko & Laird, 2015; Mukherjee & Lal, 2016) değerlerini artırır. Biyokömürün yüksek gözenekliliği, toprağın havalanmasını iyileştirirken, su tutma kapasitesini de artırarak kurak dönemlerde bitkilerin hayatta kalmasına katkı sağlar (Amonette vd., 2021).

Vannini vd. (2025), kayın ormanı topraklarında yaptıkları çalışmada, biyokömür uygulamasının toprak solunumunu artırdığını ancak bu artışın doğal varyasyon aralığında kaldığını, dolayısıyla uzun vadeli karbon stokları üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını göstermiştir. Nave vd. (2010), orman hasadı sonrası toprak organik karbonunda ortalama %8 azalma olduğunu, biyokömür uygulamasının bu kaybı telafi edebileceğini belirtmiştir. Mukherjee & Lal (2013), biyokömürün toprak fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Blanco-Canqui (2017), biyokömürün toprak hacim ağırlığını azalttığını, poroziteyi ve su tutma kapasitesini artırdığını belirtmektedir. Atkinson vd. (2010), biyokömürün toprak agregat stabilitesini artırarak erozyona karşı

direnci güçlendirdiğini göstermiştir. Karhu vd. (2011), biyokömür uygulamasının kumlu topraklarda su tutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir. Yuan & Xu (2011), biyokömürün asidik topraklarda pH yükseltici etkisini (liming etkisi) dokuz farklı tarımsal atık biyokömürü ile değerlendirmiştir. Dai vd. (2017), biyokömürün toprak asitliğini azaltma potansiyelini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Lorenz & Lal (2014), biyokömürün toprak organik karbon havuzunu artırarak iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağladığını belirtmektedir. Glaser vd. (2002), biyokömürün katyon değişim kapasitesini artırarak besin elementlerinin toprakta tutulmasını sağladığını göstermiştir. Biyokömür, yüksek oranda aromatik karbon içeriği sayesinde toprağa eklendiğinde uzun süre bozulmadan kalabilir ve toprak organik karbon havuzunu artırır (Wang vd., 2016a). Uzun dönemli saha çalışmaları ve doğal analog alanlardaki (tarihi odun kömürü üretim sahaları) araştırmalar, biyokömür uygulamasının, doğal toprak organik karbon stoklarında %30-60 oranında bir artışa yol açabileceğini göstermektedir (Amonette vd., 2021). Wu vd. (2025), permafrost bölgelerinde biyokömür uygulamasının toprak organik karbonunu %60 oranında artırdığını tespit etmiştir.

Biyokömürün yüzey alanı ve negatif yüzey yükü, katyon değişim kapasitesini (KDK) artırarak kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}) ve potasyum (K^+) gibi besin elementlerinin topraktan yıkanarak kaybını azaltır (Liang vd., 2006). Liu vd. (2025), biyokömür uygulamasıyla toprağın nitrat azotu (NO_3^- -N) içeriğinin kontrol grubuna kıyasla %113.8 oranında arttığını tespit etmiştir. Lehmann vd. (2011), biyokömürün toprak mikrobiyal toplulukları için bir sığınak ve enerji kaynağı görevi gördüğünü belirtmektedir. Palansooriya vd. (2019), biyokömür uygulamasının toprak mikrobiyal topluluklarının yapısını ve işlevini değiştirdiğini göstermiştir. Gomez vd. (2014), biyokömür uygulama oranının toprak mikrobiyal aktivitesi ve topluluk yapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Noyce vd. (2015), kuzey ılıman orman topraklarında biyokömür uygulamasının 2 yıl boyunca mikrobiyal topluluk üzerindeki etkilerini izlemiştir. Vannini vd. (2025), kayın ormanı topraklarında biyokömür uygulamasının mikrobiyal topluluk yapısını değiştirdiğini, özellikle yüksek sıcaklıklarda ($25^{\circ}C$) Acidobacteria ve Actinobacteria filumlarının relatif bolluğu artarken, proteobacteria ve bacteroidetes azalmış olduğunu belirlemişlerdir. Mitchell vd. (2015), ılıman orman topraklarında biyokömür uygulamasının mikrobiyal topluluk ve su ile ekstrakte edilebilir organik madde bileşimini değiştirdiğini göstermiştir.

Biyokömürün Orman Fidanı Gelişimi ve Restorasyon Üzerindeki Etkileri

Biyokömürün orman fidanı üretiminde kullanımı, özellikle fidanlık aşamasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Robertson vd. (2012), biyokömür uygulamasının sub-boreal orman topraklarında fidan büyümesini, kök simbiyozlarını ve toprak özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Köster vd. (2021), İskandinav ülkelerinde yürüttükleri çalışmada, fidanlık yetiştirme ortamına %10-20 oranında söğüt biyokömürü eklenmesinin ladin, çam ve huş fidanlarının gelişimini olumlu etkilediğini göstermiştir.

Thomas & Gale (2015) biyokömür ve orman restorasyonunda ağaç büyüme tepkileri üzerine yaptıkları meta-analiz çalışması yürütmüşlerdir. Elde edilen bulgulara göre; ortalama %41 biyokütle artışı, biyomlara göre değişim: Tropikal (%54) > Boreal (%43) > Ilıman (%26), taksonomik gruplara göre değişim: Angiospermler (%46) > Gymnospermler (%21), ve deneme süresine göre değişim: kısa süreli çalışmalarda (<6 ay) daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu meta-analiz, özellikle besin maddesi fakir ve degrade orman topraklarında biyokömür uygulamasının ağaç gelişimini önemli ölçüde teşvik edebileceğini göstermektedir.

Biyokömür ve Karbon Nötrlüğü

Biyokömürün en önemli özelliklerinden biri, karbonu atmosferden alarak toprakta yüzyıllar boyunca tutma kapasitesidir. Smith (2016), biyokömürün "negatif emisyon teknolojisi" olarak önemini vurgulamaktadır. Woolf vd. (2010), sürdürülebilir biyokömür üretiminin küresel iklim değişikliğini hafifletme potansiyelini değerlendirmiştir. Farklı piroliz sıcaklıklarında üretilen biyokömürlerin topraktaki tahmini kalış süreleri (ortalama kalış süresi) düşük sıcaklıkta (300-400°C): 100-300 yıl, orta sıcaklıkta (400-600°C):300-800 yıl, yüksek sıcaklıkta (600-800°C): 800-1200 yıl olarak belirlenmiştir (Wu vd., 2025; Wang vd., 2016a; Kuzyakov vd., 2014). Biyokömürün topraktaki yarılanma ömrü, üretim sıcaklığına ve oksijen/karbon (O:C) mol oranına bağlı olarak değişir ve en kararlı biyokömürlerin toprakta 1000 yıldan daha uzun süre kalabileceği tahmin edilmektedir (Amonette vd., 2021).

Wu vd. (2025), 450°C'de üretilen mısır sapı biyokömürünün orman topraklarında 875 yıl, turbalık alanlarda ise 527 yıl kalabileceğini hesaplamıştır. Kuzyakov vd. (2014), çavdar otu biyokömürünün 8 yıllık inkübasyon sonucunda yıllık karbon kaybının %0.0007 olduğunu, bu oranın biyokömürün 400 yılda yalnızca %1 kayba uğrayacağı anlamına geldiğini hesaplamıştır.

Cayuela vd. (2014), biyokömürün toprak N₂O emisyonlarını azaltmadaki rolünü meta-analiz ile değerlendirmiştir. Li vd. (2018), orman ekosistemlerinde

biyokömür uygulamasının N₂O emisyonlarını azalttığını, CH₄ alımını artırdığını, CO₂ emisyonlarının ise değişkenlik gösterdiğini belirtmiştir. Xu vd. (2020), Moso bambu ormanlarında biyokömür uygulamasının ekosistem karbon tutumunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Sun vd. (2014), iğne yapraklı orman topraklarında biyokömür uygulamasının CO₂ ve N₂O emisyonlarını azalttığını tespit etmiştir.

Dünyadan Ormancılıkta Biyokömür Uygulama Örnekleri

Biyokömürün ormancılıkta kullanımına yönelik dünya genelinde giderek artan sayıda çalışma bulunmaktadır. Çizelge 3'de farklı bölgelerde yapılan önemli çalışmalar özetlenmiştir. Özellikle boreal ormanlarda yapılan çalışmalar, biyokömürün ağaç gelişimini hızlandırdığını ve karbon tutumunu artırdığını ortaya koymaktadır. Permafrost bölgelerinde yapılan çalışmalar ise biyokömürün iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini hafifletmede önemli bir araç olabileceğini göstermektedir. Amonette vd. (2021) tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, ABD'nin batı eyaletlerinde orman yangını riskini azaltma amacıyla yapılan müdahalelerden elde edilen odunsu artıkların, merkezi ve yerinde (place-based) biyokömür üretim sistemleri ile değerlendirilmesi durumunda, 100 yıllık süreçte önemli miktarlarda karbonun toprakta tutulabileceği ve sera gazı emisyonlarının azaltılabileceği öngörülmektedir.

Çizelge 3. Dünyada ormancılıkta biyokömür uygulama örnekleri

Bölge	Orman tipi	Uygulama	Bulgular	Kaynak
Kuzey Amerika	Ponderosa çamı, ladin	Orman içi taşınabilir piroliz, 5-25 t/ha	Toprak su tutma kapasitesinde %10-30 artış, sera gazı emisyonlarında %50 azalma	Page-Dumroese vd., 2015, 2017
Kuzey Amerika	Çeşitli orman tipleri	Meta-analiz, 17 çalışma	Ağaç biyokütlesinde ortalama %41 artış	Thomas & Gale, 2015
Kuzey Amerika	Batı ABD ormanları	25 t/ha biyokömür, 5 yıl	Toprak karbon içeriğinde %41 artış, ağaç büyümesinde etki yok	Sarauer vd., 2019
Kuzey Amerika	Batı eyaletleri ormanları	Orman yangını risk azaltma artıklarından merkezi ve yerinde biyokömür üretimi (modelleme)	100 yılda 450-1.400 Mt CO ₂ eşdeğeri iklimsel fayda potansiyeli	Amonette vd., 2021
İskandinavya	Sarıçam (<i>Pinus sylvestris</i>)	5-10 t/ha odun bazlı biyokömür	Çap artışı %25, boy artışı %12, toprak pH'sında 0.3-0.5 birim artış	Palviainen vd., 2020
İskandinavya	Boreal orman	10 t/ha biyokömür, 8-9 yıl	Ağaç biyokütlesinde %19 artış, toprak N mineralizasyonunda artış	Grau-Andrés vd., 2021

Norveç	Boreal ormanlar	Orman artıklarından biyokömür, ulusal ölçek	Ulusal emisyonların %0.8-1.5'i azaltılabilir	Hagenbo vd., 2022
İtalya	Kayın (<i>Fagus sylvatica</i>)	%0, %10, %20, %50 biyokömür, 360 gün inkübasyon	%20 dozda en yüksek toprak solunumu, karbon stoklarında artış	Vannini vd., 2025
Avusturya	Ilıman orman	4 yıl önce uygulanmış ladin biyokömürü	Toprak karbon içeriğinde %26 artış, sera gazı emisyonlarında olumsuz etki yok	Cui vd., 2021
Almanya	Meşe ormanı	5 t/ha biyokömür, 2 yıl	Toprak N ₂ O emisyonlarında %20 azalma, CH ₄ alımında artış	Sackett vd., 2015
Finlandiya	Boreal çam ormanı	5-10 t/ha biyokömür, 3 yıl	Toprak CO ₂ emisyonlarında değişiklik yok, mikrobiyal biyokütlede artış	Palviainen vd., 2018
Çin (Permafrost)	Karaçam, turbalık	%8 mısır sapı biyokömürü, 360 gün	Orman toprağında toplam organik karbonda %60 artış, CO ₂ emisyonları %19 azalma	Wu vd., 2025
Çin	Moso bambu	5-15 t/ha biyokömür	Ekosistem karbon tutumu %486-252 artış	Xu vd., 2020
Çin	İğne yapraklı orman	30 t/ha biyokömür	CO ₂ emisyonlarında %31.5 azalma, N ₂ O emisyonlarında %25.5 azalma	Sun vd., 2014
Japonya	Meşe ormanı	10 t/ha biyokömür	N mineralizasyonunda ve nitrifikasyonda azalma	Yasuki vd., 2024
Avustralya	Subtropikal orman	5-10 t/ha biyokömür, 3 yıl	Azot kayıplarında azalma, akasya türlerinde büyüme artışı	Li vd., 2024

Sonuç ve Öneriler

Biyokömür, ormancılıkta atık durumundaki odunsu artıkları değerli bir toprak düzenleyiciye dönüştüren, yangın riskini azaltan ve toprak sağlığını iyileştiren iklim dostu bir araçtır. Uluslararası araştırmalar, biyokömürün toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirdiğini, ağaç gelişimini hızlandırdığını ve karbonu yüzyıllarca toprakta depolayarak negatif emisyon sağladığını göstermektedir. Orman yangını riskini azaltma çalışmaları sırasında ortaya çıkan düşük değerli biyokütlenin açıkta yakılması yerine biyokömüre dönüştürülmesi, hem hava kalitesini korumakta hem de karbonun uzun vadeli depolanmasını sağlamaktadır.

Türkiye'de biyokömür kullanımı tarımla sınırlı kalmış, ormancılıkta uygulama aşamasına geçilememiştir. Bu nedenle öncelikle orman artıklarının biyokömür üretiminde kullanılmasına ve topraklara uygulanmasına izin veren yasal düzenlemeler hayata geçirilmelidir. Uluslararası standartlar (IBI, EBC) ulusal mevzuata entegre edilmeli, farklı ekolojik bölgelerde pilot uygulamalar başlatılmalı ve sonuçları bilimsel olarak izlenmelidir. Orman içi taşınabilir piroliz

sistemlerinin yerli üretimi teşvik edilmeli, karbon kredisi mekanizmalarına entegrasyon sağlanmalıdır. Ayrıca orman mühendisleri ve işletmeciler düzeyinde farkındalık artırıcı eğitim programları düzenlenmelidir. Uzun vadeli saha araştırmaları, biyokömürün toprak ve ağaç gelişimi üzerindeki etkilerinin net olarak ortaya konulması açısından gereklidir. Sonuç olarak biyokömür, sürdürülebilir orman yönetiminde degrade toprakların iyileştirilmesi, karbon tutumu ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında umut verici bir araçtır.

Referanslar

- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., & Ok, Y.S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
- Amonette, J.E., J.G. Archuleta, M.R. Fuchs, K.M. Hills, G.G. Yorgey, G. Flora, J. Hunt, H.-S. Han, B.T. Jobson, T.R. Miles, D.S. Page-Dumroese, S. Thompson, K.M. Trippe, K. Wilson, R. Baltar, K. Carloni, C. Christoforou, D.P. Collins, J. Dooley, D. Drinkard, M. Garcia-Pérez, G. Glass, K. Hoffman-Krull, M. Kauffman, D.A. Laird, W. Lei, J. Miedema, J. O'Donnell, A. Kiser, B. Pecha, C. Rodriguez-Franco, G.E. Scheve, C. Sprenger, B. Springsteen, and E. Wheeler. 2021. Biomass to Biochar: Maximizing the Carbon Value. Report by Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman WA.
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D., & Hips, N.A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1-2), 1-18.
- Biederman, L.A., & Harpole, W.S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202–214.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
- Brewer, C.E. (2012). Biochar Characterization and Engineering (Doktora tezi). Iowa State University, Ames, IA. (ProQuest Dissertations & Theses Global, No. 3511366).
- Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A., & Brown, R.C. (2009). Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 386-396.
- Bruckman, V.J., Apaydın Varol, E., Uzun, B.B., & Liu, J. (Eds.). (2016). Biochar: A regional supply chain approach in view of climate change mitigation. Cambridge University Press.
- Bruckman, V.J., & Pumanen, J. (2019). Biochar use in global forests: opportunities and challenges. *Developments in Soil Science*, 36, 427-453.
- Cayuela, M.L., van Zwieten, L., Singh, B.P., Jeffery, S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M.A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 5-16.

- Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S.P., Brownsort, P., & Cross, A. (2013). The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy*, 5(2), 122-131.
- Cui, J., Glatzel, S., Bruckman, V.J., Wang, B., & Lai, D.Y.F. (2021). Long-term effects of biochar application on greenhouse gas production and microbial community in temperate forest soils under increasing temperature. *Science of the Total Environment*, 767, 145021.
- Dai, Z., Zhang, X., Tang, C., Muhammad, N., Wu, J., Brookes, P.C., & Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification—a critical review. *Science of the Total Environment*, 581, 601-611.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1), 37-41.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230.
- Gomez, J.D., Deneff, K., Stewart, C.E., Zheng, J., & Cotrufo, M.F. (2014). Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 28-39.
- Grau-Andrés, R., Pingree, M.R., Öquist, M.G., Wardle, D.A., Nilsson, M.C., & Gundale, M.J. (2021). Biochar increases tree biomass in a managed boreal forest, but does not alter N₂O, CH₄, and CO₂ emissions. *GCB Bioenergy*, 13(8), 1329-1342.
- Güereña, D.T., Lehmann, J., Thies, J.E., & Hanley, K. (2013). Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant and Soil*, 365(1-2), 239–254.
- Hagenbo, A., Antón-Fernández, C., Bright, R.M., Rasse, D., & Astrup, R. (2022). Climate change mitigation potential of biochar from forestry residues under boreal condition. *Science of the Total Environment*, 807, 151044.
- Hanssen, K.H., Bruckman, V.J., Gundale, M., Indriksons, A., Ingerslev, M., Kaivapalu, M., Lazdina, D., Makovskis, K., O'Toole, A., Ots, K., Palviainen, M., Stokland, J., Varnagiryte-Kabasinskiene, I. 2023. Biochar in forestry. Status in the Nordic-Baltic countries. Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO) Report. Vol 9. No:31.49 pages.
- Ippolito, J.A., Cui, L., Kammann, C., vd. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421-438.

- Jones, M.W., Santín, C., van der Werf, G.R., & Doerr, S.H. (2019). Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon. *Nature Geoscience*, 12(9), 742-747.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., & Regina, K. (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1-2), 309-313.
- Köster, E., Pumpanen, J., Palviainen, M., Zhou, X., & Köster, K. (2021). Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized Norway spruce, Scots pine, and silver birch seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(1), 31-40.
- Kuzyakov, Y., Bogomolova, I., & Glaser, B. (2014). Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 70, 229-236.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D.L. (2010a). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 443-449.
- Lawrinenko, M., & Laird, D.A. (2015). Anion exchange capacity of biochar. *Green Chemistry*, 17, 4628-4636.
- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447(7141), 143-144.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009). *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- Li, Y., Hu, S., Chen, J., Müller, K., Li, Y., Fu, W., Lin, Z., & Wang, H. (2018). Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 546-563.
- Li, Y., Sun, W., Xu, Z., Bai, Y., & Bai, S.H. (2024). Long-term effects of biochar application on biological nitrogen fixation of acacia species and soil carbon and nitrogen pools in an Australian subtropical native forest. *Journal of Soils and Sediments*, 24(5), 1956-1968.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., ... & Neves, E.G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
- Liu, Q., Nie, H., Sun, X., Dong, L., Xiang, L., Zhang, J., & Liu, X. (2025). Synergistic Effects of Biochar and *Bacillus thuringiensis* NL-11 on

- Ophiopogon japonicus* Growth and Soil Microbial Diversity in Trampled Urban Forest Soils. *Microorganisms*, 13(9), 2004.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 651-670.
- Madari, B.E., Silva, M.A.S., Carvalho, M.T.M., Maia, A.H.N., Petter, F.A., Santos, J.L.S., Tsai, S.M., Leal, W.G.O., & Zeviani, W.M. (2017). Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. *Geoderma*, 305, 100–112.
- Mao, J.D., Johnson, R.L., Lehmann, J., Olk, D.C., Neves, E.G., Thompson, M.L., & Schmidt-Rohr, K. (2012). Abundant and stable char residues in soils: implications for soil fertility and carbon sequestration. *Environmental Science & Technology*, 46(17), 9571-9576.
- Mitchell, P.J., Simpson, A.J., Soong, R., & Simpson, M.J. (2015). Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 244-254.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313-339.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2016). Biochar and soil carbon sequestration. In *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers* (Vol. 63, pp. 175–197). Soil Science Society of America.
- Nave, L.E., Vance, E.D., Swanston, C.W., & Curtis, P.S. (2010). Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 857-866.
- Negis, H., Şeker, C., Gümüş, I., Manirakiza, N., & Mücevher, O. (2020). Effects of Biochar and Compost Applications on Penetration Resistance and Physical Quality of a Sandy Clay Loam Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(1), 38-44.
- Noyce, G.L., Basiliko, N., Fulthorpe, R., Sackett, T.E., & Thomas, S.C. (2015). Soil microbial responses over 2 years following biochar addition to a north temperate forest. *Biology and Fertility of Soils*, 51(5), 649-659.
- Page-Dumroese, D.S., Coleman, M.D., & Thomas, S.C. (2015). Opportunities and uses of biochar on forest sites in North America. In V.J. Bruckman, E.A. Varol, B.B. Uzun, & J. Liu (Eds.), *Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation* (pp. 315-335). Cambridge University Press.

- Page-Dumroese, D.S., Busse, M.D., Archuleta, J.G., McAvoy, D., & Roussel, E. (2017). Methods to reduce forest residue volume after timber harvesting and produce black carbon. *Scientifica*, 2017, 2745764.
- Palansooriya, K.N., Wong, J.T.F., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S.X., ... & Ok, Y.S. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 1(1), 3-22.
- Palviainen, M., Berninger, F., Bruckman, V.J., Köster, K., de Assumpção, C.R.M., Aaltonen, H., ... & Pumpanen, J. (2018). Effects of biochar on carbon and nitrogen fluxes in boreal forest soil. *Plant and Soil*, 425(1), 71-85.
- Palviainen, M., Aaltonen, H., Laurén, A., Köster, K., Berninger, F., Ojala, A., & Pumpanen, J. (2020). Biochar amendment increases tree growth in nutrient-poor, young Scots pine stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 474, 118362.
- Robertson, S.J., Rutherford, P.M., López-Gutiérrez, J.C., & Massicotte, H.B. (2012). Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(2), 329-340.
- Rodriguez Franco, C., Page-Dumroese, D.S., Pierson, D., & Nicosia, T. (2024). Biochar Utilization as a Forestry Climate-Smart Tool. *Sustainability*, 16(5), 1714.
- Rogovska, N., Laird, D. A., Fleming, P., Karlen, D. L., & Rathke, S. (2014). Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma*, 230-231, 340–347.
- Rondon, M.A., Lehmann, J., Ramírez, J., & Hurtado, M. (2006). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, 43(6), 699–708.
- Sackett, T.E., Basiliko, N., Noyce, G.L., Winsborough, C., Schurman, J., Ikeda, C., & Thomas, S.C. (2015). Soil and greenhouse gas responses to biochar additions in a temperate hardwood forest. *GCB Bioenergy*, 7(5), 1062-1074.
- Sarauer, J.L., Page-Dumroese, D.S., & Coleman, M.D. (2019). Soil greenhouse gas, carbon content, and tree growth response to biochar amendment in western United States forests. *GCB Bioenergy*, 11(5), 660-671.
- Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315-1324.
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Blum, W.E.H., & Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central

- Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 893–899.
- Sun, L.Y., Li, L., Chen, Z.Z., Wang, J.Y., & Xiong, Z.Q. (2014). Combined effects of nitrogen deposition and biochar application on emissions of N₂O, CO₂ and NH₃ from agricultural and forest soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(2), 254-265.
- Thomas, S.C., & Gale, N. (2015). Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*, 46(5-6), 931-946.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215.
- Vannini, A., Tarasconi, D., Pietropoli, F., Forte, T.G.W., Grillo, F., Carbognani, M., & Petraglia, A. (2025). Effects of Wood-Derived Biochar on Soil Respiration of a European Beech Forest Under Current Climate and Simulated Climate Change. *Forests*, 16(3), 474.
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., & Diafas, I. (2009). Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions (EUR 24099 EN). Office for the Official Publications of the European Communities.
- Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020). Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *Science of the Total Environment*, 723, 137775.
- Wang, J., Dokohely, M. E., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016b). Contrasting effects of aged and fresh biochars on glucose-induced priming and microbial activities in paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1), 191–203.
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016a). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512-523.
- Weng, Z.H., Van Zwieten, L., Singh, B.P., Tavakkoli, E., Joseph, S., Macdonald, L.M., Rose, T.J., Rose, M.T., Kimber, S.W.L., Morris, S., Cozzolino, D., Araujo, J.R., Archanjo, B.S., & Cowie, A. (2017). Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nature Climate Change*, 7(5), 371–376.
- Wolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 1-9.

- Wu, H., Zang, S., Wang, H., & Guo, D. (2025). Impact of biochar on carbon sequestration in permafrost region of Northeast China. *Carbon Balance and Management*, 20(1), 44.
- Xu, L., Fang, H., Deng, X., Ying, J., Lv, W., Shi, Y., Zhou, G., & Zhou, Y. (2020). Biochar application increased ecosystem carbon sequestration capacity in a Moso bamboo forest. *Forest Ecology and Management*, 475, 118447.
- Yasuki, N., Saso, W., Koizumi, H., Iimura, Y., Ohtsuka, T., & Yoshitake, S. (2024). Decrease in inorganic nitrogen and net nitrogen transformation rates with biochar application in a warm-temperate broadleaved forest. *Forests*, 15(3), 572.
- Yuan, J.H., & Xu, R.K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(1), 110-115.
- Zheng, H., Wang, X., Zhang, X., Zhang, G., Wang, X., Li, F., Zhang, J., & Xing, B. (2017). Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: Roles of soil aggregation and microbial modulation. *Science of the Total Environment*, 610-611, 951–960.

4. Bölüm

Türkiye’de Göçer Küçükbaş Hayvan Yetiştiriciliğinin Mevcut Durumu, Sorunları ve Çözüm Önerileri

Hilal TOZLU ÇELİK¹

ÖZET

Türkiye, sahip olduğu geniş meralar, farklı iklim tipleri ve zengin hayvancılık kültürüyle küçükbaş hayvan yetiştiriciliği açısından önemli bir ülkedir. Göçer hayvancılık, özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu sistemde yetiştiriciler, hayvanlarını yazın yüksek rakımlı yaylalara, kışın ise daha düşük rakımlı kışlaklara taşıyarak mera olanaklarından mevsimsel olarak faydalanmaktadır. Bu geleneksel üretim modeli hem ekonomik hem de kültürel açıdan önem taşımaktadır. Ancak göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, günümüzde çeşitli sorunlarla karşı karşıyadır. Öncelikle, mera alanlarının daralması ve kalitesinin düşmesi, hayvanların yeterli ve dengeli beslenmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, iklim değişikliği nedeniyle otlatma dönemlerinin kısalması ve su kaynaklarının azalması da önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Yol, barınma ve sağlık hizmetlerine erişimdeki güçlükler, göçer ailelerin yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında, kayıt dışı üretim, pazarlama sorunları ve devlet desteklerine ulaşmada yaşanan zorluklar sektörü güçsüz kılmaktadır. Bu sorunların çözümü için mera yönetiminin iyileştirilmesi, mobil veterinerlik ve eğitim hizmetlerinin artırılması, ulaşım ve altyapının güçlendirilmesi, üretici örgütlerinin desteklenmesi ve göçer üretim sistemine özgü politikaların geliştirilmesi gerekmektedir. Göçer hayvancılığın sürdürülebilirliğini sağlamak hem kırsal kalkınma hem de gıda güvenliği açısından stratejik önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: Koyun, keçi, göçer hayvancılık, sürdürülebilirlik

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Ordu Üniversitesi, Ulubey Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, hilalcelik@odu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-9744-7719>

CURRENT STATUS, PROBLEMS AND SOLUTION SUGGESTIONS OF NOMADIC SMALL RUMINANT BREEDING IN TÜRKİYE

ABSTRACT

Türkiye, with its extensive pasturelands, diverse climatic zones, and rich livestock-rearing tradition, holds a significant position in small ruminant production. Nomadic livestock farming is predominantly practiced in the Eastern and Southeastern Anatolia regions. In this system, herders move their animals to high-altitude summer pastures during the warmer months and return to lower-altitude wintering areas in the colder seasons, thereby utilizing grazing resources seasonally. This traditional production model holds both economic and cultural importance. However, nomadic small ruminant husbandry currently faces various structural and environmental challenges. One of the foremost issues is the shrinkage and degradation of pasturelands, which hinders adequate and balanced animal nutrition. Additionally, climate change has led to shortened grazing periods and a decline in water resources, posing a significant threat to the sustainability of the system. Difficulties in accessing roads, shelter, and healthcare services adversely affect the quality of life of nomadic families. Moreover, problems such as informal (unregistered) production, limited market access, and challenges in obtaining government subsidies further weaken the sector. To address these issues, it is essential to improve rangeland management, expand mobile veterinary and educational services, strengthen transportation and infrastructure, support producer organizations, and develop policies specifically tailored to nomadic production systems. Ensuring the sustainability of nomadic livestock farming is of strategic importance for both rural development and food security.

Keywords: Sheep, goat, nomadic livestock farming, sustainability

GİRİŞ

Dünyada göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, özellikle geleneksel tarım yöntemleriyle hayvancılıkla uğraşan topluluklar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Göçerlik; mevsimsel iklim değişikliklerine bağlı olarak hayvanların yaylak ve kışlaklar arasında hareket ettirilmesine dayalı, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını esas alan bir sistemdir. Göçer hayvancılık, iklim değişikliği, toprak kullanımı, pazar talepleri ve sosyal yapı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Yılmaz et al., 2014; Yazıcı, 2016a; Yazıcı, 2016b).

Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliğinin tarihi, insanlık tarihi kadar eskidir. Eski çağlarda insanların hayvancılık yapma ihtiyaçları sonucunda başlayan bu süreç, zamanla farklı coğrafyalarda çeşitli şekillerde devam etmiştir. Anadolu'da göçer koyun ve keçi yetiştiriciliği, özellikle yerel uygarlıkların tarımsal pratikleriyle birleşerek gelişmiştir.

Göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, yüzyıllardır süregelen ve özellikle Anadolu gibi geniş otlak alanlarına sahip coğrafyalarda önemli bir hayvancılık faaliyetidir. Bu yöntem, göçebe yetiştiriciliğin bir sonucu olarak, koyun ve keçilerin doğal otlaklardan en iyi şekilde faydalanmasını sağlamakta, bölgesel iklim koşullarına ve ekosistemlere adaptasyon gösterebilmesi nedeniyle tarımsal çeşitliliği artırmakta ve yerel ekonomilere önemli katkılarda bulunmaktadır. Bu yetiştiricilik şekli hayvanların mevsimsel göçlerle farklı otlak alanlarından faydalanması esasına dayanır. Bu yöntemle ilgili bazı temel özellikler bulunmaktadır. Bunlar:

1. Mevsimsel Göç: Koyun ve keçi yetiştiricileri, yaz aylarında yüksek dağlık alanlara, kışın ise daha sıcak ve korunaklı alanlara göç ederler. Bu göçler, otlakların dinlendirilmesi ve yenilenmesi açısından kritik öneme sahiptir.
2. Sürdürülebilir Tarım: Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliği, doğanın dengesini koruyarak sürdürülebilir bir tarım anlayışını benimser. Otlakların aşırı kullanımını önler ve ekosisteme zarar vermeden hayvancılığı geliştirir.
3. Yerel Kültür: Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliği, buldukları bölgenin kültürel yapısının önemli bir parçasını oluşturur. Her bölgeye özgü gelenekler, göç rotaları, çadır inşaatları ve beslenme alışkanlıkları bu kültürün bir parçasıdır.

Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliği, sadece tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik açıdan da önemli faydalar sağlar. Koyun ve keçi yetiştiriciliği, birçok aile için önemli bir gelir kaynağıdır. Koyun ve keçi sütü, yünü, kılı ve etinden elde edilen gelir, geçimlerini sağlamalarına yardımcı olur. Küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, kırsal alanlarda istihdam fırsatları oluşturur. Göçer yaşam tarzı, yerel toplulukların bir arada yaşamasını ve iş birliğini teşvik

eder. Bu uygulama, yerel kültürleri ve gelenekleri koruma açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel el sanatları, müzik ve hikâyeler, göçer hayatıyla bütünleşmiştir.

Bu derleme ile Türkiye’de göçer koyun ve keçi yetiştiricilerinin durumu, sorunları ve çözüm önerileri sunularak hayvancılık alanına katkı sunulmaya çalışılmıştır.

1. Türkiye’de koyun ve keçi sayısı

Türkiye koyun ve keçi sayısı ve bölgelere göre dağılım Tablo 1’de sunulmuştur. Toplam koyun sayısı 2024 yılı verilerine göre 44.080584 baş koyun ve 10.822084 baş keçi varlığı bulunmaktadır. En fazla koyun ve keçi varlığının Güneydoğu Anadolu bölgesinde olduğu tablo 1’de görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde 2024 yılı hayvan varlığının %12 ‘ini küçükbaş hayvanlar oluşturmaktadır. Hayvan yetiştiriciliğinde önemli bir paya sahip olan küçükbaş hayvanlar geçim kaynağı olması ve ülke ekonomisine önemli katkıları bulunması bakımından önemli bir yere sahiptir.

Tablo 1. 2024 yılı Türkiye Koyun ve Keçi Sayısı (Tüik, 2025a)

Bölgeler	Koyun (baş)	Keçi (baş)
<i>İstanbul</i>	145667	22299
<i>Batı Marmara</i>	2682883	553709
<i>Ege</i>	3965998	1042720
<i>Doğu Marmara</i>	2027721	278450
<i>Batı Anadolu</i>	5348007	708664
<i>Akdeniz</i>	3543905	2756489
<i>Orta Anadolu</i>	4636740	403528
<i>Batı Karadeniz</i>	1324972	268357
<i>Doğu Karadeniz</i>	713379	81683
<i>Kuzeydoğu Anadolu</i>	4699229	297840
<i>Ortadoğu Anadolu</i>	6954354	1636765
<i>Güneydoğu Anadolu</i>	8037729	2771580
<i>Toplam</i>	44080584	10822084

Göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği Türkiye’de Doğu Anadolu bölgesinde yaygın olan bir yetiştiricilik şeklidir (Yıldırım vd., 2021). Diğer bölgelerde de göçer yetiştiricilik yapılmaktadır. Karadeniz bölgesinde de özellikle koyun yetiştiricileri Nisan ayı ile yaylalara göç ederek yetiştiriciliği sürdürmektedir. Siirt ilinde küçükbaş hayvancılık işletmelerinin çoğunluğu dağ ve ova köylerde bulunmaktadır (Bakır ve Mikail, 2019). Göçebe yetiştiricilik yapanlar yazın

yaylalarda kışın ise kışlaklarda koyun yetiştiriciliğini sürdürmektedirler (Bakır vd., 2017). Bu sistemde yetiştiriciler hayvanlarını Nisan ayında meralara, Haziran ayında yaylalara çıkarmakta, Ekim-Kasım-Aralık ayında köy içinde anız ve bahçe içlerinde otlatmaktadırlar. İğdir ilinde ise koyunlar 8 ay mera ve yaylalarda otlatılmaktadırlar. Mera ve yaylaya gidiş dönüş araçla sağlayanlar %55.2, yaya gidenler %17.8 olarak bildirilmiştir (Savaş vd., 2019).

Tablo 2. Türkiye’de 2024 yılı hayvan sayıları (Tüik, 2025b)

Hayvanlar	Baş
<i>Sığır</i>	16.824208
<i>Manda</i>	162.051
<i>Deve</i>	1137
<i>Koyun</i>	44.080584
<i>Keçi</i>	10.822084
<i>At, katır ve eşek</i>	149.219
<i>Kümes hayvanları</i>	384.146654
<i>Toplam</i>	456.185937

2. Türkiye’de Göçer Küçükbaş Hayvan Yetiştiriciliğinin Sorunları

Göçer koyun yetiştiriciliği, birçok avantajına rağmen bazı zorluklarla da karşı karşıyadır:

2.1. İklim Değişikliği ve Doğal kaynakların Azalması

Hava koşullarındaki değişiklikler, otlakların verimliliğini ve sürekliliğini tehdit etmekle birlikte tarım ve hayvancılık üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır. Göçer hayvancılıkla uğraşan yetiştiriciler, iklim koşullarındaki değişiklikler nedeniyle otlatma alanlarını bulmakta zorlanmakta ve hayvanlarının beslenmesi için gerekli olan doğal kaynakların azalmasıyla karşılaşmaktadır (Tozlu Çelik ve Tüfekci, 2024). Bu durum, hayvanların sağlık durumunu olumsuz yönde etkilemektedir. Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliğinde göç güzergahlarında su ihtiyacının karşılanmasında su kaynaklarının durumu, yem fiyatlarının yüksek olması, yem temini ve nakilde yol güvenliği başlıca sorunlardandır (Çelik, 2016; Karadaş, 2017; Karadaş, 2018; Tozlu Çelik ve Tüfekci, 2024).

2.2. Yetiştiricilerin Yaş ve Eğitim Seviyesi

Göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, özellikle kırsal alanlarda yaşayan topluluklar için önemli bir geçim kaynağıdır. Ancak, genç nüfusun kırsal alanlardan şehirlere göç etmesi, bu sektördeki işgücü eksikliğine yol açmaktadır. Çalışanların yaş ortalamasının yükselmesi, çiftçilerin yenilikçi yöntemler ve

modern teknikler konusunda yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Yıldız ve Aygün, 2021).

Küçükbaş hayvan yetiştiricileri ortalama 41 ve üzeri yaşlarda (Gökmener ve Öztürk, 2022; Tüney Bebek ve Keskin, 2018; Tozlu Çelik ve Tüfekci, 2024) ve çoğunluğu ilkokul düzeyinde eğitime sahip (Şanlıurfa (%90,5), Hakkâri (%36,4), Iğdır (%51,1), Afyonkarahisar Hocalar ilçesinde (%75,20)) olup geleneksel yöntemlerle yetiştiricilik yapmaktadırlar (Aydın ve Keskin, 2018; Karadaş, 2017; Karadaş, 2018; Yılmaz vd., 2020; Yıldırım vd., 2021; Serttaş vd., 2022; Yıldız ve Aygün, 2021). Sağlık koruma uygulamalarıyla ilgili bilgi eksikliği en önemli konulardır (Tüfekci, 2020).

2.3.Damızlık temini

Küçükbaş hayvancılıkta damızlık temini sorunu, sektörün verimlilik, genetik ilerleme ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir problemidir. Özellikle koyun ve keçi yetiştiriciliğinde kaliteli damızlık hayvanların yeterli sayıda bulunamaması birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de üretimi sınırlandıran faktörlerden biridir. Yetiştiriciler damızlık koç, teke ve anaç ihtiyacını kendi sürülerinden, hayvan pazarından, komşu sürülerden ve üniversite çiftliklerinden karşılamaktadırlar (Taşkın vd., 2017; Yılmaz vd., 2020; Aydın ve Keskin, 2018, Tüfekci, 2020; Gökmener ve Öztürk, 2022; Arıtunca ve Karabacak, 2020). Damızlık temini sorunu, sürüde kullanılacak yüksek genetik kapasiteye sahip koç, teke veya damızlık dişi hayvanların yeterli sayıda ve uygun kalitede temin edilememesi durumudur. Bu durum sürülerin genetik gelişimini yavaşlatır ve üretim performansını olumsuz etkiler. Birçok bölgede sistemli seleksiyon ve kayıt tutma eksikliği bulunmaktadır. Bu nedenle yüksek verimli hayvanların belirlenmesi ve damızlık olarak kullanılması zorlaşır. Halk elinde yürütülen ıslah projeleri bu sorunu azaltmayı amaçlamaktadır. Türkiye’de küçükbaş işletmelerinin büyük bölümü küçük aile işletmeleridir. Bu işletmelerde planlı seleksiyon yapılmaması, koç ve teke değişiminin düzensiz olması, akrabalı yetiştirme riskinin artması gibi sorunlar damızlık kalitesini düşürmektedir. Özel veya kamuya ait damızlık üretim sürülerinin sayısı sınırlıdır. Damızlık yetersizliği şu sonuçlara yol açabilir. Bunlar sürü veriminde düşüş, büyüme performansının zayıflaması, süt veriminin düşük kalması, döl veriminde azalma, akrabalı yetiştirme riskinin artması, genetik ilerlemenin yavaşlamasıdır. Bu durum özellikle et ve süt üretiminde ekonomik kayıplara neden olur.

2.4.İşçi ve çoban sorunu

Göçer koyun yetiştiriciliğinde en önemli problemlerden biri nitelikli çoban teminindeki zorluktur. Yetiştiricilerin çoğunluğu çoban bulmada sorun yaşamaktadır (Yıldız ve Aygün, 2021; Gürer ve Ulutaş, 2021). Bu sorunun nedenleri arasında çobanlık mesleğinin genç nüfus tarafından tercih edilmemesi, uzun çalışma saatleri ve zor çalışma koşulları, sosyal güvence ve düzenli gelir eksikliği, kırsal kesimden kentlere göç olarak sıralanabilir (Tozlu Çelik ve Tüfekci, 2024). Çoban bulmada yaşanan sorunlar beraberinde sürü yönetiminin zayıflamasına, hayvan kayıplarının artmasına, meraların etkin kullanılamaması ve yetiştiricilerin üretimden çekilmesine sebep olabilir. Bu nedenle bazı işletmeler yabancı çoban çalıştırmak zorunda kalabilmektedir. Şanlıurfa da yapılan araştırmada yabancı işçi çalıştıranlardan %22,0'ı bir ve %1,6'sı iki yabancı işçi çalıştırırken yabancı işçilerin yaşları 27 ila 48 arasında olup ortalama yaşları 38'dir. Yabancı işçi çalıştıran işletmelerdeki ortalama çalışma süreleri 227 gün/yıl olup bu işçiler işletmede çobanlık ve sağım işlerinde çalışmaktadırlar (Karadaş, 2017). Hakkâri ilinde koyunculuk işletmelerinin %90,3'ünde yabancı işçi kullanılmaktadır (Karadaş, 2018). Iğdır ilinde de çoban bulma sorunu yaşayanların oranı %92,5 olarak bildirilmiştir (Savaş vd., 2019). Bu çalışmalar göçer yetiştiricilik yapanların çoban bulmakta güçlük çektiklerini göstermektedir.

2.5.Trafik ve Yabani hayvan sorunu

Göçer yetiştiricilikte sürüler mevsimsel olarak uzun mesafeler kat eder. Bu süreçte karayollarının kullanılması veya kesilmesi trafik riskini artırmaktadır. Göçebe yetiştiricilerin hayvanları yürüttükleri güzergahlarda yolda trafik kaynaklı geçiş sorunları yaşanmaktadır (Ayan ve Yılmaz, 2024). Bu sorunlardan araç çarpması sonucu hayvan kayıpları, sürünün dağılması ve yaralanmalar, sürü hareketi nedeniyle trafik kazaları ve sürü geçiş yollarının daralması veya kapanması görülebilmektedir. Bu nedenle bölgesel ve yerel göç yollarının planlanması, sürü geçiş noktalarının belirlenmesi, yerel yönetimlerin trafik güvenliği önlemleri ve göç tarihlerinin trafik güvenlik birimlerine bildirilmesi yaşanan sorunları azaltabilir.

Göçer yetiştiricilikte küçükbaş hayvanların geçtiği güzergahlar ve otlatma alanlarında yabani hayvan saldırı yaşanabilmektedir. Göçer sürüler çoğunlukla orman, dağ ve yüksek rakımlı mera alanlarında otlatıldığından yırtıcı hayvan saldırılarına açık hale gelmektedir. Türkiye'de küçükbaş hayvanlar için başlıca yırtıcılar şunlardır: Canis lupus (kurt) (Ölmez ve Demirbaş, 2024), Ursus arctos (ayı), Vulpes vulpes (tilki), Canis aureus (çakal) (Cagay vd., 2024). Yetiştiriciler

bu sorun sebebiyle kuzu ve koyun kayıpları, sürü stresinin artması, gece otlatma veya mera kullanımının kısıtlanması ve ekonomik kayıplarla karşı karşıya kalmaktadırlar. Yetiştiriciler çoban köpekleri kullanmaktadır. Ancak hayvan kayıpları yaşanabilmektedir. Özellikle son yıllarda en fazla kurt saldırı olayları yaşanmaktadır. Bu nedenle sürü koruma köpeklerinin kullanımı, gece ağıllarının güçlendirilmesi ve zarar gören yetiştiricilere tazminat desteği sürdürülebilir yetiştiriciliğe destek olacaktır.

2.6. Yayla veya meraya taşıma

Göçer koyun yetiştiriciliğinde sürüler yılın belirli dönemlerinde kışlaklardan yayla ve yüksek rakımlı meralara doğru hareket eder. Bu göç sürecinde sürülerin belirli aralıklarla dinlenme ve konaklama alanlarına ihtiyaç duyması doğal bir gerekliliktir. Ancak günümüzde yayla ve meraya göç sırasında uygun dinlenme yerlerinin yetersizliği veya erişim sorunları önemli bir problem haline gelmiştir. Göçer yetiştiriciler hayvanlarını taşımada araç bulmada sorun yaşamaktadırlar (Savaş vd., 2019). Göç yollarında geçtikleri güzergahlarda istenmemeleri de yaşanan zorluklar içerisinde yer almaktadır (Ayan ve Yılmaz, 2024). Geçmişte göç yolları üzerinde bulunan geleneksel konaklama alanları, mera ve boş araziler zamanla farklı amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. Tarım alanlarının genişlemesi, yerleşim yerlerinin artması ve arazi kullanımındaki değişimler nedeniyle bu alanların bir kısmı ortadan kalkmıştır. Bu durum sürülerin göç sırasında yeterli dinlenme alanı bulmasını zorlaştırmaktadır. Dinlenme alanlarının önemli bir kısmında: içme suyu kaynakları yetersiz, hayvanlar için suluk veya gölgelik, geçici barınak veya ağıl alanları bulunmamaktadır. Bu durum özellikle uzun mesafeli göçlerde hayvanların stres yaşamasına ve performans kaybına neden olabilir (Tozlu Çelik vd., 2021). Uygun dinlenme alanlarının bulunmaması, sürülerin yol kenarlarında veya uygun olmayan alanlarda konaklamasına neden olabilmektedir. Bu durum: hayvanların dağılması, hırsızlık riski, yırtıcı hayvan saldırıları, trafik kazaları gibi güvenlik sorunlarını artırmaktadır.

Dinlenme yerleriyle ilgili sorunların azaltılması için göç yolları üzerinde

- Planlı konaklama ve dinlenme alanlarının belirlenmesi,
- Bu alanlarda su kaynakları ve temel altyapının sağlanması,
- Göçer yetiştiricilerin kullandığı geleneksel göç yollarının korunması,
- Yerel yönetimler ve yetiştirici birlikleri arasında koordinasyonun artırılması,

- Dinlenme alanlarının haritalanması ve kayıt altına alınması ile hem hayvan refahı artırılabilir hem de göçer yetiştiricilik faaliyetlerinin daha sürdürülebilir şekilde devam etmesine katkı sağlayabilir.

2.7.Otlatma alanı

Artan nüfus ve yerleşim alanlarının genişlemesi, geleneksel göç yollarını ve otlakları kısıtlayabilmektedir. Sürdürülebilir küçükbaş hayvan yetiştiriciliği için bu güzergahların korunması önem taşımaktadır. Göçer koyun yetiştiriciliği (transhumans), hayvanların mevsimsel olarak kışlak ve yayla arasında hareket ettirilmesine dayanan geleneksel bir üretim sistemidir. Ancak bu sistem günümüzde çeşitli hukuksal ve idari sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Göçer yetiştiricilerin faaliyetlerini sürdürmesini zorlaştıran bu problemler genellikle mera kullanımı, göç yolları, barınak yapımı ve idari izinlerle ilgilidir. Bazı bölgelerde otlak kullanımı konusunda hukuksal problemler yaşanmakta, bu da göçer koyun yetiştiricilerini olumsuz etkilemektedir. Göçer yetiştiricilerin en önemli sorunlarından biri mera ve yaylalara erişim konusunda yaşanan hukuksal kısıtlamalardır. Yayla kiralama sorunu yaşanmaktadır. Iğdır ilinde yetiştiricilerin %58.1'inin yayla kiralamada sorun yaşadığı belirtilmiştir (Savaş vd., 2019). Göçer yetiştiriciler merada hayvanlarını ortalama 8-10 ay otlatma yapmakta ve meralar yetersiz kalmaktadır (Aydın ve Keskin, 2018; Tüfekci, 2020; Gökmener ve Öztürk, 2022). Meraların yoğun ve düzensiz otlatılması, bilgi eksikliği ve yem fiyatlarının yüksek olması sebebiyle ek yemleme yapılamaması sebebiyle hayvanlar yeterli düzeyde beslenememektedirler (Gökmener ve Öztürk, 2022). Bu sorunlar et, süt ve döl veriminde düşmelere neden olarak ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

2.8.Barınak sorunu

Göçer koyun yetiştiriciliğinde karşılaşılan önemli sorunlardan biri de barınak yetersizliği veya barınak sorunudur. Göçer sistemde sürüler yılın belirli dönemlerinde farklı meralara taşındığından, hayvanlar çoğu zaman kalıcı ve uygun barınaklara sahip olmadan yetiştirilmektedir. Bu durum hem hayvan refahını hem de üretim performansını etkileyebilmektedir. Koyun ve keçi ağılları genellikle eski yapılardan oluşmaktadır. Göçtükleri yaylalarda eski yapılar ya da tamamen açık alanlarda barındırma yapılmaktadır. Ağılların yenilenmesi ve modern yapılarla desteklenmesi koyun yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir (Serttaş vd., 2022; Gökmener ve Öztürk, 2022). Kış aylarında barınaklarda havalandırma pencerelerinin yetersizliği, sulukların plastik veya metal olması ve yetersiz alan yem dağıtımı için zorluklar oluşturmaktadır (Bakır vd. 2017). Göçer yetiştiriciler genellikle yayla veya mera

alanlarında geçici ağıllar, çadırlar veya basit barınaklar kullanmaktadır. Ancak bu yapılar çoğu zaman yağmur ve rüzgâra karşı yeterli koruma sağlamaz ve aşırı sıcak veya soğuk hava koşullarına karşı yetersiz kalır. Bu durum özellikle kuzulama döneminde hayvan kayıplarını artırabilmektedir (Shiels vd., 2022; Bozkurt vd., 2023). Yüksek rakımlı yayla alanlarında hava koşulları hızlı değişebilmektedir. Yetersiz barınaklar nedeniyle hayvanlar şiddetli yağış, düşük sıcaklık, rüzgâr, güneş stresi gibi çevresel faktörlere doğrudan maruz kalmaktadır. Bu da bağışıklık sisteminin zayıflamasına ve verim kayıplarına yol açabilmektedir. Göçer sistemde doğan kuzular çoğu zaman korunaklı kuzulama bölmelerine sahip değildir. Bu durum kuzu ölümlerinin artmasına, anneden ayrılma sorunlarına hipotermi riskine neden olabilmektedir.

Göçer yetiştiricilerin yaylalarda kalıcı barınak yapmasına çoğu zaman yasal izin verilmemektedir veya arazi mülkiyeti buna uygun değildir. Bu nedenle yetiştiriciler kalıcı ve sağlam barınaklar kuramamaktadır.

Barınak sorununu azaltmak için yayla ve meralarda yarı taşınabilir (mobil) barınak sistemlerinin geliştirilmesi, kuzulama döneminde kullanılacak korunaklı geçici ağılların kurulması, göçer yetiştiricilere barınak materyali ve altyapı desteği sağlanması ve yerel yönetimlerin yayla alanlarında planlı barınak alanları oluşturması sağlanabilir.

2.9. Hayvan Sağlığı ve Hastalıklar

Yetersiz beslemeden kaynaklı pika hastalığı görülmektedir (Yıldırım vd., 2021). Sindirim ve solunum hastalıkları da sıklıkla karşılaşılan hastalıklardandır (Gökmener ve Öztürk, 2022). Göçer küçükbaş hayvan yetiştiricileri, hayvanların sağlık durumlarını kontrol etmekte zorluk çekebilmektedir. Özellikle yayla ve meralarda aşı ve veteriner hizmetlerine ulaşımın zorluğu, hayvan sağlığını tehdit eden bir diğer faktördür.

2.10. Pazar Erişimi ve Rekabet

Göçer hayvan yetiştiricileri ürünlerini pazara ulaştırmakta ve rekabetçi fiyatlar elde etmekte zorlanmaktadır (Ayan ve Yılmaz, 2024; Gökmener ve Öztürk, 2022; Tüfekci, 2020). Yerel pazarların daralması, büyük tarım işletmeleri sanayi hayvancılığı ile rekabet etmelerini zorlaştırmaktadır. Bu durum, çiftçilerin gelirlerini düşürmekte ve sektördeki sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Bu sorunlara yönelik atılacak adımlar, göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinin desteklenmesi ve sürdürülebilir kılınması açısından kritik öneme sahiptir.

3.Sonuç ve Çözüm Önerileri

Türkiye’de göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, zengin bir kültürel mirasa sahip olmasına rağmen, çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. İklim değişikliği, sosyal ve ekonomik sorunlar ile hayvan sağlığı konularındaki aksaklıklar, bu sektörün sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Bu sorunların çözüme kavuşturulması, sadece üreticilerin değil, aynı zamanda tüm toplumun refahı için büyük önem taşımaktadır. Küçükbaş hayvan yetiştiricileri, iklim değişikliği ile mücadele edecek yeni stratejiler geliştirmek zorundadır. Kuraklık, su kaynaklarının azalması ve beslenme alanlarının kaybı, göçer hayvancılığı etkileyen önemli sorunlar arasındadır.

Göçer koyun ve keçi yetiştiriciliği, geleneksel bir hayvancılık yöntemi olarak tarih boyunca önemli bir rol oynamıştır. Sürdürülebilir tarım uygulamaları ve yerel kültürün korunmasında sağladığı katkılarla günümüzde de önemini korumaktadır. Ancak, modern dünyanın getirdiği zorluklarla başa çıkabilmek için yenilikçi çözümler ve politikalar geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede, göçer küçükbaş yetiştiriciliği hem ekonomik olarak hem de kültürel olarak daha güçlü bir şekilde gelecek nesillere aktarılabilir.

Tarım ve Hayvancılık Pratikleri

Göçer küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, hayvanların otlatma alanlarını sezonluk olarak değiştirilmesi temeline dayanır. Bu, hayvanların beslenmesini sağlarken aynı zamanda bitki örtüsünün sürdürülebilir bir şekilde korunmasına yardımcı olur.

Mera ıslahı küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Yapılan çalışmalarda mera ıslahı, yem destekleri, su ihtiyacının giderilmesi için hayvanların otlatıldığı alanlarda yalakların bulundurulması ve düzenli kontrol edilmesi önerilmiştir (Çelik, 2016; Karadaş, 2017; Savaş vd., 2019). Bu yönde mera ve yaylalarda otlatma alanlarının tahribatının önlenmesi için kaba yem üretimi teşvik edilmelidir (Yılmaz vd., 2020; Serttaş vd., 2022). Yetiştiricilere düzenli eğitim verilerek koyun ve keçi yetiştiriciliğinde sürdürülebilirlik ve güvenli gıda üretimi sağlanabilir (Aydın ve Keskin, 2018; Tüfekci, 2020; Yıldırım vd., 2021). Nitelikli damızlık temini ve yetiştiricilerin eğitimi küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir (Turhan, 2023).

Gençlerin kırsal alanlarda kalmasını teşvik eden politikaların geliştirilmesi

Göçer hayvancılık, birçok yerel topluluğun kimliğinin önemli bir parçasıdır. Ancak, modernleşme ve şehirleşme ile genç nesillerin bu mesleği sürdürmemesi nedeniyle bu kültürel miras tehdit altındadır. Kırsal alanlardan kentlere göçü engelleme ve gizli işsizliği önleme, mevcut gıda sanayi sektörüne kaynak oluşturma ve insanların yeterli ve dengeli beslenmesini sağlama açısından küçükbaş hayvancılık vazgeçilmeyecek bir hayvancılık alanıdır (Çelik, 2016).

Devlet desteklerinin artırılması ve çiftçilerin ihtiyaçlarına uygun hale getirilmesi

Küçükbaş hayvan yetiştiriciliği, genellikle gelir düzeyinin düşük olduğu kırsal bölgelerde uygulandığı için ekonomik baskılar altındadır. Ürün fiyatlarındaki dalgalanmalar, hayvan bakım maliyetleri ve pazar fiyatları üzerindeki belirsizlikler, yetiştiricileri zor durumda bırakabilmektedir. Arazilerin tarım dışı kullanımı, otlatma alanları üzerindeki sınırlamalar ve izin süreçleri, göçer hayvan yetiştiricileri için engeller oluşturabilir. Yem üretimi teşviki (%22,8), yetiştiricinin yemi kendi üretmesi (%22,4) ve yöreye uygun barınak yapımı ile ilgili eğitim ve desteğin devlet tarafından sağlanmasının (%16,4) koyunculüğün sürdürülebilirliği açısından ilk çözülmesi gereken hususlar olarak bildirilmiştir (Karadaş, 2017). Genç yetiştiricilere yönelik teşviklerin oluşturulması küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinin devamlılığı açısından önemlidir (Bakır ve Mikail, 2019; Tozlu Çelik ve Tüfekci, 2024).

Damızlık temini sorunu çözümüne yönelik damızlık istasyonlarının kurulması gerekmektedir. Halk elinde ıslah projeleri ve kayıt sistemleri daha geniş sürülere uygulanmalıdır. Damızlık koç ve teke üretimi yapan işletmeler desteklenmelidir. Doğum, büyüme ve verim kayıtlarının düzenli tutulması sağlanmalıdır. Birlikler aracılığıyla damızlık dağıtımı ve genetik materyal paylaşımı yapılabilir. Yetiştiricilere seleksiyon, kayıt tutma ve damızlık seçimi konusunda eğitim verilmelidir.

Çiftçilere yönelik eğitim programlarının artırılması ve Hayvan sağlığı hizmetlerinin geliştirilmesi ve erişilebilir hale getirilmesi

Sürü yönetimi, aşılama ve parazit kontrolü, elde edilen ürünlerin değerlendirilmesi, yem üretimi konularında eğitimler verilmesi göçer koyun ve keçi yetiştiriciliğinin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Bölgesel eğitim alanları ve örnek işletmeler oluşturularak küçükbaş hayvanlardan elde edilen ürünlerin kaliteli ürün olarak üretilmesi sağlanabilir. Bu yönüyle sağlıklı ve kaliteli gıda arayışında olan insanlara değer fiyatla satılması sağlanarak yetiştirici daha fazla gelir elde edebilir. Tarımsal ürün artıklarının yem üretiminde kullanımı ve yeni alternatif kaynakların geliştirilmesi için bilimsel çalışmalar yapılmalıdır.

Sonuç olarak, göçer küçükbaş hayvan yetiştiricileri, çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalmakta olup, bu durum dünya genelinde ve Türkiye de hem ekonomik hem de kültürel açıdan önemli etkiler yaratmaktadır. Sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi ve bu toplulukların desteklenmesi, hayvancılığın geleceği için kritik öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

1. Arıtunca, D., Karabacak, A. 2020. Konya Merkez İlçelerinde Koyunculuk İşletmelerinin Durumu Journal of Bahri Dagdas Animal Research 9 (1):13-24.
2. Ayan, S., Yılmaz, A. 2024. A Study on the Technical and Structural Characteristics of Nomadic Sheep Breeding Enterprises: Diyarbakır Province Example. Journal of Animal Production, 65 (2): 161-171. <https://doi.org/10.29185/hayuretim.1510724>
3. Aydın, M.K., Keskin, M., 2018. Muğla ilinde küçükbaş hayvan yetiştiriciliğinin yapısal özellikleri. Mediterranean Agricultural Sciences, 31(3): 317-323. <https://doi.org/10.29136/mediterranean.428577>
4. Bakır, G., Mikail, N. 2019. Siirt İlindeki Küçükbaş Hayvancılık İşletmelerinin Yapısal Durumu. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg., 50 (1): 66-74.
5. Bakır, G., Mikail, N., Baygeldi, S. 2017. Siirt İli Küçükbaş Hayvan İşletmelerinde Barınakların Mevcut Durumu. Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi, 4(3): 241-250. <https://doi.org/10.19159/tutad.304165>
6. Bozkurt, Z., Gücüyener Hacan, Ö., Koçak, S., Çelikeloğlu, K., Tekerli, M., Erdoğan, M. 2023. Impact of Farm-Scale on Animal Management Practices in Pırlak Sheep Enterprises. Kocatepe Vet J., 16(1): 57-69.
7. Cagay, A., Ceyhan, B., Şimşek, Ö. 2024. Çanakkale İli Yenice İlçesi Davutköy ve Torhasan Göletleri Yakın Çevresinde Fotokapan Yöntemi İle Tespit Edilen Memeli Yaban Hayvanları. 2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies. April 18-19, 2024, Konya, Turkey.
8. Çelik, H. T., 2016. Ordu İli Küçükbaş Hayvancılığının Mevcut Durumu, Sorunları ve Çözüm Önerileri. Türk Tarım –Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(5):345-351. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i5.345-351.586>
9. Gökmener, H., Öztürk, A. 2022. Erzurum İli Uzundere İlçesinde Küçükbaş Hayvancılık Faaliyetleri ve Genel Sorunlar. Journal of Bahri Dagdas Animal Research 11 (1): 21-29.
10. Gürer, B., Ulutaş, Z. 2021. TR71 Bölgesinde İşletmelerin Koyun Yetiştiriciliği Faaliyetine Devam Etme Olasılığını Etkileyen Faktörlerin Analizi. Anadolu Tarım Bilim. Derg./Anadolu J Agr Sci, 36: 63-72. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.773460>
11. Karadaş, K. 2017. Şanlıurfa İlinde Koyunculuk İşletmelerinin Sosyo-Ekonomik Durumu: Siverek İlçesi Örneği. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7 (2):268-279. <https://dx.doi.org/10.17714/gufbed.2017.07.017>

12. Karadaş, K. 2018. Koyunculuk İşletmelerinin Sosyo-Ekonomik Durumu; Hakkâri İli Örneği. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg., 49 (1): 29-35. <https://doi.org/10.17097/ataunizfd.322684>
13. Ölmez, B., Yasin Demirbaş, Y. 2024. Türkiye'deki Canis lupus (Gri Kurt)'un Dağılımı ve Genetik Yapısı. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 16(2): 585-589.
14. Savaş, İ., Yılmaz, İ., Yanar, M. 2019. Iğdır İlinde Göçer Hayvancılık ve Bazı Yapısal Özellikleri. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(1): 552-561. <https://doi.org/10.21597/jist.481724>
15. Savaş, İ., Yılmaz, İ., Yanar, M. 2019. Göçer Hayvancılıkta Küçükbaş Hayvanlarda Karşılaşılan bazı sağlık Problemleri. Journal of Agriculture, 2(1), 22-29.
16. Serttaş, İ., Akbaş, A.A., Sarı, M. 2022. Afyonkarahisar İli Hocalar İlçesindeki Küçükbaş Hayvancılık İşletmelerinin Mevcut Durumunun Belirlenmesi. MAE Vet Fak Derg, 7 (1): 34-42. <https://doi.org/10.24880/maeuvsfd.1003515>
17. Shiels, D., Loughrey, J., Dwyer, C.M., Hanrahan, K., Mee, J.F., Keady, T.W.J. 2022. A Survey of Farm Management Practices Relating to the Risk Factors, Prevalence, and Causes of Lamb Mortality in Ireland. Animals, 12, 30. <https://doi.org/10.3390/ani12010030>
18. Taşkın, T., Koşum, N., Engindeniz, S., Savran, A. F., Aktürk., D., Kesenkaş, H., Uzmay, A., Gökmen, M. 2017. İzmir, Çanakkale ve Balıkesir İlleri Keçi İşletmelerinde Sürü Yönetim Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg., 54 (3):341-349.
19. Tozlu Çelik H, Aslan FA, Us Altay D, Kahveci ME, Konanc, K, Noyan T, Ayhan, S. 2021. Effects of Transport and Altitude on Hormones and Oxidative Stress Parameters in Sheep. PLoS ONE 16(2), e0244911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244911>
20. Tozlu Çelik, H., Tüfekci, H. 2024. Socio-Economic Structure, Production Practices, Observations and Suggestions in Nomadic Sheep Production in Ordu province located in Black Sea Region of Türkiye. Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences, 14(1), 1-10. <https://doi.org/10.53518/mjavl.1346869>
21. Turhan, İ. 2023. Konya İli Meram İlçesinde kıl Keçi Yetiştiriciliğinin Sürdürülebilirliğinin İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, zootekni Anabilim Dalı, Haziran, S:56. Konya.

22. Tüfekci, H., 2020. Yozgat İli Küçükbaş Hayvan Yetiştiriciliğinin Yapısal Durumu ve Geliştirme Olanaklarının Belirlenmesi. *J. Anim. Prod.*, 2020, 61 (1): 91-100, <https://doi.org/10.29185/hayuretim.663273>
23. Tüik, 2025. 2024 yılı Bölgeler Bazında Koyun ve Keçi Sayısı. Erişim adresi:<https://biruni.tuik.gov.tr/bolgeselististik/degiskenlerUzerindenSorgula.do#> Erişim tarihi:05.07.2025
24. Tüney Bebek, D., Keskin, M. 2018. Mersin İlinde Koyun Yetiştiriciliğinin Mevcut Durumu Bazı Verim ve Yapısal Özellikleri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 23(2):315-323.
25. Yazıcı, M. 2016a. Göçerlerde toplumsal yapı ve çöküş üzerine kuramsal bir değerlendirme. *Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, 26(1): 191-208.
26. Yazıcı, M. 2016b. Modern göçerlik. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(56): 235-252.
27. Yıldırım, S., İmik, H., Günlü, A. 2021. Bitlis ili Mutki ilçesinde koyun keçi yetiştiren işletmelerin temel hayvan besleme bilgi düzeylerinin araştırılması. *MAE Vet Fak Derg*, 6(2): 48-56. <https://doi.org/10.24880/maevfd.888022>
28. Yıldız, A., Aygün, T., 2021. Van ili Merkez ilçede küçükbaş hayvancılık faaliyetleri ve genel sorunlar: I. İşletmelerin yapısal özellikleri, *Journal of Animal Science and Products (JASP)* 4(1): 23-36. <https://doi.org/10.51970/jasp.891211>
29. Yılmaz, İ., Savaş, İ., Yanar, M. 2020. Göçer Ailelerin Hayvancılıkta Sürü Yönetimi ve Yayılcılık Faaliyetleri: Türkiye, Iğdır İli Örneği. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 7(1): 34-40. <https://doi.org/10.19159/tutad.644592>
30. Yılmaz, O., Karaca, O., İnce, D., Cemal, İ., Yaralı, E., Varol, M., Sevim, S. 2014. Batı Anadolu göçer koyuncululuğu ve ıslah planlamalarındaki rolü. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(2): 89-97.

5. Bölüm

Canlılarda Fenotipik Ortalama ve Genotipik Değer İlişkisi

Saim BOZTEPE¹, Uğur ZÜLKADİR²

GİRİŞ

Birçok durumda araştırmacılar araştırdıkları ya da çalıştıkları konuyla alakalı çok temel bazı kavramlar ya da yöntemleri bilmeden uygulamakta ve sonuçlar elde etmektedirler. Örneğin DNA polimorfizmi çalışan bir araştırmacı gen ve genotip frekansları, heterozigotluk oranı gibi çok temel hesaplamaların nasıl yapıldığını bilmeden verileri popgen benzeri bilgisayar paket programına yükleyerek sonuca ulaşmaktadırlar. Yine birçok araştırmacı $p < 0.05$ ya da $p < 0.01$ ' in ne anlama geldiğini, bunun neyi ifade ettiğini bilmeden yorum ve değerlendirmeler yapabilmektedirler. Bu örnekleri çoğaltmak mümkündür. Genellikle de bu değerlendirmeler daha önceki yapılmış araştırmaların/yayınların sonucunu taklit etmek şeklinde olmakta, araştırmacı kendi özgün yorumunu ortaya koyamamaktadır.

Bunun gibi, canlılarla çalışanlar ve özellikle de hayvancılıkla ilgili araştırmalar yapan araştırmacılar genellikle çevre faktörlerinin etkilerini araştırmaktadırlar. Bu bir hayvan besleme çalışmasında bazı minerallerin, vitaminlerin, enzimlerin ya da yem katkılarının farklı seviyelerinin performans etkileri şeklinde olabileceği gibi bazen de mesela doğum ağırlığı, süten kesim ağırlığı, canlı ağırlık, süt verimi, döl verimi benzeri ekonomik olarak önemli bazı verimlere bazı çevre faktörlerinin (cinsiyet, yaş, yıl, laktasyon sırası, canlı ağırlık vs) etkilerini araştırmak şeklinde olabilmektedir. Bütün bu çalışmalarda $Y_{ijk} = m + a_i + b_j + e_{ijk}$ gibi istatistik modeller oluşturulmakta ve istatistik analizler de bu modele göre yapılmaktadır. Kalitatif ve kantitatif bir özelliğin ortaya çıkmasındaysa fenotip; genotiple çevrenin ortaklaşa (oranlar özellikle kantitatif fenotiplerde değişebilir) etkisi sonucu tezahür etmektedir. Bu ifade, $P = G + E$ eşitliğinin varlığı ile bilinen bilimsel mutlak bir gerçektir. Yukarıda da ifade edildiği gibi araştırmacılar genellikle çevre şartlarının etkilerini araştırmaktadırlar. Y_{ijk} denkleminde genotipi hangi unsur temsil etmektedir? Ya da Y_{ijk} , fenotip yani $P = G + E$ denklemindeki P ' yi temsil ediyorsa, Y_{ijk} denkleminde hangi eleman P denklemindeki G ' ye karşılık gelmektedir? Bu çalışmanın amacı tam olarak bunu ortaya koymak ve araştırmacıları yaptıkları

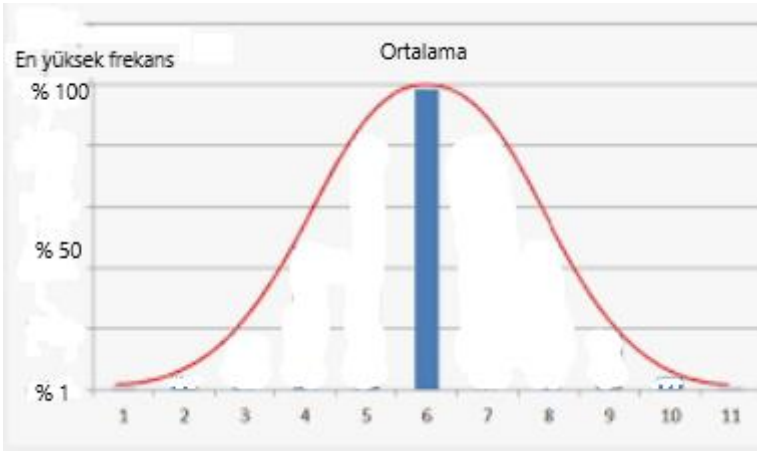
¹ Prof. Dr. Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootehni Bölümü, Kampüs/KONYA
ORCID: 0000-0003-1096-9141

² Prof. Dr. Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootehni Bölümü, Kampüs/KONYA
ORCID:0000-0003-3243-4949

analizlerle ilgili bu konuda bilgilendirmektir. Konunun daha anlaşılabilir olması için aşağıda ortalama nedir? Kalitatif ve kantitatif fenotiplerin kalıtımı nedir ve hangi faktörler etkilidir? İstatistik analizler gibi bazı konular hakkında hatırlatıcı mahiyette bilgilere yer verilecektir.

Ortalama nedir?

Sıklıkla ortalama nedir? sorusuna, varyantların toplamının varyant sayısına bölünmesiyle bulunan değer diye cevap verilir. Oysa bu aritmetik ortalamanın ya da kısaca ortalamanın hesaplanma yöntemidir. Ortalama; bir grup için temsilci olabilecek değerdir. Ortalamada çevre faktörlerinin etkisi yoktur. Kantitatif özellikler, etkileri çok küçük ancak birbiri üzerine toplanabilir çok sayıda genler (poligen) marifetiyle ortaya çıkar, bunlara eklemeli genler de denir ve genellikle bu özellikler çan eğrisi şeklinde bir dağılım gösterir. Çan eğrisi şeklindeki bir dağılımda eğrinin pik ya da tam orta noktası ortalamayı temsil eder. Eğrinin eğrilen kısımları çevre faktörlerinin etkisi ile varyantların sağa ya da sola doğru ortalamadan uzaklaşmasına neden olur. Bir başka ifade ile çevre faktörleri etkisiz olsaydı bütün varyantlar aynı değere yani ortalamaya sahip olacaktı. Varyantlar ya da rakamlar ortalama etrafında toplanma eğilimindedirler. Yani ortalamaya yaklaştıkça söz konusu varyantların frekansları da artar. En yüksek frekans da ortalamaya karşılık gelir. Eksisi ya da artı tarfta en uç değerlerin frekansı en düşüktür (Şekil 1).

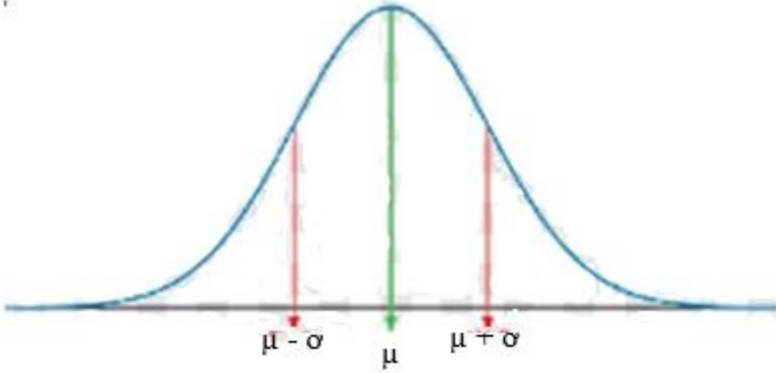


Şekil 1. Çan eğrisi grafiği

Burada da eğrilerle uğraşanlara hatırlatmak gerekir ki mesela çan eğrisi çizildiği zaman genellikle Y eksenini üzerindeki frekans işaretlenmez, buna karşılık orada var

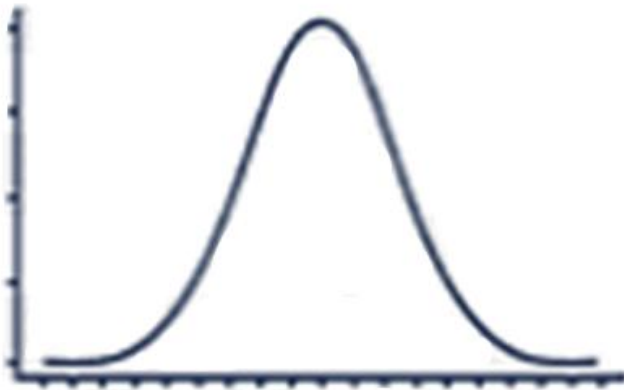
olan ancak görünmeyen bir ordinat yani Y eksenini vardır. Konuyla yüzeysel olarak ilgilenenler genellikle bu bilgiden yoksundurlar.

Yukarıda da ifade edildiği gibi varyantlar ortalamadan çevre faktörlerinin etkisi ile sağa ya da sola doğru sapma gösterirler. Bunun ölçüsü standart sapmadır (Şekil 2).

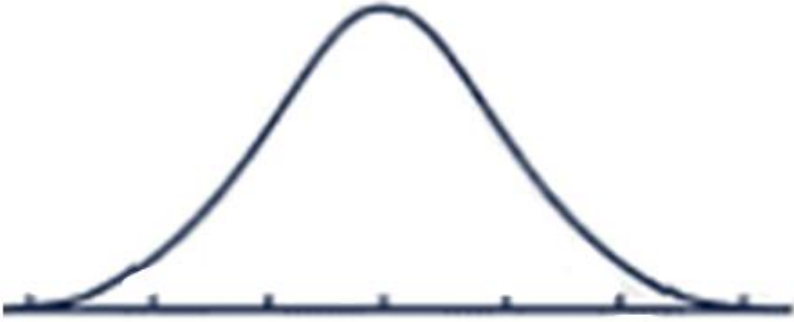


Şekil 2. Ortalamadan standart sapma (σ) kadar ayrılışlar

Bilindiği gibi herhangi bir özellik bakımından bireylerin sahip oldukları değerlerin farklılık göstermeleri varyasyon olarak tanımlanır ve bunun somut ölçüsü varyanstır. Varyansın karekökü de standart sapma olarak adlandırılır. Çevre faktörlerinin etkisi ile standart sapma büyüdükçe varyantların ortalamadan uzaklaşmaları da o denli büyük ve eğik, standart sapma küçüldükçe de ortalamadan sapma o denli azalacak, varyantlar ortalamaya yaklaşacak, aynı zamanda dağılım da dikleşecektir. Populasyonu temsil ettiğine inanılan örneklerde dağılım normal yani çan eğrisi şeklinde olmaktadır.



Şekil 3. Diklik durumu



Şekil 4. Yatıklık durumu

Standart sapmanın varyant sayısının kareköküne bölünmesiyle bulunan standart hata ise popülasyona ait parametrelerin en az hatayla tahmin edilebilmesine imkan verir. Ne var ki standart hata büyüdükçe parametreyi tahmindeki isabet azalır aksine standart hata küçüldükçe parametrenin tahminindeki isabet artar. Örneğin, örneklere ait dağılımların çok eğik veya çok dik olması popülasyonu temsil etmediği sonucunu doğurmaktadır.

İstatistik Modeller

İstatistik modellerin matematik modellerden farkı hata ihtiva etmesidir. Matematik modellerin hatası olmaz. Ancak çevre faktörlerinin araştırıldığı çalışmalarda araştırmacılar zaman zaman istatistik model yerine matematik model ifadesini kullanmaktadırlar. Aşağıda, $P = G + E$ eşitliği ile $Y_{ijk} = m + a_i + b_j + e_{ijk}$ şeklinde ifade edilen denklemler arasındaki ilişkiler açıklanan Y_{ijk} gibi ele alınan istatistik modellerin açıklanmasında genellikle beklenen ortalama veya sürünün ortalaması şeklinde ifade edilen m ' nin aslında genotipe yani $P = G + E$ eşitliğindeki birinci terime (G) karşılık geldiği anlatılacaktır.

Canlılarla uğraşanların üzerinde durdukları bazı özellikler vardır. Bütün bu özelliklerin ortaya çıkması genotipe bağlıdır. Çok basit bir denklem olan ve aynı zamanda canlılarla çalışanların ve zootekninin de alfabesi sayılabilecek $P = G + E$ eşitliğinden de anlaşılacağı gibi fenotip, kantitatif özelliklerde genotiple çevrenin ortaklaşa etkisi ile ortaya çıkar. Bir özellik bakımından bireyler arasında gözlenen varyasyonda (farklılıkta) genotipin ya da çevrenin payları özellikten özelliğe değişiklik gösterir. Mesela döl verimi bakımından bireyler (hayvanlar) arasındaki farklılıklarda genotipin payı çok düşüktür (0.05 – 0.10 arasındadır). Bu döl verimini ortaya çıkmasında genotipin rolünün az olması anlamına gelmez. Döl veriminin ortaya çıkması da mutlak olarak genotipe bağlıdır, varyasyonun azlığı ise döl verimi bakımından bütün bireylerin (hayvanların) genotipinin büyük ölçüde

aynı/benzer olmasındandır. Çünkü hayvanlar ya da diğer bütün canlılarda neslin devamı için genotiplerin birbirine benzer ya da aynı olması gerekir. Mesela koyunlarda yapağı verimi bakımından gözlenen farklılıkta genotipin payı 0.4-0.5 gibi nispeten yüksek değerler alabilir. Çünkü koyunların hepsi aynı miktarda yapağı vermek zorunda değildir. Farklı miktarlarda yapağı verimleri söz konusuysa bu durumda hayvanların genotipleri de farklıdır. Elbette kantitatif bir özellik olması nedeniyle diğer özelliklerde olduğu gibi yapağı veriminde de hem genlerin sayıları (poligen) hem etkileri (dominanslık/resesiflik, eksik ya da üstün dominanslık,entermediyerlik, genler arası interaksiyonlar yani epistasi etkisi) hem de bu genlerin etkilerinin ortaya çıkmasında çevre faktörlerinin varyasyon oluşturma etkileri de farklıdır. Konunun daha iyi anlaşılması adına mesela süt verimine bakılabilir. Döl veriminde olduğu gibi doğuran tüm analar yavrularının hayatta kalabilmesi için süt vermek zorundadırlar. Her ana süt verir ancak miktarları arasında farklılıklar (varyasyonlar) mutlaka olacaktır. Bu farklılıklar süt verimi bakımından genotiplerin (döl veriminde olduğu gibi) çok benzer olmasını gerektirmez. Dolayısıyla süt verimi bakımından hayvanlar arasında gözlenen varyasyonda hayvanların genotiplerinin farklı olmasının payı 0.2-0.3 gibi yine düşüktür. Yukarıda ortalamada çevre faktörlerinin etkileri olmadığından bahsedilmişti. Hayvan ıslahında genotipik değer diye bir kavram vardır. Mesela sığırlarda kalitatif bir özellik olan boynuzsuzluğu (B) ve boynuzluluğu da (b) genleri temsil ediyor olsun. Harflerden de anlaşılacağı gibi boynuzsuzluk boynuzlu oluşa dominanttır. Bu gen çifti bakımından üç genotip kombinasyonu söz konusu olabilir ki bunlar BB, Bb ve bb' dir. BB ve Bb' genotiplerinin genotipik değeri boynuzsuzdur, bb'ninki de boynuzlu oluştur. Peki kantitatif özelliklerde genotipik değer nasıl tespit edilmektedir? Örneğin süt veriminin genotipik değeri nasıl bulunacaktır? Aynı çevre şartlarında yetiştirilen ineklerin süt verim ortalaması, bu sürünün o şartlardaki genotipik değeridir. Yani bu ortalamada çevre şartlarının etkisi yoktur ve bu özellik bakımından sürünün genotipini yansıtmaktadır.

Y_{ijk} Denklemine m ile P denklemindeki G' nin İlişkisi

Araştırmacılar genellikle araştırmanın başında aşağıdaki gibi bir denkleme göre çevre faktörlerinin etkilerini araştırırlar:

$Y_{ijk} = m + a_i + b_j + e_{ijk}$ (Bir araştırmada incelenen faktör sayısı daha fazla ve faktörler arasında interaksiyonlar da olabilir)

Tez ya da makalelerde, genellikle de denklemin unsurları aşağıdaki gibi açıklanmaktadır:

Y_{ijk}: (mesela) i. cinsiyetten j. ana yaşından k. kuzunun doğum ya da süttten kesim ağırlığı,

m: sürünün doğum ya da süttten kesim ağırlığı için beklenen ortalaması,
a_i: i. cinsiyetin doğum / süttten kesim ağırlığı üzerine etki miktarı,
b_j: j. ana yaşının doğum / ya da süttten kesim ağırlığı üzerine etki miktarı,
e_{ijk}: i. cinsiyetten j. ana yaşından k. kuzunun doğum / süttten kesim ağırlığına ait hata etki miktarı (ele alınmayan /alınamayan tüm faktörlerin etki miktarı) şeklindedir.

Genellikle varyans analizi tabloları oluşturulurken genel, gruplar (mesela, cinsiyetler ya da ana yaşları) arası ve gruplar içi ya da hata olarak da adlandırılan bir gruplandırma yapılır. Analiz sonuçlarına göre gerekli değerlendirmeler yapılarak faktör ya da faktörlerin etkili olup olmadığına karar verilir. İşte bu tablolardaki gruplar içi ya da hata olarak karşımıza çıkan varyasyon kaynağı aslında denklemden e_{ijk} olarak eklenen unsurla aynı şeydir, yani bu kaynak ele alınmayan/alınamayan diğer faktörlere aittir.

Makalenin baş kısmında $P = G + E$ eşitliği görülebilir. Y_{ijk} denkleminde; a_i, b_j ve e_{ijk} terimleri çevre faktörlerine aittir. Bu eşitlikte (G) ile ilgili unsuru da yukarıda yapılan tarif gereği aynı çevre şartlarında üzerinde durulan özellik bakımından fenotipik ortalama, o sürünün o özellik bakımından genotipik değeridir açıklamasından hareketle denklemin (Y_{ijk}) en başında bulunan (m) terimi temsil etmektedir. Yani (m)' den + veya - yönde değişiklikler çevre faktörlerinin etkisiyle gerçekleşmektedir. Kısaca Y_{ijk} eşitliğindeki (m), $P = G + E$ eşitliğindeki (G)' yi temsil etmektedir.

Kısa bir örnekle konunun daha iyi anlaşılması mümkün olacaktır.

Doğum ağırlıkları verilen kuzuların bir çevre faktörü olarak cinsiyet faktörüne ait etki miktarları ve etki payları hesaplanmak istenmektedir. Yani doğum ağırlıkları cinsiyet faktöründen etkilenmekte midir? Etkileniyorsa bunun etki miktarı ve payı ne kadardır? Bu amaçla 12 adet kuzuya ait elde edilen doğum ağırlığı değerleri cinsiyetlere göre aşağıdaki Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 12 adet kuzuya ait cinsiyetlere göre elde edilen doğum ağırlığı değerleri (kg)

Kuzular	1	2	3	4	5	6	Toplam
Erkek	4.5	5.0	5.0	4.0	5.0	3.5	27.0
Dişi	3.0	3.5	3.0	4.0	4.5	3.0	21.0

Genel olarak bu tip araştırmalarda aşağıdaki gibi bir modelin varlığı kabul edilmektedir:

$$Y_{ij} = m + a_i + e_{ij}$$

Çünkü doğum ağırlığına çok sayıdaki çevre faktörlerinden sadece cinsiyet faktörünün etkisi araştırılmaktadır. Eğer başka faktörlerde olsaydı onlar da b_j , c_k gibi faktör sayısına göre modele eklenecektir. Burada;

Y_{ij} = i. cinsiyetten j. kuzuya ait doğum ağırlığı,

m = genotipik değer (G) veya beklenen ortalama

a_i = i. cinsiyetin etki miktarı

e_{ij} = hata etki miktarını göstermektedir. Yani burada Y_{ij} = P'yi (fenotipi), m = G'yi (genotipik değer), $a_i + e_{ij}$ ise E'yi (ele alınabilen (cinsiyet) ve alınamayan diğer faktörleri) temsil etmektedir.

- Etki miktarı aşağıdaki gibi bulunur:
- Erkek kuzuların ortalaması (\bar{Y}_e) = $27.0/6 = 4.5$ kg
- Dişi kuzuların ortalaması $\bar{Y}_d = 21/6 = 3.5$ kg
- Genel ortalama $\bar{Y} = 27.0 + 21.0 = 48 / 12 = 4.0$ kg
- Erkeklerle ait etki miktarı (EM_e) = $\bar{Y}_e - \bar{Y} = 4.5 - 4.0 = 0.5$
- Dişilere ait etki miktarı (EM_d) = $\bar{Y}_d - \bar{Y} = 3.5 - 4.0 = - 0.5$
- Ortalamadan sapmaların toplamı sıfırdır ilkesinden hareketle;
- $EM_e + EM_d = 0$ dır.
- Bu sonuçlara göre genotipik değer yani denklemde m ile temsil edilen sürü ortalaması, cinsiyetten ve ele alınmayan/ alınamayan diğer faktörlerden etkilenmemektedir. Bu ortalamaya erkeklerle ait etki miktarı EM_e değerinin eklenmesiyle erkeklerin ortalaması, EM_d 'nin eklenmesiyle de dişilerin ortalaması bulunmaktadır.
- Etki payı aşağıdaki gibi bulunur: Çizelge 2'de varyans analiz tablosu verilmiştir.
- $GKT = GAKT + GİKT$ (Hata)
- $GKT = \sum x^2 - \sum (x)^2 / n = 199 - (48)^2 / 12 = 7$
- $GAKT = 27^2 + 21^2 / 6 - DT = 195 - 192 = 3$
- $GİKT = GKT - GAKT = 7 - 3 = 4$

Çizelge 2. Varyans analiz tablosu

VK	SD	KT	KO	VBU
Genel	11	7		
GA	1	3	3	= $\sigma^2_{iç} + n\sigma^2_{ara}$
Gİ (Hata)	10	4	0.4	= $\sigma^2_{iç}$

- Değerleri yerine koyarsak
- $3 = 0.4 + 6 * \sigma^2_{ara} = \sigma^2_{ara} = 0.433$

- $\Sigma^2_{\text{toplam}} = \sigma^2_{\text{ara}} + \sigma^2_{\text{iç}} = 0.433 + 0.4 = 0.833$
- $EP = \sigma^2_{\text{ara}} / \sigma^2_{\text{toplam}} = 0.433 / 0.833 = 0.5198 = 0.52'$ dir.
- Yani doğum ağırlığı bakımından kuzular arasında gözlenen varyasyona denklemdeki (m) yani genotipik değerın varyasyon oluşturma etkisi yoktur. Bununla birlikte gözlenen toplam varyasyonda cinsiyet faktöründen kaynaklanan varyasyonun payı % 52' dir. Geri kalan % 48' lik kısım ise modele dahil edilmeyen diğer faktörler tarafından oluşturulmaktadır.

Sonuç

Sonuç olarak, her iki denklemdeki terimler alt alta yazıldığında konu daha iyi anlaşılmiş olacaktır.

$$Y_{ijk} = m + (a_j + b_j + e_{ijk})$$



$$P = G + E$$

Bu konu şimdiye kadar yapılan araştırma, tez ya da makalelerde bu şekilde ele alınmamıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışma ve yorum olması bakımından hem istatistik hem hayvan ıslahı alanına önemli katkıları olacağı düşünülmektedir. Konuyu anlamadan yorum ve değerlendirmelerin yapıldığı bir benzer durum da korelasyon katsayısı ve onun önemlilik testlerinde ortaya çıkmaktadır. Bazı hallerde bazı araştırmacılar 0.1 ya da 0.2 gibi çok küçük korelasyon katsayılarının istatistik olarak önemli ($p < 0.05$ veya $p < 0.01$) bulunmasından herketle bu korelasyon katsayılarından yararlanılabileceği gibi anlamsız yorumlar yapabilmektedirler. Oysa korelasyonun ya da ilişkinin pozitif ya da negatif büyüklüğü ilişkinin çok kuvvetli olmasına işaret ederken, sıfıra yakın bulunan küçük korelasyonlar ilişkinin çok zayıf olduğunu yansıtmaktadır. Korelasyonun önemli çıkması ise bu korelasyonun ilgili özellikler arasında populyasyonda muhtemel korelasyon katsayılarından biri olmadığına işarettir.

Kaynaklar

- Düzgüneş, O., Kesici, T., and ve Gürbüz, F., 1983. İstatistik Metotları, A.Ü. Ziraat Fak. Yayınları, *Ankara*, 363s.
- Düzgüneş, O., Kesici, T., Kavuncu, O., ve Gürbüz, F., 1987. Araştırma Deneme Metotları (İstatistik Metotları II), Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, ANKARA.
- Düzgüneş, O., Eliçin, A., Akman, N., 1996. Hayvan Islahı, III. Baskı, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 1437, Ders Kitabı: 419, ANKARA.
- Boztepe, S., Keskin, İ., Zülkadir, U., & Aytekin, İ. (2022). Uygulamalı Hayvan Islahı. NEU Press, KONYA.
- Keskin, İ., Başpınar, E., Altay, Y., Mikail, N., 2023. Biyometri (RStudio Uygulamalı). NEU Press, KONYA.
- Doğan, Ş., Keskin, İ., Boztepe, S., 2024. Path (İz) Katsayısı (Excel ve Python Çözümlü). NEU Press, KONYA.
- Keskin, İ., Başpınar, E., Altay, Y., Mikail, N., 2025. Deneysel İstatistik Yöntemler (RStudio Uygulamalı). NEU Press, KONYA.

6. Bölüm

Ağır Metallerin Sucul Ekosisteme Girişi ve Etkileri

Zühal KARAMAN¹ Banu KUTLU²

Ekosistemde sürekli ve dengeli bir enerji döngüsü vardır. Ancak, artan nüfus ile ağır metal kirliliği, endüstrileşme, kentleşme, tarımsal faaliyetler, insan aktiviteleri, madencilik, atık sular, petrol türevleri, tarımsal gübreler, radyoaktivite ve pestisit gibi yapay süreçlerle birlikte, doğada rüzgârla savrulan tozlar, orman yangınları, volkanik faaliyetler, erozyon veya kaya ayrışması gibi doğal süreçler sonucu oluşan kirletici maddelerin doğrudan veya dolaylı olarak doğaya verilmesi doğanın dengesini hızla bozmaktadır. Temel ihtiyacımız olan su bu durumdan fazlasıyla etkilenmektedir. Çevre kirliliği hava, toprak ve suyun kirlenmesi olup, toprak ve havadaki kirleticiler de sonunda su ortamına karışarak su kirliliğine sebep olmaktadır. Çünkü toprağa ve havaya yayılan kirleticiler yağmur, sel gibi yollarla yer üstü ve yer altı sularına karışır ve suların sessiz bir şekilde kirlenmesine sebep olur. Su kirliliği, su kaynağının kimyasal, fiziksel, bakteriyolojik, radyoaktif özelliklerinin bozulmasıdır.

Ağır metal kirliliği veya toksisitesi olarak adlandırdığımız son yıllarda sularda miktarları artan bu metaller Civa (Hg), Mangan (Mn), Arsenik (As), Demir (Fe), Molibden (Mo), Bakır (Cu), Krom (Cr), Çinko (Zn), Kalay (Sn), Gümüş (Ag), Kadmiyum (Cd), Selenyum (Se), Kobalt (Co), Kurşun (Pb), Nikel (Ni) ve Titanyum (Ti)'dur. Bu elementlerin atom numaraları 20'den büyük olduğu için ağır metal olarak isimlendirilir ve periyodik sistemde yer alan geçiş elementleri olarak bilinir. Ağır metallerin oldukça düşük konsantrasyonu bile canlı organizmanın sağlıklı büyümesi ve gelişmesini engellemekle kalmayıp toksik etki ve birikim oluşturarak besin zincirinin diğer üyelerine de taşınabilmektedir. Bu elementler çeşitli yollarla akarsu, göl ve denizlere ulaşarak kirlilik meydana getirmektedir (Aktop ve Çağatay, 2020). Suya ulaşan bu metaller nedeniyle sucul organizmalar hem suda çözülmüş halde bulunan hem de tortularda biriken ağır metallere doğrudan maruz kalırlar.

Bu nedenle, sucul besin zincirinin üst basamaklarında yer alan balıklar, ağır metal birikiminin en yoğun görüldüğü canlı gruplarındandır ve sucul ekosistemlerde ağır metal birikiminin en iyi biyo göstergelerindedir. Su

¹ Dr., Fırat Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, 0000-0002-2499-7752

² Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler, 0000-00016348-2754

kalitesinin ve kirlilik düzeyinin değerlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Rauf ve ark., 2009). Ağır metaller solungaçlardan difüzyonla veya sindirim sistemi yoluyla emilerek balık vücudunda farklı organlarda depolanabilir. İnsanlar, balıklar gibi yüksek trofik düzeylerdeki canlıları tüketen omnivor türler olduklarından, ağır metallerle kirlenmiş sucul organizmalar ve bitkiler yoluyla bu toksik elementlere dolaylı biçimde maruz kalırlar. Böylece ağır metaller, biyobüyütme (biyomagnifikasyon) yoluyla besin zinciri boyunca taşınarak nihai olarak insan vücudunda birikir. Bu durum, özellikle balık tüketimi yoluyla ağır metal maruziyetinin küresel halk sağlığı açısından risk oluşturmasına neden olmaktadır. Ağır metal kirliliği, balık popülasyonlarının sürdürülebilirliği ve insan sağlığı açısından kritik bir küresel sorun haline gelmiştir. Bu nedenle endüstriyel deşarjların kontrolü, sucul ekosistemlerin düzenli izlenmesi ve balık türlerinde metal birikiminin periyodik olarak ölçülmesi gereklidir. Ayrıca biyosorpsiyon, fitoremediasyon ve nanoteknolojik filtrasyon sistemleri gibi çevreci yöntemlerin yaygınlaştırılması, ağır metal gideriminde etkili stratejiler sunmaktadır (Yin ve ark., 2023). Uzun vadede, ekosistem temelli yaklaşımlar ve kamu farkındalığının artırılması hem su kaynaklarının hem de balık stoklarının sürdürülebilir yönetimi için hayati önem taşımaktadır.

Ağır metaller su ortamına hem noktasal hem de noktasal olmayan kaynaklardan ulaşmaktadır. Noktasal kaynaklar, boşalım yeri ve miktarı belirlenebilen atık kaynaklar iken, noktasal olmayan kaynaklar, kaynağı ve taşınım miktarı tam olarak belirlenemeyen yaygın kirletici girdileridir (Taylan ve Böke Özkoç, 2007). Noktasal olmayan kaynaklardan gelen kirleticilerin yoğunluğu ve zamansal değişimi genellikle mevsim, yağış, yüzey akışı ve erozyon süreçlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Landis ve ark., 1999). Bazı araştırmacılar, kaza sonucu dökülmelerin noktasal olmayan kirleticiler arasında değerlendirilse de belirli bir bölgeden kaynaklandıkları durumlarda noktasal kirleticiler olarak da sınıflandırılabilceğini belirtmektedir. Sucul ortamlara taşınan ağır metallerin bir kısmı sudaki partiküllere tutunarak sediment tabakasına çöker. Bu sedimentler zamanla ağır metal bakımından doymuş hale geldiğinde, fiziksel veya kimyasal koşulların (pH, redoks potansiyeli) değişmesiyle metaller tekrar çözünerek suya karışır ve yeniden biyolojik dolaşıma girer (Şener, 2015). Sediment hem ağır metallerin depolandığı hem de balıkların beslenme ve üreme alanı olduğu için, burada biriken kirleticiler besin zincirinin ilk halkasından itibaren taşınır (Başaran, 2010).

Balıklar bu metalleri solungaçlar, deri ve sindirim sistemi yoluyla bünyelerine alırlar. Sediment kökenli besinlerle beslenen bentik balık türlerinde (ör. *Cyprinus carpio*, *Silurus glanis*) karaciğer, böbrek ve solungaç dokularında yüksek metal birikimi gözlenmiştir (Giri ve ark., 2022). Uzun süreli maruziyet, oksidatif stres,

DNA hasarı, hormonal dengesizlikler ve üreme başarısında azalma gibi fizyolojik ve genetik etkilerle sonuçlanabilir (Kumar ve ark., 2022; Yılmaz ve ark., 2020). Bu nedenle sedimentteki metal yükü, sadece ekosistem kalitesi değil, balık biyolojik sağlığı ve gıda güvenliği açısından da kritik öneme sahiptir.

Sucul sistemlerde ağır metallerin taşınımı, birikimi ve biyoyararlanımı, fizikokimyasal koşullara, organik madde içeriğine ve trofik yapıya bağlı olarak değişmektedir. Sediment, su ve balık dokusu arasındaki bu dinamik ilişki, ağır metal kirliliğinin izlenmesinde çok boyutlu değerlendirmeleri zorunlu kılar. Balıklarda tespit edilen metal konsantrasyonlarının artışı, su kaynaklarının ekolojik bütünlüğü kadar insan sağlığı açısından da doğrudan risk oluşturur (FAO/WHO, 2021; Wang ve ark., 2023). Bu nedenle izleme çalışmalarında sediment, su ve balık örneklerinin birlikte değerlendirilmesi, ekosistem temelli su yönetimi için büyük önem taşımaktadır.

Ototrofik organizmalar, sucul ekosistemlerde ağır metal döngüsünün başlangıç halkasını oluşturur. Bu canlılar, metalleri doğrudan sudan çözülmüş iyonlar şeklinde alır ve hücresel yapılarda depolar. *Thiobacillus ferrooxidans* ve *Acidithiobacillus ferrooxidans* gibi bazı bakteriler metalleri doğrudan metal sülfür bileşiklerinden çözerek enerji üretiminde kullanırlar. Diğer bazı bakteriler *Ferrobacillus ferrooxidans* gibi metalleri enerji kaynağı olarak kullanarak Fe^{+2}/Fe^{+3} oksidasyon-redüksiyon döngüsünü sürdürürler (Förstner ve Wittmann, 1983; Das ve ark., 2022). Bu nedenle bakteriler hem biyolojik bir artııcı hem de ağır metallerin biyosferdeki dönüşümünde önemli bir biyokimyasal araçtır.

Ağır Metallerin Sudaki Birikimi ve Zehirli ağır metaller

Tüm ağır metaller kaçınılmaz bir şekilde toksiktirler. Ağır metaller su ortamına doğal ve antropojenik kaynaklar aracılığıyla girer. Akarsuların döküldüğü kıyı kesimlerde, maden ocakları ve endüstriyel bölgelere yakın bulunan doğal göl, gölet ve akarsular da, yetersiz arıtma nedeniyle yüzey sularına deşarj edilen atık sular diğer bölgelere oranla daha fazla ağır metal içermektedir. Su standartları, Dünya Sağlık Örgütü, Avrupa Birliği ve Türkiye Standartlar Enstitüsü tarafından belirlenen kriterlerce çeşitlilik göstermektedir. Su kalite parametreleri inceleneceği zaman, fiziksel ve kimyasal parametre olarak suyun sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen, oksijen doygunluğu, klorür iyonu, sülfat iyonu, amonyum azotu, nitrit azotu, nitrat azotu, toplam fosfor, toplam çözülmüş madde, renk, sodyum değerleri önemliken, yüzey suları kalite standartları inorganik parametreleri ise civa, kadmiyum, kurşun, arsenik, bakır, krom, kobalt, nikel, çinko, siyanür, florür, sülfür, demir, mangan, bor, selenyum, baryum, alüminyumdur.

Fitoplankton ve Alglerde Metal Alımı

Fitoplanktonlar, sucul ekosistemlerin temel üreticileridir ve ağır metallerin biyolojik döngüye girişinde kritik bir rol oynarlar. Ağır metaller, genellikle çözülmüş iyonlar olarak fitoplankton hücre zarındaki negatif yüklü fonksiyonel gruplara bağlanır (Rao, 1986; Mehta ve Gaur, 2005). Bu süreç biyosorpsiyon olarak adlandırılır. Metal iyonları öncelikle hücre yüzeyine tutunur, ardından hücre içine taşınarak biyokimyasal kompleksler hâlinde depolanır (Andrade ve ark., 2005). Özellikle Cu (Bakır), Zn (Çinko), Ni (Nikel), Cd (Kadmiyum) ve Pb (Kurşun) gibi metaller, alg hücre yüzeyinde karboksil, hidroksil ve fosfat gruplarıyla bağ oluşturur (Alipour ve ark., 2022).

Mavi-Yeşil Algler ve Metal Birikimi

Cyanobacteria (mavi-yeşil algler), ağır metalleri müsilaj tabakalarında tutarak çevresel toksisiteden korunurlar. Metal iyonlarının bu organizmalarda birikebilmesi için çözünür formda olması gerekir. Bu nedenle suyun pH'ı, iyonik gücü ve sıcaklığı metal biyoyararlanımı üzerinde belirleyicidir (Förstner ve Wittmann, 1983; Xu ve ark., 2023). Cyanobacteria ayrıca bazı metalleri metallothionein benzeri proteinlerle bağlayarak hücre içi detoksifikasyon gerçekleştirirler.

Fitoplankton ve Makroalglerin Biyoindikatör Rolü

Fitoplanktonlar kısa ömürlü canlılar olduklarından, çevresel değişikliklere hızla tepki verirler. Bu özellikleri nedeniyle, ağır metal kirliliğinin biyolojik göstergeleri (biyoindikatörleri) olarak sıkça kullanılmaktadır (Aktar ve Cebe, 2010; Chen ve ark., 2023). Yapılan çalışmalar, besin açısından zenginleşmiş (ötrifikasyon) alanlarda fitoplanktonlarda Cd (Kadmiyum) ve Pb (Kurşun) birikiminin açık deniz örneklerine göre iki kat daha fazla olduğunu göstermiştir (Knauer ve Martin, 1973; Martin ve Broenkow, 1975). Benzer şekilde, Monterey Körfezi (Kaliforniya) diatomlarında, antropojenik girdilerin yüksek olduğu kıyı bölgelerinde Cd konsantrasyonlarının belirgin biçimde arttığı bildirilmiştir (Rahman ve ark., 2012).

Makroalglerde Metal Konsantrasyonları

Makroalgler (örneğin *Cladophora glomerata*, *Fontinalis antipyretica*, *Ulva lactuca*), fitoplanktonlara göre daha uzun ömürlü olduklarından, sucul sistemlerdeki uzun dönemli metal birikim süreçlerinin göstergeleri olarak kabul edilirler (Bryan, 1971; Chmielewska ve Medved, 2001). Türkiye'de Kızılırmak Nehri boyunca yapılan bir çalışmada, *Cladophora glomerata* örneklerinde endüstriyel bölgelere yakın alanlarda Cr (Krom), Fe (Demir), Ni (Nikel), Cu

(Bakır), Zn (Çinko), Cd (Kadmiyum) ve Pb (Kurşun) konsantrasyonlarının yüksek olduğu rapor edilmiştir (Gündoğan ve ark., 2005). Tuna Nehri'nde yapılan benzer bir araştırmada, rafineri atık sularının karıştığı bölgelerde Ni (Nikel), Cr (Krom), Cd (Kadmiyum) ve Pb (Kurşun) seviyelerinin doğal alanlara göre birkaç kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Chmielewska ve Medved, 2001).

Almanya'daki Elsenz ve Ruhr Nehirlerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, *Fontinalis antipyretica* türünde 2180 ppm'e kadar Pb (Kurşun) birikimi belirlenmiş, bu da su yosunlarının ağır metal kirliliği göstergesi olarak kullanılabilirliğini desteklemiştir (Dietz, 1972; Heydt, 1977). Yeni Zelanda'da *Nitella hookeri* türü üzerinde yapılan çalışmalarda ise jeotermal suların etkisiyle alg dokularında arsenik birikiminin 10 kata kadar arttığı bildirilmiştir (Reay, 1972).

Son dönem araştırmalar, ototrofik organizmalardaki metal birikiminin yalnızca sucul sistemin alt trofik seviyelerinde kalmadığını, aynı zamanda balık ve omurgasız popülasyonlarında da birikime yol açarak tüm besin ağını etkilediğini göstermektedir (Xie ve ark., 2023). Bu organizmalar, sucul ortamlardaki ağır metal yükünün erken belirlenmesi için biyolojik sensör işlevi görmekte, böylece su kalitesi izleme çalışmalarında stratejik bir öneme sahip olmaktadır.

Balıklar, ağır metalleri dış ortamdan solungaçlar, besinler ve deri yoluyla alırlar (Ali ve ark., 2019; Briffa ve ark., 2020). Dış ortamdan alınan ağır metaller, taşıyıcı proteinlere bağlanarak kan dolaşımı aracılığıyla doku ve organlara taşınır, burada metallothionein gibi metal bağlayıcı proteinlere tutunarak yüksek oranlarda birikim gösterebilir (Youssef ve Tayel, 2004; Garai ve ark., 2021). Solungaçlar, geniş yüzey alanları ve yüksek geçirgenlikleri nedeniyle ağır metal alımında etkili organlardan biridir (Authman et al., 2015). Balıklar solunum sırasında sudaki çözülmüş oksijeni solungaç lamelleri aracılığıyla alırken, aynı zamanda sudaki metal iyonları da bu yapılar üzerinden vücuda geçer (Gheorghie ve ark., 2017). Lamellerle sürekli temas halinde bulunan solunum suyu, metal iyonlarının düzenli olarak balık vücuduna girişine neden olur (Malik ve Maurya, 2014). Balıklarda görülen ağır metal zehirlenmelerinin önemli bir kısmı ağız yoluyla alınan kirleticilerden kaynaklanır. Bu nedenle sindirim ve emilim süreçleri kritik öneme sahiptir. Ağız yoluyla alınan ağır metallerin büyük bölümü ince bağırsaklarda emilir ve daha sonra kan dolaşımı aracılığıyla farklı organlara taşınarak sistemik toksisite oluşturur. Toksik etkiler, maruz kalınan metalin miktarına, kimyasal formuna ve biyoyararlanımına göre değişir (Rahman ve ark., 2012; Has-Schön ve ark., 2006). Ayrıca balıkların derileri, suda çözülmüş metal

iyonlarıyla doğrudan temas halindedir ve bu durum deri yoluyla metal emilimini az da olsa arttırabilir (Gautam ve ark., 2016).

Metallerin Balık Tarafından Alınması ve Birikimi

Başta ağır metaller olmak üzere kalıcı hidrofobik kimyasalların sucul organizmalar tarafından alımı, kimyasalın özellikleri ile suyun fiziksel ve kimyasal niteliklerine bağlı olarak gerçekleşir. Bu maddeler, solungaç veya deri yoluyla doğrudan sudan, asılı partiküllerin yutulmasıyla ya da kontamine besinlerin tüketilmesi sonucu sindirim sistemi aracılığıyla organizmaya girebilir. Ağır metallerin en önemli giriş yolu solungaçlardır. Deri yoluyla alım ise genellikle ihmal edilebilecek düzeydedir.

Solungaçlardan Emilim

Balıklarda metal alımı, solungaçların sürekli olarak metal iyonlarını içeren bir çözeltide bulunması nedeniyle karasal hayvanlardan farklılık gösterir. Solungaçlar, çözülmüş metallerin başlıca giriş noktası ve aynı zamanda en önemli hedef dokulardır. Solungaçların temel görevi, sudaki düşük oksijen konsantrasyonuna rağmen oksijenin alınması ve karbondioksitin uzaklaştırılmasıdır. Ağız yoluyla alınan suyun içindeki oksijen, solungaçlardaki kılcıl damarlar aracılığıyla kana geçerken, çözülmüş ağır metaller de lameller üzerinden vücuda alınır. Solungaçlardan metal alımında üç temel mekanizma rol oynar;

- Metale özgü taşıyıcı proteinlerle taşınma,
- İyon taşıyıcılarıyla yer değiştirme,
- Basit difüzyon

Balıklar, memelilerin 1 litre havadan elde ettiği oksijen miktarını alabilmek için yaklaşık 20 litre suyu solungaçlarından geçirirler, bu durum metal geçişini ve alımını önemli ölçüde artırır.

Bağırsaklardan Emilim

Balıklarda sindirim sistemi, memelilerde olduğu gibi önemli bir metal emilim bölgesidir. Suyun sertliği ve tuzluluğu, bağırsaklardaki metal emilimini artırırken solungaçlarda gerçekleşen alımı azaltır. Deniz balıkları, yüksek miktarda su yuttukları için metallerin bağırsaklardan alımı yalnızca besinlerle değil, doğrudan su yoluyla da meydana gelir.

Metallerin organik formları (örneğin metil civa) yüksek lipofilik özellikleri nedeniyle hücre zarını kolaylaştırılmış difüzyonla geçebilir. Ancak mideye ulaşan

kadmiyumun (Cd) büyük kısmı epitel hücre yüzeyindeki mukusa bağlandığından genellikle emilmez.

Diğer Emilim Yolları

Diğer yollarla metal alımı genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte kadmiyumun az miktarda da olsa deri yoluyla alınabildiği bildirilmiştir. Ayrıca bazı metallerin çok düşük düzeylerde de olsa burun epitel yoluyla alındığı bilinmektedir.

Ağır Metaller ve Besin Zinciri Yoluyla Meydana Getirdikleri Sağlık Sorunları

Bazı ağır metaller, insan ve hayvan organizmaları için esansiyel elementler olup, uygun konsantrasyonlarda enzim aktiviteleri ve metabolik süreçler için gereklidir. Ancak bu metallerin doğal düzeylerin üzerine çıkması, enzim aktivitelerini inhibe ederek çeşitli biyokimyasal bozukluklara yol açabilir. Diğer taraftan, bazı ağır metaller organizmada hiçbir biyolojik işlevi bulunmamakla birlikte, belirli birikim düzeylerini aştıklarında ciddi toksik etkilere neden olurlar.

Bu nedenle Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) gibi uluslararası kuruluşlar tarafından ağır metallerin günlük veya haftalık kabul edilebilir alım miktarları (ADI/PTWI) belirlenmiştir. Aynı şekilde Türkiye’de de Türk Gıda Kodeksi kapsamında kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) ve civa (Hg) gibi metallerin gıdalardaki maksimum kalıntı limitleri yasal olarak sınırlandırılmıştır.

Toksik Etki Mekanizmaları

Ağır metallerin toksik etkileri, metalin kimyasal formuna ve hedef dokunun biyokimyasal özelliklerine bağlı olarak değişir. Tek bir enzim sistemini etkilemekle kalmayıp, genellikle birden fazla organ ve sistemi etkileyen geniş kapsamlı toksik etkilere neden olurlar.

Ağır metaller, dış ortamdan alındıktan sonra çoğunlukla taşıyıcı proteinlere bağlanarak kan dolaşımı yoluyla çeşitli depo bölgelerine veya dönüştürülmek üzere karaciğere taşınırlar. Karaciğer, bu metalleri biyotransformasyona uğratarak ya dokuda depolar, ya safra yoluyla dışarı atar ya da böbrekler aracılığıyla vücuttan uzaklaştırılmak üzere tekrar kana verir (Ali ve ark., 2019; Garai ve ark., 2021). Balıklarda ağır metallerin farklı dokularda birikim düzeyi, ortamda bulunan metalin derişimine, maruz kalma süresine, balığın yaşına, türüne, metabolik aktivitesine, gelişim evresine ve suyun fizikokimyasal özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Authman ve ark., 2015; Briffa ve ark., 2020).

Canlılar tarafından emilen ağır metaller genellikle pasif difüzyon yoluyla vücut sıvılarına geçer. Özellikle boşaltım sistemi yeterince gelişmemiş türlerde, bu metallerin böbrek ve karaciğer dokularında birikerek toksik etkilere yol açtığı belirlenmiştir (Malik ve Maurya, 2014; Gheorghe ve ark., 2017). Ağır metaller, dokularda doyma noktasına ulaşıncaya kadar depolanır, belirli bir eşiği aşmadığı sürece toksisite oluşturmaz. Ancak bu eşik aşıldığında, yüksek düzeylerde toksik etki gösterebilir.

Krom (Cr)

Cr, yer kabuğunda bol miktarda bulunan ve toksisitesi büyük ölçüde farklılık gösteren çeşitli formlarda bulunan temel bir eser elementtir. Bu element çevrede saf metal formunda bulunmaz, ancak iki değerlikli (Cr^{+2}), üç değerlikli (Cr^{+3}) veya altı değerlikli (Cr^{+6}) oksidasyon durumlarında bulunur. Bu farklı formlar arasında Cr^{+3} ve Cr^{+6} en kararlı formlardır. Cr^{+3} oksidasyon durumu, düşük membran geçirgenliği, aşındırıcı olmayan yapısı ve besin zincirindeki biyolojik büyütme minimum gücü nedeniyle daha az toksiktir. Cr^{+6} durumu, güçlü oksidatif potansiyeli ve hücre zarını geçme yeteneği nedeniyle daha toksiktir. Bir su ekosisteminde, krom toksisitesi, endüstriyel, kentsel ve tarımsal akıntıların su ortamına karışması gibi antropojenik kaynaklara bağlanabilir. Kromun su organizmaları üzerindeki toksisitesi yaş, gelişim evresi ve balık türleri arasında çeşitli biyotik faktörlere ve pH, sıcaklık ve suyun alkalinitesi gibi abiyotik faktörlere bağlıdır. Balıkların kroma ilk maruziyeti farklı davranış değişiklikleri, yani düzensiz yüzme, mukus akıntısı, vücut renginde değişiklik, iştahsızlık, beslenme bozukluğu, yüzgeç ışını erozyonu, ülserasyonlar, yumurtlamada azalma, testislerde deformasyon, sperm hareketliliğinde azalma ve oosit oluşumunu engelleyerek balıkların üremesinde karmaşıklıklara yol açar. Kromun biyolojik birikimi balıkların çeşitli dokularında farklı şekilde değişmektedir. En yüksek krom birikimi solungaçlarda, karaciğerde ve böbrekte bulunurken, kas dokusunda çok düşük konsantrasyonda bulunmaktadır (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar et al., 2022).

Çinko (Zn)

Çinko, her yerde bulunan bir eser element ve canlı organizmalar için temel mikro besinlerden biridir. Çinko, nükleik asitler ve protein sentezi, bağışıklık, enerji metabolizması, hücre bölünmesi ve vücut büyümesi gibi çeşitli metabolik reaksiyonlarda rol oynar. Metabolizma, sindirim, sinir fonksiyonu ve diğer süreçlere yardımcı olan birçok enzim için bir kofaktör görevi görür. Endüstriyel faaliyetler, madencilik, kömür ve atık malzemelerin yakılması, çelik işleme vb. gibi farklı antropojenik kaynaklar nedeniyle çevredeki çinko kirliliği artmaktadır.

Çinko toksisitesi de türe özgüdür ve balıkların farklı gelişim aşamalarına göre değişir. Çinkonun su hayvanları üzerindeki toksik etkisi, özellikle sıcaklık, su sertliği ve çözülmüş oksijen konsantrasyonu gibi çeşitli çevresel faktörlere bağlıdır. Çinko, balıkların büyümesinde ve üremesinde önemli bir rol oynayan temel bir mikro besindir. Ancak aşırı miktarda Çinko'nun balıklar üzerinde çeşitli tehlikeli etkileri vardır. Akut toksik çinko konsantrasyonunda, solungaç dokusunu tahrip ederek balıkların ölümüne ve kronik toksik seviyede, balığın stres sonucu ölümüne neden olur. Bunun yanı sıra balıkların büyümesini, üremesini, homeostazını, yem alımını ve kemik oluşumunu olumsuz etkiler. Balıklar çinkoyu gastrointestinal sistem ve solungaçlar yoluyla alır. Çinko toksisitesinin temel mekanizması, dokudaki kalsiyum iyonlarının emilimini bozan iki değerlikli katyonik formda meydana gelir, hipokalsemiye ve sonunda balık ölümüne neden olur. Dahası, yüksek Zn seviyeleri balıkların vücut proteinini ve lipitlerini önemli ölçüde azaltır, bu da protein ve lipitlerin oksidasyonuna ve düşük protein alımına neden olabilir. Çinko, balıklarda solungaçlar ve sindirim yolu aracılığıyla birikir, ancak suyun çinko kaynağı olarak rolü tam olarak açıklanmamıştır. Çinko en fazla balıklarda karaciğer, böbrek, bağırsak, solungaç gibi organlarda ve kas dokusunda bulunur (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar et al., 2022).

Nikel (Ni)

Nikel, çevrede bol miktarda bulunan, oksijen veya kükürt ile birlikte bulunan bir eser elementtir. Nikel, hem doğal hem de insan kaynaklı olarak çevreye salınır. Bu element, nikel madenciliği ve nikelin alaşımlara veya nikel bileşiklerine dönüştürülmesi sırasında endüstrilerden salınır. Nikel ayrıca kömür yakıtlı elektrik santrallerinden, petrol yakıtlı elektrik santrallerinden ve çöp yakma tesislerinden de salınır ve su sistemlerinin baskın bir kirleticisi olarak kabul edilir. Temel olarak, su ekosistemlerindeki Nikel, diğer kimyasal bileşiklerle birleşerek diğer maddelere absorbe olma ve çeşitli sinerjik ve antagonistik etkilere neden olma yeteneğine sahip çözümlü tuzlar oluşturur. Nikel, düşük konsantrasyonda birçok organizma için temel bir elementtir, ancak yüksek konsantrasyonda toksisiteye neden olur (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar et al., 2022). Balıklardaki nikel toksisitesi, pH, iyonik güç, sıcaklık, sertlik, çözülmüş organik karbon vb. gibi suyun farklı fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. Ni normal fizyolojiyi değiştirir ve birçok tatlı su balık türünün ölümüne neden olur. Nikel klorüre maruz kalma, balıklarda anormal yüzme davranışı, hızlı operküler hareket, solunum bozukluğu ve deride lezyonlar, kırmızı kan hücresi sayısında artış, hemoglobin ve beyaz kan hücresi sayısında azalma gibi kan parametrelerinde değişiklik görülebilir. Nikel balıklarda solungaç, böbrek,

karaciğer ve bağırsak gibi farklı dokularda histopatolojik değişikliklere yol açabilir. Balıklarda nikel zehirlenmesi, vücut dengesinin kaybolması ve ölümden önce yüzeye çıkma, hızlı ağız ve operkulum hareketi gibi davranış değişiklikleri gösterebilir. Nikel, balıkların kanında, böbreğinde, kasında ve karaciğerinde birikir ancak en yüksek birikim böbrekte görülür (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar et al., 2022).

Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum, yer kabuğunda ortalama konsantrasyonu yaklaşık 0,1-0,5 ppm olan bir eser elementtir ve genellikle çinko, bakır ve kurşun cevherleriyle birlikte bulunur. Kadmiyumun element formu doğada bulunmaz. Bunun yerine, kadmiyum klorür, kadmiyum oksit, kadmiyum sülfür, kadmiyum karbonat, kadmiyum nitrat ve kadmiyum siyanür gibi bileşik formları yaygın olarak bulunur. Kadmiyum, su ekosistemine farklı doğal ve antropojenik kaynaklardan salınır. Kadmiyumun doğal kaynakları, volkanik patlamalar ve kayaların aşınmasıyla yer kabuğundan ve mantosundan gelir. Antropojenik kaynaklar arasında fosil yakıtların yakılması, gübreler, tarımsal atıklar ve endüstriyel kullanım (plastik stabilizatörler, pigment, piller, elektroporasyon endüstrileri) yer alır ve bunlar su kütlesini kirletir. Kadmiyum, temel olmayan bir element olarak kabul edilir ve balıklarda ciddi toksisiteye neden olur. Su kütlesinin florası ve faunası, besin zinciri sırasında dolaylı olarak balık gövdesine giren kadmiyum bileşiklerinin suda çözülmüş veya tortu halindeki formlarını alır. Balıklar ise doğrudan solungaç, mide-bağırsak sistemi ve deri yoluyla suda çözülmüş serbest iyonik formdaki kadmiyumu alır. Mitokondrideki elektron transfer zincirini inhibe eder ve Reaktif Oksijen Türleri (ROS) üretimini uyarır. Cd, atmosfer yoluyla taşınan ciddi bir çevresel kirleticidir. Balıklarda anemi ve omurga kırıklarına, ozmoregülasyon sorunlarına, sindirim etkinliğinin azalmasına, hematolojik ve biyokimyasal etkilere, büyüme eksikliklerine, düzensiz yüzmeye, DNA hasarına, kanda, solungaçlarda ve karaciğerde mikro çekirdekli ve iki çekirdekli hücre oluşumuna, böbrek dokusunda karaciğerde yağlı vakuolleşme, hepatositlerde nekroz, bağırsakta submukozal kan damarlarında tıkanıklık ve glomerüller büzülme ve nekroz gibi histopatolojik değişikliklere sebep olabilir. Yüksek miktarda kadmiyum alımı, kalsiyum metabolizmasında bozukluklara, böbrek taşlarının oluşumuna, kronik böbrek yetmezliğine, proteinüriye, renal tübül disfonksiyona, akciğer fibrozisine ve aortik/koroner ateroskleroza neden olabilmektedir. Kadmiyum birikimi, yavaş atılım hızı nedeniyle ciddi bir çevresel endişe kaynağıdır. En yüksek kadmiyum biyoakümüülasyonu karaciğer, böbrek ve solungaçlarda, en düşük ise ciltte bulunur. Solungaçlar, kadmiyum detoksifikasyonu için en verimli organdır. Kadmiyum, yüksek biyoakümüülasyon

hızı nedeniyle su organizmaları için en toksik ağır metallerden biri olarak kabul edilir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Cıva (Hg)

Cıva, çevrede bulunan en zehirli ağır metallerden biri olarak kabul edilir. Çevresel cıva kirliliği, 20. yüzyıldan itibaren büyük sanayileşme nedeniyle hızla artmıştır. Cıva, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve Toksik Maddeler ve Hastalık Kayıt Ajansı (ATSDR) tarafından kurşun ve arsenikten sonra çevre için tehlikeli maddeler listesinde üçüncü sırada yer almıştır. Bu elementin doğal kaynakları orman yangını ve volkanik patlamalardır ve antropojenik kaynaklar arasında mantar ilaçları, elektronik cihazlar, piller, boya vb. bulunur. Fosil yakıtların yakılması ve madencilik de çevremizin cıva kirliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Temel formun dışında, cıva, sülfür, klorür veya organik asitle bir bileşik oluşturan iyonik formda ve özellikle metil cıva olmak üzere organik formda bulunur. Literatür, metil cıvanın kimyasal olarak en toksik formu olduğunu ve balık vücudunda bulunan cıvanın %70-100'ünün metillenmiş formda olduğunu öne sürmektedir. İnorganik cıvanın metilasyonu, anaerobik sülfat indirgeyici bakteriler, demir indirgeyiciler ve metanojenler gibi mikroorganizmalar tarafından meydana gelir. İklim değişikliğine atfedilen su sıcaklıklarındaki artış, cıvanın metilasyonunu uyarır. Cıva balıklara, sindirim kanalı, deri ve solungaçlar yoluyla yiyeceklerle balık vücuduna girebilir. Suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, inorganik cıvanın akut öldürücü konsantrasyonu balık türleri arasında farklılık göstermektedir. Cıva balıklar için çok toksiktir ve öldürücü olmayan konsantrasyonlarda bile balık sinir sisteminde yapısal, fizyolojik ve biyokimyasal değişikliklere neden olur. Metil cıva, lipofilik yapısı nedeniyle kan-beyin bariyerini geçebildiği ve balık sinir sisteminde birikebildiği için en nörotoksik bileşik olarak kabul edilir. Cıva ayrıca purinlerin, pirimidinlerin ve nükleik asitlerin konfigürasyonunu etkileyerek hücre zarının fiziksel özelliklerine ve yapısal bütünlüğüne de müdahale edebilir. Balıklarda cıva oksit toksisitesi serum korteks, kolesterol, aspartat aminotransferaz, alanin aminotransferaz, alkali fosfor, üre ve kreatinin seviyelerinde önemli bir artış ve hemoglobin ve hematokrit değerinde önemli bir azalma gösterebilir. Bazı balık türlerinde oksidatif hasar ve proinflatuar sitokinlerin yukarı regülasyonu, gonadlarda histolojik değişiklik ve oksidatif stres, Hipotalamus-Hipofiz-Gonadal (HPG) eksenini genlerinin transkripsiyonunu bozukluğu, kan damarlarının tıkanması, sperm sayısında azalma görülür. Cıva, proteinlere karşı yüksek bir afiniteye sahiptir, bu nedenle toplam cıvanın %90'ından fazlası balık kaslarında birikir. Metil cıvanın balık vücudundan atılma hızı son derece yavaştır, bu nedenle

kaslara ek olarak kanda da yüksek konsantrasyonda cıva bulunur. Ek olarak, karaciğer aynı zamanda cıvanın depolanması, detoksifikasyonu veya yeniden dağıtılması işlevi görür (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022). Cıva, tüketildiğinde solungaçlar, deri ve sindirim kanalı yoluyla bir balığın vücuduna girebilir. Ölümcül olmayan konsantrasyonlarda cıva balıklar için son derece zehirlidir ve balığın sinir sisteminin yapısını, fizyolojisini ve biyokimyasını değiştirir. Metil cıva, lipofilik yapısı nedeniyle kan-beyin bariyerini aşarken balığın sinir sisteminde birikebildiği için en zararlı madde olarak kabul edilir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Arsenik (As)

Arsenik, üretim şirketleri, eritme operasyonları, enerji santralleri vb. dahil olmak üzere çeşitli antropojenik kaynaklardan su ortamına salınan her yerde bulunan bir elementtir. Tarımsal alanda arseniğin bir diğer önemli kaynağı da arsenikli pestisitler, herbisitler ve fungusitlerin kullanımındadır. Düşük dozajlarda önemli zararlı etkiye sahip ölümcül metallere biri Arsenik (As)'dir. Arseniğin toksik etkisi, pH, sıcaklık, tuzluluk, organik maddeler, fosfat içeriği, askıda katılar ve diğer toksik maddeler gibi bir su kütesinin farklı abiyotik faktörlerine bağlıdır. Tatlı su balıklarının düşük konsantrasyondaki arseniğe sürekli maruz kalması, çoğunlukla karaciğer ve böbrek dokusunda biyolojik birikime neden olur. Akut maruz kalmalar ani ölüme neden olabilir. Balıklar solungaçları ve derileri yoluyla ve ayrıca arsenikle kirlenmiş yiyecekler yoluyla sürekli olarak arsenikle kirlenmiş suya maruz kalırlar. Arsenik çeşitli formlarda bulunur, örneğin element, üç değerlikli ve beş değerlikli oksidatif form. Üç değerlikli oksidasyon halindeki inorganik arsenik (arsenitler), balık dokusuna çok hızlı bir şekilde emilir ve beş değerlikli halden (arsenatlar) daha toksiktir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022). Arsenik maruziyeti, balıklarda solungaçlarında değişikliklere epitel hiperplazisi, lameller füzyon, epitel kaldırma ve ödem, deskuamasyon ve nekrozlar, karaciğerde histolojik makrofaj infiltrasyonu, vaskülarizasyon, hepatosit büzülmesi, sinüzoidlerin genişlemesi, vasküler dejenerasyon, nükleer hipertrofi ve fokal nekroz, kalp dokusundaki nekroz dahil olmak üzere bir dizi histolojik değişiklikler, Arsenik ayrıca bağışıklık hücrelerinde T hücresi ve B hücresi işlevlerinde değişikliğe neden olur. Böbrek ve dalakta organosomatik endekslerde azalma görülebilir. Arsenik (As)'nin spermatogenezi ve oogenezi engellemesi nedeniyle üreme sürecini önemli ölçüde etkilediği bilinir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Bakır (Cu)

Tatlı su ekosistemindeki bakır kirliliği, tarım alanlarında mantar öldürücü, algisit ve böcek öldürücülerin yaygın kullanımı ve atık maddelerin su kütlesine deşarj edilmesi nedeniyle ortaya çıkar. Bunun dışında, elektrokaplama endüstrisi, metal rafinasyon endüstrisi, plastik endüstrisi, madencilik, kanalizasyon çamuru, atmosferik birikim vb. gibi faaliyetlerden de bakır toksisitesi meydana gelir. Bakır, canlı organizmaların büyümesi ve metabolizması için önemli olan temel bir eser element ve mikro besindir. Balıklarda ve diğer omurgalılarda bakır, birçok metabolik enzimin ve glikoproteinin temel bileşenidir. Ayrıca hemoglobinin sentezi ve sinir sistemi fonksiyonu için de gereklidir. Ancak, daha yüksek konsantrasyonlarda bakır canlı organizmalar üzerinde toksik etkiye neden olur. Bakırın su yaşamı için toksisitesi, su sertliği, pH, anyonlar ve Çözünmüş Organik Karbon (DOC) gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Balıklar bakırı esas olarak beslenme yoluyla veya ortam maruziyetiyle alır. Tatlı su balıklarında su kaynaklı bakıra maruz kalma, oksidatif stres tepkisini indüklemiştir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022). Balıklarda bakırın kronik toksisitesi zayıf büyümeye, yaşam süresinin kısalmasına, bağışıklık tepkisinin azalmasına ve doğurganlık sorunlarına neden olur karaciğer dokusunda biyokimyasal ve morfolojik değişikliklere, eritrositlerde, solungaç epitel hücrelerinde ve karaciğer hücrelerinde mikronükleus ve binükleus oluşumuna ve dölleme ve yumurtadan çıkma oranını da önemli ölçüde etkilediği görülmüştür (Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Kurşun (Pb)

Kurşun, çevrede doğal olarak bulunan ve en tehlikeli ağır metallere biri olarak kabul edilir. Çevre içindeki kurşun konsantrasyonu, metal madenciliği, kömür, petrol ve benzinin yanması, pil üretimi, kurşun-arsenat pestisitler, kurşun bazlı boya, pigmentler, yiyecek kutuları vb. gibi farklı antropojenik kaynaklar tarafından büyük ölçüde artar. Kurşunun sudaki çözünürlüğü pH, tuzluluk, sertlik vb. faktörlere bağlıdır. Kurşunun en yüksek çözünürlüğü yumuşak ve asidik suda görülür. Çeşitli çalışmalara göre, balıklar için ölümcül kurşun konsantrasyonu 10-100 mg/L'dir Kurşun, su ve yem yoluyla suda yaşayan organizmalarda biyolojik olarak biriken güçlü bir tehlikeli elementtir. Kurşun, karaciğer, böbrek, solungaçlar, dalak ve hatta sindirim sistemi dâhil olmak üzere farklı balık organlarında birikir (). Kurşuna maruz kalan balıklarda ayrıca parankim hücrelerinin nekrozu, hepatik kordonların ve bağ dokusunun fibrozisi, büyümede ve vücut ağırlığında azalma, kan damarlarının çökmesi immünolojik parametrelerde değişiklik görülebilir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Siyanür (CN-)

Siyanür (cyanide), karbon ve azot elementlerinin birleşmesiyle oluşan, son derece toksik bir kimyasal bileşiktir. Siyanür formülü genellikle CN⁻ iyonu ile gösterilir. En bilinen türleri arasında hidrojen siyanür (HCN), potasyum siyanür (KCN) ve sodyum siyanür (NaCN) yer alır. Siyanürler, sentetik kumaşların, plastiklerin üretiminde, elektrokaplama banyolarında ve metal madenciliği işlemlerinde, pestisit ajanları ve tarımsal üretimde ara maddeler olarak, yırtıcı hayvan kontrol cihazlarında yaygın ve kapsamlı bir şekilde kullanılmaktadır ve bazı atık alan sularda su ekosistemleri için tehlike oluşturmaktadır (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022). Siyanür çevrede her yerde bulunur, ancak biyolojik olarak anlamlı bir siyanür toksisitesi ifadesi olarak yalnızca serbest siyanür (yani, moleküler hidrojen siyanür, HCN ve siyanür anyonunun, CN⁻ toplamı) kabul edilir ve kökeni ne olursa olsun birincil toksik ajandır. Tüm basit siyanürler suda iyonlaşarak siyanür iyonu açığa çıkarır ve bu da pH'a bağlı olarak hidrosiyanik asit oluşturur. Siyanür, bir karbon ile bir azot atomunun üçlü bağ ile bağlanması sonucu oluşan anyon karakterde toksik potansiyele sahip kimyasal bir radikaldir. Siyanürün ölümcül konsantrasyonuna maruz kalan balıklarda katalaz aktivitesindeki azalma, karaciğer dokusunda en belirgin olup bunu sırasıyla solungaç, kas ve beyin izlemiştir. Balıklarda siyanüre maruz kalma süresi arttıkça kan parametrelerinin olumsuz etkileneceğini söylenebilir (Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Molibden (Mo)

Su ortamındaki doğal Mo kaynakları arasında magmatik ve tortul kayalardan cevherlerin ayrışması ve bunların daha sonra akarsulara ve göllere akması yer almaktadır. Yeraltı ve yüzey sularındaki doğal Mo konsantrasyonları, insan faaliyetiyle kirlenmedikçe nadiren 0,02 mg L aşmaktadır. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) Mo'yu öncelikli bir kirletici olarak görmemesiyle vurgulanmaktadır. Tatlı su balıklarının solungaçlarının suda taşınan Mo'yu biriktirdiğini gösteren çalışma mevcuttur. Molibden balıklarda kemiklerde, midede, böbreklerde ve karaciğerde birikir ve yüksek seviyeleri genç balıklar için zehirli olabilir (Ali et al., 2019; Briffa ve et al., 2020; Kumar at al., 2022).

Balıklarda Ağır Metal Dağılımı, Birikimi ve Detoksifikasyonu

Ağır metallerin balık dokularındaki birikim düzeyi, çevredeki metal derişimi, balığın yaşı, metabolik aktivitesi, fizyolojik durumu, tür özellikleri ve suyun fizikokimyasal yapısı çok sayıda faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir (Authman ve ark., 2015; Briffa ve ark., 2020).

Ağır metaller, vücuda girdikten sonra genellikle pasif difüzyon yoluyla sıvı faza geçer. Özellikle boşaltım sistemi yeterince gelişmemiş türlerde, metallerin toksik formları karaciğer ve böbrek dokularında birikerek zarar verebilir (Malik ve Maurya, 2014; Gheorghe ve ark., 2017).

Dış ortandan balık vücuduna giren ağır metaller, genellikle taşıyıcı proteinlere bağlanarak kan dolaşımı aracılığıyla depo bölgelerine veya biyotransformasyonun gerçekleştiği karaciğere taşınır. Karaciğer, ağır metallerin büyük kısmını metabolize ederek ya dokularda depolar ya safra yoluyla dışarı atar ya da böbrekler aracılığıyla tekrar kana verip vücuttan uzaklaştırılmasını sağlar (Ali ve ark., 2019; Garai ve ark., 2021).

Belirli bir eşiğe kadar ağır metaller depo edilerek toksisite göstermeyebilir, ancak bu sınır aşıldığında biyokimyasal bozukluklar ortaya çıkar. Fe, Cu, Zn, Co ve Mn gibi bazı metaller düşük düzeylerde esansiyel elementler olup metabolik aktiviteler için gereklidir, ancak yüksek derişimlerde toksik etki gösterirler. Buna karşın Hg, Pb, Cd ve As gibi metaloidler biyolojik olarak gerekli değildir ve çok düşük miktarlarda bile hücrel toksisite oluşturabilirler (Gautam ve ark., 2016; Rahman ve ark., 2012).

Ağır metallerin en fazla karaciğer, sonra böbrek ve solungaçlarda, en az kas dokusunda biriktiği belirlenmiştir (Youssef ve Tayel, 2004; Garai ve ark., 2021). Bu durum, karaciğerin metabolik olarak aktif bir organ olması ve detoksifikasyon merkezi işlevi görmesiyle açıklanmaktadır (Authman et al., 2015).

Karaciğer, ağır metallerin düzenlenmesi ve detoksifikasyonu açısından merkezi bir role sahiptir. Bu organda sentezlenen metallothioneinler (MT) ve glutatyon (GSH) gibi sistein bakımından zengin, düşük molekül ağırlıklı bileşikler ağır metalleri bağlayarak toksik etkilerini nötralize eder ve hücre düzeyinde koruyucu işlev görür (Hodson, 1988; Chan ve Cherian, 1992; Gheorghe ve ark., 2017).

Balıklarda ağır metallerin doku içi dağılımı tür, habitat koşulları ve çevresel kirlilik seviyelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ağır metaller genellikle solungaç, karaciğer, böbrek, dalak ve kas gibi dokularda farklı oranlarda birikir.

Sökmen ve ark. (2018), Erzincan Karasu Nehri'nde yaptıkları araştırmada *Capoeta umbla* türünün dokularında Fe'nin sırasıyla karaciğer (267.734 mg/kg), kas (172.556 mg/kg) ve solungaç (100.938 mg/kg) dokularında en yüksek düzeyde biriktiğini; Pb'nin ise karaciğer (0.208 mg/kg), solungaç (0.127 mg/kg) ve kas (0.172 mg/kg) dokularında en düşük seviyelerde bulunduğunu bildirmiştir.

Birden fazla ağır metalin aynı ortamda bulunması, toksik etkilerin artmasına ya da azalmasına neden olabilir. Bu durum, organizmanın metabolik kapasitesi ve ağır metallerin farklı toksisite mekanizmaları ile ilişkilidir. Örneğin, Cu-Zn

karışımlarında, yalnızca Cu maruziyetine kıyasla Cu'un toksik etkisi azalmaktadır (Acı, 2015). Balıklarda Zn genellikle deri ve kaslarda, Cu ise çoğunlukla karaciğerde birikmektedir. Daha yavaş birikim gösteren Cd, özellikle böbrek ve karaciğerde depolanma eğilimindedir (Hogstrand ve Haux, 1991; Jezierska ve Witeska, 2006).

Karayakar ve ark. (2017), Mersin Körfezi'nde ekonomik öneme sahip *Caranx rhoncus*, *Scomber japonicus* ve *Pegusa lascaris* türlerinde Zn, Cu, Pb ve Cd düzeylerini incelemiş, en yüksek düzeyin Zn için dalakta, Cu ve Cd için karaciğerde, Pb için ise solungaçta biriktiğini, en düşük birikimin kas dokusunda gerçekleştiğini belirtmiştir.

Yazkan ve ark. (2002), Antalya Körfezi'nde *Boops boops*, *Dicentrarchus labrax*, *Mullus barbatus*, *Mugil cephalus* ve *Sparus auratus* türlerinin kas ve karaciğerlerinde Zn, Cu, Cd ve Pb düzeylerini karşılaştırmı, kaslarda Zn'nin 3.17–11.36 mg/kg, Cu'un 0.51–3.66 mg/kg; karaciğerlerde ise Zn'nin 3.97–15.14 mg/kg, Cu'un 0.83–4.44 mg/kg arasında değiştiğini rapor etmiştir.

Murat (2015), Gelingüllü Baraj Gölü'nde *Cyprinus carpio* örneklerinde Cu, Pb, Cd ve Zn birikim düzeylerini sırasıyla kas, solungaç ve iç organlarda ölçmüş ve ağır metal birikiminin genel olarak iç organ> solungaç> kas şeklinde sıralandığını bildirmiştir. Aynı çalışmada, Türk Gıda Kodeksi'nde belirtilen tüketim için kabul edilebilir maksimum Cd, Zn, Pb ve Cu değerlerinin sırasıyla 0.5, 50.0, 1.0 ve 20 mg/kg olduğunu vurgulamıştır.

Woodward (1996), balıklarda Cd düzeylerinin 1–50 µg/kg arasında olabileceğini belirtirken, EFSA (2012) Cd için tolere edilebilir haftalık alımı 2.5 µg/kg vücut ağırlığı, FAO/WHO ise As için günlük 0.002 mg/kg olarak bildirmiştir (Baydan ve Yurdakök, 2010).

Hg maruziyeti, özellikle yırtıcı türlerde yüksek düzeyde birikim göstermektedir. Baştürk ve ark. (1980), Kanada'daki çalışmalarda avcı balıklarda Hg düzeyinin 0.2 µg/g'dan fazla olduğunu, Baydan ve Yurdakök (2010) ise Hg düzeyinin köpekbalığında 0.988 ppm ve tilefish türünde 1.450 ppm olduğunu belirtmiştir. WHO ve FDA balıklarda Hg için günlük tolere edilebilir alımı 0.4 µg/kg, US-EPA ise 0.1 µg/kg olarak belirlemiştir. Türk Gıda Kodeksi'ne göre taze balıklarda Hg, Cd ve Pb için kabul edilebilir maksimum değerler sırasıyla 0.05, 0.5 ve 0.3 mg/kg'dır (Yıldırım, 2013).

Ağır metallerin büyük bir kısmı hücre ve dokularda depolanır. Yüksek seviyedeki metal birikimi, bu dokularda patolojik değişimlere ve organ disfonksiyonuna yol açabilir. Bazı metaller, biriktikleri dokular dışında da toksik etki oluşturabilir. Örneğin Pb'nin kemiklerde birikimi, yumuşak dokularda toksisite belirtilerinin görülmesine neden olabilir (Dökmeci, 1988). Balıkların 0.04–0.198 mg/L Pb içeren sulara dayanabildiği, ancak besin yoluyla alınan

düşük Pb derişimlerinin bile akut zehirlenmelere neden olabileceği belirtilmiştir (Kahvecioğlu ve ark., 2004).

Cd ise suda yüksek çözünürlüğe sahip olup biyolojik olarak gerekli değildir. Düşük konsantrasyonlarda dahi balık larvalarının büyüme ve yaşama oranlarını azaltır ve toksik etki gösterir. Cd birikimi özellikle karaciğer, böbrek ve solungaçlarda gerçekleşir ve lamellerde erime, kılcak tıkanıklık, üreme bozuklukları ve sinirsel dejenerasyonlara yol açabilir (Cicik ve Engin, 2005; Kaptan, 2014).

Genel olarak karnivor türler, herbivor türlere göre daha yüksek ağır metal birikimi gösterir. Ayrıca pelajik türlerde metal düzeyleri bentik türlere göre farklılık göstermektedir (Bayhan, 2015). Brown ve Balls (1997), Ege Denizi'nde ekonomik türlerde (ör. *Mullus barbatus*, *Boops boops*, *Merluccius merluccius*) çinko düzeylerinin benzer, bakır düzeylerinin ise pelajik balıklarda daha yüksek olduğunu bildirmiştir.

Sonuç

Suyun, ağır metallerin birikimine en uygun alan olduğunu, özellikle durgun sularda su zeminindeki çamurda önemli miktarlarda ağır metal biriktiğini söylemek mümkündür. Tatlısu ekosistemleri, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetlerinin devamlılığı açısından gezegenimizin en hassas sistemlerinden birini oluşturmaktadır. Ancak son yüzyılda artan endüstriyel üretim, madencilik, tarımsal faaliyetler ve kentleşme süreçleri, sucul sistemlerde ağır metal birikiminin küresel ölçekte önemli bir çevre sorunu haline gelmesine neden olmuştur. Bu elementler, çevrede biyolojik olarak parçalanamadıkları için hem su hem de sediment ortamında uzun süre kalmakta ve besin zinciri boyunca taşınarak ekotoksik etkiler oluşturmaktadır.

Ağır metallerin sucul ekosistemlerdeki birikimi, fizikokimyasal koşullar, trofik yapı ve biyolojik çeşitlilikle doğrudan ilişkilidir. Özellikle bentik beslenme davranışı gösteren balık türleri, sediment kökenli metallerin biyobirikimi açısından en duyarlı organizmalar arasında yer almaktadır. Bu türlerde birikim düzeyleri, genellikle karaciğer> böbrek> solungaç> kas sıralamasıyla gerçekleşmektedir. Karaciğer, yüksek metabolik aktivitesi ve detoksifikasyon mekanizmaları nedeniyle metal birikiminin en yoğun gözlendiği organdır. Metallothionein ve glutatyon gibi metal bağlayıcı proteinlerin varlığı, bir yandan hücrel koruma sağlarken, diğer yandan uzun süreli maruziyet durumlarında bu sistemlerin yetersiz kalmasına yol açmaktadır.

Balıklarda ağır metal birikimi yalnızca ekolojik bir sorun değil, aynı zamanda halk sağlığı açısından da ciddi bir risk oluşturmaktadır. Fe, Cu ve Zn gibi eser elementler düşük konsantrasyonlarda metabolik süreçler için gerekli olsa da,

yüksek derişimlerde oksidatif stres ve hücre hasarına neden olmaktadır. Buna karşın Cd, Pb, Hg ve As gibi toksik metaller biyolojik işlevi olmayan elementler olup, çok düşük düzeylerde bile nörotoksik, nefrotoksik ve karsinojenik etkiler gösterebilmektedir. Bu metallerin sucul organizmalarda birikmesi, özellikle balık tüketimi yoluyla insanlara geçmekte ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ile FAO tarafından belirlenen güvenli sınır değerlerin aşılması durumunda kronik toksisite riskini artırmaktadır.

Ekotoksikolojik açıdan değerlendirildiğinde; ağır metaller, balıklarda büyüme, üreme ve bağışıklık sistemi üzerinde olumsuz etkiler oluşturmakta, hücresel düzeyde DNA hasarı ve metabolik bozukluklara yol açmaktadır. Uzun süreli maruziyet, populasyon dinamiklerini bozarak türlerin sürdürülebilirliğini tehdit etmekte ve ekosistem bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Bu durum, yalnızca biyotik toplulukları değil, insan refahını ve gıda güvenliğini de doğrudan etkilemektedir.

Ağır metal kirliliğinin azaltılması için entegre su yönetimi yaklaşımları kaçınılmazdır. Endüstriyel deşarjların ve tarımsal girdilerin sıkı biçimde denetlenmesi, madencilik faaliyetlerinin çevresel etki analizlerinin düzenli olarak güncellenmesi ve sucul sistemlerin biyolojik izleme programlarıyla sürekli gözlemlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, fitoremediasyon, biyosorpsiyon ve nanoteknolojik filtrasyon sistemleri gibi yenilikçi ve çevre dostu teknolojiler, metal gideriminde etkin ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Sonuç olarak, tatlısu ekosistemlerinde ağır metal birikimi, yalnızca ekolojik değil aynı zamanda sosyoekonomik bir sorundur. Bu nedenle, bilimsel izleme verilerinin politika yapım süreçlerine entegre edilmesi, yerel yönetimlerin su kalitesi koruma stratejilerini güçlendirmesi ve toplumun bilinçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ekosistem temelli yönetim anlayışı benimsenmediği sürece, sucul yaşamın ve insan sağlığının korunması mümkün değildir. Bu bağlamda, çevre biliminin temel ilkelerine dayalı, disiplinler arası ve sürdürülebilir yaklaşımlar, gelecekte su kaynaklarının korunması ve yaşam kalitesinin sürdürülmesi için hayati bir zorunluluktur.

KAYNAKLAR

- Acı, A. (2015). Ağır metal kirliliği ve sucul ekosistemlerde biyobirikim. *Ekoloji Dergisi*, 24(96), 15–23.
- Alipour, M., Sharifi, H., & Ghaedrahmati, R. (2022). Biosorption of heavy metals by algae: Mechanisms and applications. *Journal of Environmental Management*, 306, 114405.
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 6730305.
- Aktar, M., & Cebe, A. (2010). Fitoplanktonların ağır metal kirliliği göstergesi olarak kullanımı. *Su Ürünleri Dergisi*, 27(1), 41–47.
- Aktop, Y., Çağatay, İ.T., (2020). Ağır Metallerin Balıklarda Birikimi ve Etkileri. *Menba Kastamonu Üniv.Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*. 6(1): 37-44
- Andrade, L. R., Farina, M., & Amado Filho, G. M. (2005). Effects of copper on the marine red alga *Gracilaria domingensis*. *Brazilian Journal of Oceanography*, 53(2), 101–112.
- Authman, M. M. N., Zaki, M. S., Khallaf, E. A., & Abbas, H. H. (2015). Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 6(4), 1–13.
- Başaran, M. (2010). Sedimentte ağır metal birikimi ve ekotoksikolojik etkiler. *Çevre Bilimleri Dergisi*, 31(2), 201–209.
- Baştürk, O., Doğan, M., Salihoğlu, I., Balkas, T. I., 1980. DDT, DDE, and PCB residues in fish, crustaceans and sediments from the eastern Mediterranean coast of Turkey. *Marine Pollution Bulletin*. 11: 191-195.
- Baydan, E., & Yurdakök, B. (2010). Ağır metallerin toksikolojik özellikleri ve gıdalardaki limitler. *Ankara Üniv. Veteriner Fakültesi Dergisi*, 57(3), 167-176.
- Bayhan, B. (2015). *Marine pollution and bioaccumulation in fish species*. Marine Ecology Press.
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691.
- Brown, R. J., & Balls, P. W. (1997). Determination of trace metals in fish and shellfish: Analytical and environmental aspects. *Marine Pollution Bulletin*, 34(10), 706–712.
- Bryan, G. W. (1971). The effects of heavy metals (other than mercury) on marine and estuarine organisms. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 177(1048), 389–410.

- Chan, H. M., & Cherian, M. G. (1992). Protective roles of metallothionein in cadmium toxicity. *Toxicology*, 72(3), 281–306.
- Chen, J., Xu, Y., & Li, W. (2022). Sources and ecological risks of heavy metals in aquatic systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 233, 113303.
- Chen, L., Zhao, X., & Wang, L. (2023). Phytoplankton as bioindicators of heavy metal pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 10214–10225.
- Chmielewska E., Medved J., Bioaccumulation of heavy Metals by Green Algae *Cladophora glomerata* in a Refinery Sewage Lagoon, *Croatica Chemica Acta*, 74: (1), 135-145, (2001).
- Cicik, B., & Engin, M. S. (2005). The effects of cadmium on levels of some elements in the tissues of *Cyprinus carpio* (L., 1758). *Fresenius Environmental Bulletin*, 14(8), 621–626.
- Das, S., Karmakar, S., & Jha, R. (2022). Microbial interactions in heavy metal transformations. *Environmental Research*, 214, 113981.
- Dietz, F. (1972). Lead contamination of aquatic mosses. *Hydrobiologia*, 40(3), 303–316.
- Dökmeci, İ. (1988). *Toksikoloji ders kitabı*. Ankara Üniversitesi Yayınları.
- EFSA., 2012. Cadmium dietary exposure in the European population. European Food Safety Authority. Parma, Italy European Food Safety Authority- Cadmium in Food. *EFSA Journal*. 2012; 10(1): 2551, 37p
- FAO/WHO. (2021). Joint FAO/WHO expert meeting on food contamination and exposure assessment. Geneva: World Health Organization.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (1983). *Metal pollution in the aquatic environment* (2nd ed.). Springer.
- Garai, D., Paul, S., & Chakraborty, A. (2021). Heavy metal bioaccumulation in fish tissues and health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 293.
- Gautam, R. K., Sharma, S. K., & Mahiya, S. (2016). Heavy metals in water and their health effects. *Environmental Science and Engineering*, 1–34.
- Giri, S., Singh, A., & Pandey, S. K. (2022). Bioaccumulation and toxicological effects of heavy metals in fish. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(7), 475.
- Gheorghe S, Stoica C, Vasile GG, Nita-Lazar M, Stanescu E, Lucaciu IE. Su Ekosistemlerinde Metallerin Toksik Etkileri: Su Kalitesinin Modülatörleri. In: Su Kalitesi. 2017. 59-89.
- Haesloop, U., Schirmer, M., 1985. Accumulation of orally administered cadmium by the Eel (*Anguilla anguilla*). *Chemosphere*. 14 (10): 1627-1634.

- Has-Schön, E., Bogut, I., & Strelec, I. (2006). Heavy metal profile in fish from the river Danube and their relationships with water chemistry. *Environmental Monitoring and Assessment*, 118(1–3), 267–286.
- Heydt, G. (1977). Schwermmetallgehalte von wasser, Wasserpflanzen, chironomidae und mollusca der Elsenz. Dipl. Arbeit Univ., Heidelberg.
- Hodson, P. V. (1988). The metabolism of toxic metals in fish. In *Toxic contaminants and ecosystem health* (pp. 149–163). John Wiley & Sons
- Jeziarska, B., Witeska, M. (2006). The Metal Uptake and Accumulation in Fish Living in Polluted Waters. *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation*, 69, 107-114.
- Kahvecioğlu, Ö., Karataş, Y., & Doğan, N. (2004). Balıklarda kurşun birikimi ve toksik etkileri. *Veteriner Bilimleri Dergisi*, 20(3), 47–54.
- Kaptan, H. (2014). Balıklarda ağır metal toksisitesi ve fizyolojik etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karayakar, F., Aydın, M., & Yılmaz, F. (2017). Mersin Körfezi’ndeki ekonomik balık türlerinde ağır metal birikimi. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 34(4), 433–442.
- Knauer, G. A., & Martin, J. H. (1973). Seasonal variations of cadmium, copper, manganese, lead, and zinc in water and plankton. *Marine Chemistry*, 1(3), 261–278.
- Kumar, S., Sharma, R., & Singh, P. (2022). Metal toxicity in freshwater fish: A comprehensive review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 94, 103899.
- Landis, W. G., Matthews, G. B., & Ahlers, W. (1999). Modeling of non-point source pollution in aquatic systems. *Ecological Modelling*, 118, 35–52.
- Malik, D. S., & Maurya, P. K. (2014). Bioaccumulation of heavy metals in fish tissues of freshwater pond. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(5), 3201–3210.
- Martin, J. H., Broenkow, W. W. (1975). Cadmium in plankton: elevated concentrations off Baja California. *Science*, 190(4217), 884-885.
- Mehta, S. K., & Gaur, J. P. (2005). Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: Progress and prospects. *Critical Reviews in Biotechnology*, 25(3), 113–152.
- Murat, H. (2015). Gelingüllü Baraj Gölü balıklarında ağır metal birikimi ve toksik etkiler. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Rahman, M. S., Molla, A. H., & Saha, N. (2012). Bioaccumulation of heavy metals in fish tissues and their histopathological changes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(5), 2785–2795.

- Rao, M. V. (1986). Mechanisms of metal ion sorption by algae. *Phykos*, 25(1–2), 1–10.
- Rauf, A., Javed, M., Ubaidullah, M., (2009). Heavy metal levels in three major carps (*Catla catla*, *Labeo rohita* and *Cirrhina mrigala*) from the river Ravi, Pakistan. *Pak Vet J* 29: 24–26.
- Reay, P.F. (1972). The accumulation of arsenic from arsenic-rich natural waters by aquatic plants. *Journal of applied ecology*, 557-565.
- Sökmen, T.Ö, Güneş, M., Kırıcı, M., 2018. Karasu Nehri'nden (Erzincan) alınan su, sediment ve *Capoeta umbla* dokularındaki ağır metal düzeylerinin belirlenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*. 5(4): 578–588.
- Şener, Ş. (2015). Sedimentte ağır metallerin dinamiği ve ekosistem etkileri. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16(3), 331–345.
- Taylan, S., & Böke Özkoç, H. (2007). Ağır metallerin kaynakları ve sucul ekosistemlerde taşınımı. *Ekoloji Dergisi*, 16(62), 50–58.
- Wang, H., Liu, Y., & Zhang, Q. (2023). Human health risk assessment of heavy metals through fish consumption. *Chemosphere*, 324, 138265.
- Woodward, K.N., 1996. Theregulation of fishmedicines-UK and European Unionaspects. *Aquaculture Research*. 27: 725-734
- Xie, W., Chen, S., & Zhang, L. (2023). The role of phytoplankton in metal cycling and biomagnification. *Marine Environmental Research*, 191, 106240.
- Yazkan, M., Özdemir, F., Gölükcü, M., 2002. Antalya Körfezi'nde avlanan bazı balık türlerinde Cu, Zn, Pb, ve Cd içeriği. *Türk J.Vet. Anim. Sci. Tübitak*. 26: 1309-1313.
- Yıldırım, M. (2013). *Türk Gıda Kodeksi – Balıklarda ağır metal limitleri*. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Yayınları.
- Yılmaz, F., Özdemir, N., & Demirak, A. (2020). Heavy metal levels in fish species from a Mediterranean coastal lagoon. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110713.
- Yin, L., Luo, J., & Wang, Z. (2023). Bioremediation of heavy metal-contaminated water using algal and bacterial consortia. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103057.
- Youssef, M. I., & Tayel, S. I. (2004). Histopathological effects of heavy metals on *Oreochromis niloticus* fish. *Journal of the Egyptian German Society of Zoology*, 43, 123–140