ZOOTEKNİDE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR: HAYVAN BESLEME VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAYVANCILIK

Editör:
İSMAİL ÜLGER



BİDGE

BİDGE Yayınları

ZOOTEKNİDE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR: HAYVAN BESLEME VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HAYVANCILIK

Editör: İSMAİL ÜLGER

ISBN: 978-625-5057-39-6

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

TAVUKÇULUKTA SÜRÜ ÜNİFORMİTESİ VE YÖNETİMİ .. 1
ÇİĞDEM ŞEREMET

FONKSİYONEL BİR GIDA OLAN BALIN YAPISI VE İNSAN SAĞLIĞINDAKİ YERİ 20
SEZAİ ALKAN

WATER FOOTPRINT IN ANIMAL FARMING: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR SUSTAINABLE LIVESTOCK PRODUCTION IN TURKIYE .. 43
NAZAN KOLUMAN, YAVUZKAN PAKSOY

HİDROPONİK YEŞİL YEM RASYONA GİRMELİ 73
MUHAMMET KARAŞAHİN

SÜT SIĞIRI RASYONLARININ OPTİMİZASYONUNDA YAPAY ZEKÂNIN KULLANIMI 101
ESRA KAYA

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN RUMİNANT BESLEME ÜZERİNE ETKİLERİ 126
ESRA KAYA

NUTRIENT COMPOSITION OF MICROALGAE AND THEIR USE IN ANIMAL NUTRITION 149
YAVUZ GÜRBÜZ

TAVUKÇULUKTA SÜRÜ ÜNİFORMİTESİ ve YÖNETİMİ

BÖLÜM 1

ÇİĞDEM ŞEREMET[1]

Giriş

Tavukçuluk işletmelerinde sürü performansı çoğunlukla ortalama canlı ağırlık, yemden yararlanma oranı ve yumurta verimi gibi göstergelerle değerlendirilir. Bu değerler üretimin genel durumunu ortaya koyar, ancak bireyler arasındaki farklılıkları açıklamaz. Aynı ortalama canlı ağırlığa sahip iki sürüden birinde hayvanlar dar bir ağırlık aralığında toplanırken, diğerinde gelişmesi geri kalmış ve aşırı ağır bireyler birlikte bulunabilir. Sürü üniformitesi, bu dağılımın yetiştirme kararlarına dâhil edilmesini sağlar. Canlı ağırlık ortalaması ile sürü içindeki bireysel farklılıkların birlikte değerlendirilmesi, özellikle yem tahsisinin sürü düzeyinde yapıldığı damızlık yetiştiriciliğinde önem taşır (Zuidhof et al., 2015, 2017).

Üniformitenin üretimdeki karşılığı, yetiştirilen hayvanın kullanım amacına yani verim yönüne göre değişir. Üreticiler için damızlıklarda büyümenin ve üreme dönemine hazırlığın düzenlenmesi, ticari yumurtacılarda büyütmeden yumurtlama dönemine geçişin yönetilmesi, etlik piliçlerde ise kesim ağırlığı dağılımının öngörülmesi önem taşır. Bununla birlikte yapılan araştırmalarda bu alanlarda üniformiteyle ilişkili yararlar bildirilmekte ancak daha yüksek üniformitenin bütün verim özelliklerini aynı ölçüde iyileştirdiği gösterilmemektedir. Bu nedenle değerlendirme yapılırken ölçülen özellik, hayvanların yaşı

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Orcid: 0000-0002-9642-1648

ve araştırmanın üretim koşulları açıkça belirtilmelidir (Petitte et al., 1982; Çolak & Yetişir, 2010; Vasdal et al., 2019).

Bu bölümde tavukçulukta üniformitenin biyolojik anlamı ve yetiştiricilikteki işlevi açıklanarak damızlık, yumurtacı ve etlik piliç sürülerinde üniformitenin önemi ele alınmıştır. Ayrıca verim yönüne göre ölçüm ve örnekleme yöntemleri ilişkilendirilerek üniformiteyi etkileyen besleme, manejman, sağlık vb. etmenler ortak bir yönetim çerçevesinde irdelenmiştir.

Üniformitenin biyolojik temelleri ve yetiştiricilikteki önemi

Sürü üniformitesi, aynı sürüdeki bireylerin belirli bir özellik bakımından birbirine yakınlık düzeyi demektir ve tavukçulukta bu kavram çoğunlukla canlı ağırlık olarak değerlendirilmektedir. Canlı ağırlığın objektif yani ölçülebilir olması ve kullanılan genotipe ait büyüme programının ağırlık hedeflerine dayanması, bu tercihi uygulama açısından anlaşılır kılmaktadır. Ancak değerlendirme yapılırken canlı ağırlık üniformitesi, karkas ağırlığı üniformitesi veya yumurta ağırlığı üniformitesi farklı dağılımları tanımladığından hangi özelliğin esas alındığı, birbirlerinin yerine kullanılamayacağı unutulmamalıdır (Vasdal et al., 2019; Zuidhof, 2018; Anene et al., 2020).

Damızlık sürülerde biyolojik gelişim düzeyinin sadece canlı ağırlık rakamlarıyla değerlendirilmesi yeterli değildir. Aynı canlı ağırlığa sahip hayvanlar arasında iskelet ve kas gelişimi, yağ birikimi bakımından farklılıklar olabilir. Zuidhof et al. (2015), etlik damızlıklarda yetiştirme ve yemleme uygulamalarının canlı ağırlıkla birlikte karkas özelliklerindeki değişkenliği de etkilediğini göstermişlerdir. Araştırıcılara göre bu sonuç, canlı ağırlığın genel üniformitenin değerlendirilmesindeki yerini azaltmaz; ağırlık kayıtları ve vücut gelişimine ilişkin gözlemlerin birlikte yorumlanması gerektiğini ortaya koyar. Fizyolojik benzerlikten söz edebilmek için ilgili gelişim özelliklerinin ayrıca değerlendirilmesi gerekir.

Üniformitenin yönetim bakımından önemi sürüye uygulanan ortak manejman pratiklerinin bireylerin gereksinimlerini ne ölçüde karşılayabildiğiyle ilgilidir. Yem dağıtımı, aydınlatma ve üretime geçiş kararları çoğu işletmede bireysel olarak düzenlenmez. Bireylerin gelişim düzeylerindeki farklılıklar arttığında sürü ortalamasına uygun görünen bir uygulama bazı bireylerin gereksinimlerini karşılamaz. Özellikle sınırlı yemleme uygulanan etlik damızlıklarda yemin bireyler arasında paylaşılması bu nedenle kritik hâle gelir.

Üniformite, hayvanların canlı ağırlık bakımından birbirine ne kadar yakın olduğunu; hedef ağırlığa uygunluk ise yaşlarına ve genotiplerine göre beklenen ağırlığa ulaşıp ulaşmadıklarını gösterir. Bireylerin canlı ağırlık bakımından birbirine yakın olması doğru büyüme düzeyine ulaştıklarının tek başına bir göstergesi değildir. Hedefin altında toplanmış bir sürü yüksek üniformite gösterebilir. Buna karşılık canlı ağırlık ortalamasının bekleneni sağladığı bir sürüde ağırlık dağılımı geniş olabilir. Bu nedenle değerlendirmede önce sürü ortalamasının hedefe uzaklığı, ardından bireysel ağırlıkların dağılımı incelenmelidir (Zuidhof, 2018).

Damızlık sürülerde üniformite

Damızlık sürülerde büyütme döneminin temel amacı, yumurta üretim başlangıcına uygun canlı ağırlık ve vücut gelişimiyle ulaşılmasını sağlamaktır. Etlik damızlıkların hızlı büyüme potansiyeli, büyümenin kontrollü yemlemeyle düzenlenmesini gerektirir. Bu süreçte aşırı gelişen bireylerle geride kalanların aynı sürüde bulunması, yem tahsisini güçleştirir. Dişilerin yumurta üretimine hazırlanması ve erkeklerin uygun kondisyonunun korunması için her zaman ağırlık kayıtlarının fiziksel gelişimle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Erkek ve dişilerin gelişim ve yemleme kayıtlarının ayrı tutulması, farklı gereksinimlerin sürü ortalamasında kaybolmasını önler (Dozier, 2024).

Hudson et al. (2001), yüksek başlangıç üniformitesini daha yüksek yumurta üretimiyle ilişkili bulmuş, ışık uyarımından sonraki

yem arttırma programının erken yumurta üretimi üzerindeki etkisini de ortaya koymuştur. Bu bulgu, büyütme dönemi sonundaki canlı ağırlık dağılımı ile yumurta üretimi başlangıcındaki beslemenin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini gösterir. Üniformitesi düşük bir sürüde uygulanacak programın, bireysel gelişim farklılıkları dikkate alınmadan yalnızca standart yem artışlarına dayandırılması uygun değildir. Petitte et al. (1982) ise daha üniform sürüde üretimin ilk 10 haftasında yumurta veriminin yüksek olduğunu, buna karşılık 28 haftalık değerlendirmede kümülatif yumurta üretimi, yumurta ağırlığı, döllülük ve ölüm oranı bakımından üniformite grupları arasında önemli farklılık bulunmadığını bildirmiştir. Sürünün erken üretim periyodunda gözlenen üstünlüğün toplam üretim dönemine aynı biçimde yansımaması, üniformitenin etkisinin değerlendirme süresine bağlı olabileceğini göstermektedir.

Ticari üretim koşullarında elde edilen bulgular da sürünün üreme özelliklerinin tek bir üniformite parametresiyle açıklanamayacağını desteklemektedir. Abbas et al. (2010) sekiz damızlık sürüyü değerlendirdikleri araştırmalarında, sürü üniformitesinin yüksek olduğu grupta yumurta üretiminin yüksek bulunmasına rağmen en yüksek döllülüğün orta düzeyde üniform olan grupta olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmada yumurta üretimi, döllülük ve kuluçka oranı için en yüksek değerler aynı gruplarda tutarlı bir şekilde gözlemlenmemiştir. Bu nedenle, bu özellikler bağımsız olarak değerlendirilmelidir, çünkü bir parametredeki iyileşme diğerlerinde paralel bir iyileşmeyi mutlaka öngörmez (Houngbo et al., 2026; Fulla & Gebreslassie, 2024).

Damızlık sürülerde erken büyüme dönemi, sonraki gelişim farklılıklarının anlaşılması açısından da ayrıca önemlidir. Asensio et al. (2020), beşinci haftada düşük ağırlıklı olan ve canlı ağırlığa göre sınıflandırma yapılmadan yetiştirilen damızlık tavuklarda, ağır bireylere göre 10-25. haftalar arasında daha yüksek ağırlık değişkenliği belirlemişlerdir. Denemenin 25. haftasında ölüm oranını hafif grupta %20.0, ağır grupta %2.5 olarak belirlemişler ve

hafif dişilerde tibia kemiği uzunluğunu daha düşük bulmuşlardır. Araştırmadan elde edilen bulgular, erken dönem gelişme geriliğinin sonraki yaşama gücü ve iskelet gelişimiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Damızlık yönetiminde canlı ağırlık üniformitesinin iyileştirilmesiyle fizyolojik yeterliliğin aynı şey olmadığı, hassas yemleme çalışmalarında da görülmektedir. Zuidhof (2018), bireysel yemleme ile çok düşük ağırlık değişkenliği sağlanabildiğini göstermekle birlikte, üreme başlangıcının metabolik durum ve vücut kompozisyonuyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Damızlık yetiştiriciliğinde canlı ağırlık bakımından hedeflenen düzeyde üniformiteyi sağlamak başlı başına bir üretim amacı değildir. Büyüme programı, hayvanları üretime hazırlayan gelişim sürecini de desteklemelidir.

Yumurtacı sürülerde üniformite

Ticari yumurtacı sürülerde üniformite, büyütme sonunda bireylerin üretim programına ne ölçüde birlikte hazırlanabildiğini anlamaya yardımcı olur. Sürünün bir bölümünün yeterli gelişime ulaşmadığı koşullarda, yaşa bağlı olarak yapılan yem ve aydınlatma programındaki değişiklikler bütün bireyler için aynı uygunlukta değildir. Bununla birlikte üniformite ile yumurta sayısı arasındaki ilişkinin doğrudan ve değişmez olduğu varsayılmamalıdır. Yumurtacı sürüler üzerinde yapılan araştırmalar, canlı ağırlık, üretime geçiş yaşı ve üniformitenin ayrı değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Kling et al., 1985; Çolak & Yetişir, 2010).

Çolak & Yetişir (2010), iki ticari işletmede dört genotipe ait toplam 25 sürünün kayıtlarını incelemişlerdir. Araştırmada 18. haftadaki üniformite ile yumurta verim özellikleri arasında anlamlı ilişki bulunmamıştır. Buna karşılık %50 verime ulaşma yaşı ile tavuk-gün ve tavuk-kümes esasına göre hesaplanan yumurta verimleri arasında önemli negatif ilişkiler belirlenmiştir. Kling et al. (1985) da sekizinci haftada canlı ağırlığa göre gruplandırılan

yumurtacı piliçlerde üniformitenin yükseldiğini, ancak bu durumun yumurta sayısı veya büyüklüğüyle ilişkisi olmadığını bildirmişlerdir. Aynı araştırmada erken üretim kümesine alınma, rasyonun protein düzeyi ve kafes düzeni de değerlendirilmiştir. Çok sayıda yetiştirme değişkeninin birlikte etkili olduğu böyle bir yapıda, yumurta üretimindeki farkın tamamının üniformiteye bağlanması mümkün değildir.

Yumurtacı sürülerde üniformite değerlendirilirken tek bir tartımın sonucu yerine, büyütme dönemi boyunca canlı ağırlık dağılımında görülen değişimler ve sürünün yumurtlamaya geçişi birlikte ele alınmalıdır. Hayvanların hedef ağırlığa ne zaman ulaştığı, yumurtlamanın başlama zamanı, verimin artış seyri ve yem tüketimi kayıtları, sürünün gelişimini daha sağlıklı değerlendirmeye yardımcı olur. Üniformite kayıtlarının işletmeler arasında karşılaştırılabilmesi için kullanılan ağırlık aralığı ve örnekleme yöntemi de aynı olmalıdır. Aksi hâlde farklı yöntemlerle elde edilen üniformite değerleri biyolojik farklılık varmış gibi yorumlanabilir (Çolak & Yetişir, 2010; Dozier, 2024).

Etlik piliç sürülerinde üniformite

Etlik piliç yetiştiriciliğinde üniformitenin ekonomik karşılığı büyük ölçüde kesime gönderilen sürünün canlı ağırlık dağılımıyla ilişkilidir. Ortalama kesim ağırlığı uygun görünse bile çok hafif ve çok ağır bireylerin oranı yükseldiğinde, hedeflenen ürün aralığına giren karkasların oranı da değişir. Bunun için yetiştirme dönemindeki canlı ağırlık kayıtları ile kesimhane karkas ağırlığı dağılımı ayrı değerlendirilmelidir. Canlı ağırlıktan hesaplanan bir varyasyon katsayısı değeriyle karkas ağırlığı varyasyon katsayısının doğrudan eşit kabul edilmesi, ölçülen özellikler arasındaki farkı göz ardı eder (Vasdal et al., 2019).

Vasdal et al. (2019), Norveç'te 45 ticari Ross 308 sürüsünde kesimhane karkas ağırlığı dağılımından hesaplanan değişkenliği işletme performansıyla ilişkilendirmiştir. Çalışmada, daha düşük üniformite, daha yüksek ilk hafta ve toplam ölüm oranı, daha yüksek

yemden yararlanma oranı ve daha düşük büyüme hızıyla ilişkili bulunmuştur. Canlı ağırlık dağılımındaki farklılıklar performans sorunlarına yol açabilir ancak bu durum düşük üniformitenin tek başına performans kayıplarına neden olduğu şeklinde yorumlanmamalıdır.

Eşey ve besleme ilişkisi etlik piliçlerde ayrıca dikkate alınmalıdır. England et al. (2022), 672 Cobb 500 piliçte tek eşeyli ve eşit oranda karışık eşeyli yetiştirmeyi, standart ve daha düşük ham protein içeren yemle besleme ile karşılaştırmıştır. Deneme koşullarında karışık eşeyli yetiştirme daha iyi canlı ağırlık üniformitesi göstermiş; protein düzeyine verilen yanıtta eşeye bağlı farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Etlik piliçlerde düşük ortalama canlı ağırlıklarda da sürüde yüksek düzeyde üniformitenin sağlanması olasıdır. Sürü genelini benzer düzeyde etkileyen bir problem, büyümeyi hızını azaltırken bireyler arasındaki canlı ağırlık farklarını belirgin biçimde arttırmayabilir. Yerleşim sıklığı ile ilgili çalışmalarda büyüme hızı ve üniformite yanıtlarının her zaman birlikte değişmemesi bu ayrımın önemini göstermektedir (Goo et al., 2019).

Üniformitenin ölçülmesi ve değerlendirilmesi

Tavukçulukta canlı ağırlık bakımından sürü üniformitesinin değerlendirilmesi için sürüdeki hayvan sayısına göre güvenilir bir örnek büyüklüğü belirlenir ve bireysel olarak canlı ağırlık tartımları yapılır. Tartılan hayvanların toplam ağırlığının hayvan sayısına bölünmesi ortalama canlı ağırlığı verir; ancak bireyler toplu tartıldığında ağırlık dağılımı belirlenemez. Varyasyon katsayısı veya belirli canlı ağırlık sınırları içinde kalan hayvanların oranını hesaplayabilmek için her hayvanın ağırlığının ayrı bilinmesi gerekir. Değerlendirmede ortalama canlı ağırlık, üniformite yüzdesi ve varyasyon katsayısı (% CV) birlikte kullanılabilir (Dozier, 2024; Zhou et al., 2023).

Ortalama canlı ağırlık ($\bar{x}$) = Σx_i / n

Formülde x_i bireysel canlı ağırlık, n ise tartılan hayvan sayısıdır. Sürünün ortalama canlı ağırlığının, yetiştirilen genotipin eşeyine ve yaşına özgü damızlıkçı firma tarafından önerilen hedeflerle karşılaştırılması gerekir. Hedef canlı ağırlık ile örneklemin ortalaması birbirinden farklı kavramlar olup, hedef canlı ağırlık; yetiştirme ve besleme programlarının damızlıkçı firmanın önerdiği şekilde birebir uygulandığı durumda sürüden beklenen canlı ağırlık değerini, örnek ortalaması; örnek olarak seçilen ve tartımı yapılan hayvanların ortalama canlı ağırlığını ifade eder. Örnek ortalamasının hedeften ne kadar uzak olduğu aşağıdaki formül ile hesaplanır ancak bu değer üniformitenin tam bir ölçüsü değildir.

Hedeften sapma (%) = [(Ölçülen ortalama − Hedef ağırlık) / Hedef ağırlık] × 100

Yetiştiriciler sürü üniformitesini hesaplarken genel olarak % hesabı kullanır. Örnek olarak seçilen hayvanların canlı ağırlık ortalamasının %10 altı ve %10 üstünde kalan ağırlık değerleri belirlenerek bu aralıkta kalan hayvan sayısı, tartılan hayvan sayısına bölünür. Örneğin 100 hayvanın (örnek olarak seçilip tartılan hayvan sayısı) canlı ağırlık ortalaması 1.000 g ise alt ve üst sınırlar 900 ve 1.100 g'dır. Bu ağırlık sınırları arasında 80 hayvan bulunması, ±%10 hesaplamasına göre üniformitenin %80 düzeyinde sağlandığını gösterir (Dozier, 2024).

Üniformite (%) = (Belirlenen ağırlık aralığındaki hayvan sayısı / n) × 100

Bazı yetiştiriciler ise ± %10 aralığının yüksek bir üniformite kriteri olduğunu düşünür. Bu durumda örneklemin ortalama canlı ağırlığının ± %15'i içinde kalan bireylerin oranını hesaplar ve sürü üniformitesini buna göre değerlendirir. Üniformite hesabında ±%15 aralığı kullanıldığında aynı örnek için alt ve üst sınırlar 850-1.150 g olur. ±%15 gibi daha geniş bir aralığa göre hesap yapılması aynı sürüde daha yüksek ya da en azından eşit bir üniformite yüzdesi verir. Bu nedenle kayıt kartlarına sadece "üniformite %85" şeklinde

yazmak yeterli değildir, ±%10 ya da ±%15'e göre hesap yapıldığı mutlaka belirtilmelidir (Dozier, 2024). Bu yöntemde, oransal değerler ne kadar büyükse, sürü o kadar üniform demektir. Ancak bu yöntem, sürü ortalamasına yakın olan tavukların sayısı hakkında bilgi verir, fakat diğer tavukların ortalamadan ne kadar uzak olduğu hakkında bir bilgi vermez.

Tavukçulukta sürü üniformitesinin hesaplanmasında yararlanılan bir diğer yöntem Varyasyon Katsayısı (% CV) yöntemidir. Bu yöntemde, bütün sürünün bireysel olarak tartıldığı durumda sürünün canlı ağırlık ortalaması ve standart sapması hesaplanır. Varyasyon katsayısı, standart sapmanın ortalama canlı ağırlığa oranının yüzde olarak ifadesidir (National Institute of Standards and Technology [NIST] a, b).

Örnek standart sapması (s) = $\sqrt{[\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]}$

CV (%) = $(s / \bar{x}) \times 100$

% CV'nin ağırlık aralığından tahmin edildiği daha pratik bir yöntemde sürüyü temsil edecek bir örnek büyüklüğü tartılarak en düşük ve en yüksek canlı ağırlık arasındaki fark belirlenir, aşağıdaki formül yardımıyla varyasyon katsayısı hesaplanır.

CV (%) = [(En yüksek canlı ağırlık − En düşük canlı ağırlık) × 100] / (Ortalama canlı ağırlık × F_{tablo})

Belirli bir canlı ağırlık aralığının kullanıldığı bu yöntem, değişkenliği yalnızca iki uç ağırlıktan tahmin eder, en yüksek ve en düşük ağırlık arasındaki hayvanların nasıl dağıldığını hesaba katmaz. % CV yöntemine göre hesaplama yapıldığında sürüde varyasyon katsayısının %12'den az olması hedeflenir. Varyasyon katsayısı küçüldükçe, sürü üniformitesi artar.

Sürü üniformitesini hesaplamak amacıyla örnekleme yapılırken kümesin farklı bölgeleri temsil edilmelidir. Yerde yetiştirmede yalnızca kolay yakalanan veya yemlik yakınında bulunan hayvanların seçilmesi sistematik yanlılığa yol açabilir. Belirlenen bir bölmedeki hayvanların yakalama kolaylığına göre ayıklanmadan tartılması ve örnekleme yerlerinin kaydedilmesi,

karşılaştırılabilirliği arttırır. Örnek sayısı sürü büyüklüğüne göre belirlenmelidir. Çok sayıda hayvan tartılması örnekleme hatasını azaltır. Ancak işgücü ve zaman kaybı fazladır, stresi arttırır. Genelde sürünün %1-5'ini tartmak yeterlidir. Haftalık tartımların benzer gün ve saatlerde, yemlemeye göre benzer zaman aralığında yapılması ve terazinin kontrol ağırlıklarıyla doğrulanması gerekir.

Otomatik tartım sistemleri, gün boyunca çok sayıda kayıt oluşturarak canlı ağırlık değişikliklerini daha sık izlemeye olanak verir. Bununla birlikte çok sayıda tartım kaydı her zaman çok sayıda farklı hayvanın ölçüldüğü anlamına gelmez. Otomatik tartım platformunu sık kullanan bireyler tekrar tekrar ölçülebilir, aynı anda birden fazla hayvanın çıkması da hatalı kayıt oluşturabilir. Zhou et al. (2023) tarafından ticari koşullarda geliştirilen sistem, tekrarlayan okumalar ve aykırı değerlerin işlenmesinin önemini göstermektedir. Otomatik kayıtların dönemsel manuel tartımla karşılaştırılması bu nedenle gereklidir. Tekrarlayan veya yanlış tartım değerleri ayıklanırken gerçek hafif veya ağır bireylerin otomatik olarak hata sayılarak canlı ağırlık dağılımını daraltmamasına dikkat edilmelidir.

Üniformiteyi etkileyen etmenler ve yönetim uygulamaları

Üniformiteyi etkileyen etmenler değerlendirilirken önce sürüde canlı ağırlık farklılıklarının başladığı dönem belirlenmelidir. Kümese civciv veya yarka kabulünde mevcut bir canlı ağırlık farklılığı ile büyütme sırasında ortaya çıkan ağırlık dağılımı genişlemesi aynı yönetim sorununu göstermeyebilir. Kümese ilk girişte başlangıç canlı ağırlıklarının kayıt altına alınması sonraki tartımların yorumunu kolaylaştırır. Sürü ortalamasının hedef canlı ağırlık düzeyine yaklaşmasına rağmen varyasyon katsayısının yükselmesi, düşük ve yüksek ağırlıklı bireylerin birbirinden uzaklaşması olasılığını düşündürür. Böyle bir durumda besleme ve/veya manejman pratiklerine müdahale kararı, tek bir haftanın/tartımın sonucundan çok ardışık ölçümlere ve aynı dönemdeki işletme kayıtlarına dayanmalıdır (Asensio et al., 2020; Zhou et al., 2023).

Sürünün genetik yapısı ve eşey, karşılaştırmanın biyolojik çerçevesini oluşturur. Farklı genotiplerin veya erkek ve dişilerin aynı büyüme eğrisini izlemesi beklenemez. Bu grupların birlikte değerlendirilmesi, grubun kendi içindeki değişkenlikle gruplar arasındaki ortalama ağırlık farkını aynı dağılımda birleştirir. Bununla birlikte, verim yönüne bağlı olarak erkek ve dişilerin ayrı yetiştirilmesinin sürü üniformitesine etkisi, uygulanan besleme programına ve yetiştirme koşullarına göre değişebilir. England et al. (2022) etlik piliçlerde sürü üniformitesini değerlendirdikleri çalışmalarında erkek-dişi karışık ve ayrı eşey olarak yetiştirdikleri etlik piliçlerin yemin protein düzeyine farklı yanıt verdiğini göstermişlerdir. Bu nedenle işletmeler arasında sürü üniformitesi karşılaştırılırken kullanılan genotip ve sürüdeki erkek-dişi oranı dikkate alınmalı, canlı ağırlık dağılımındaki farklılıklar yalnızca yetiştirme ve yönetim koşullarına bağlanmamalıdır. Kümese girişte civciv başlangıç ağırlığındaki farklılıklar kadar ilk dönemde büyümenin gerçekleştiği koşullar da önemlidir. Dolayısıyla düşük canlı ağırlığa sahip bireylerin sonraki gelişim düzeylerinin ayrıca izlenmesi, bu hayvanlardaki büyüme geriliğinin sürünün genel ortalamasında görünmez hâle gelmesini önler. Asensio et al. (2020) etlik damızlık tavuklarda canlı ağırlığın üniformite, yaşama gücü ve iskelet gelişimi üzerine etkisini araştırmışlar ve sonuç olarak sadece sürüdeki düşük canlı ağırlığa sahip bireylerin belirlenmesiyle yetinilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, uygulamada bu hayvanların yem ve suya yeterince ulaşıp ulaşamadıkları, fiziksel gelişimleri ve sağlık durumları birlikte değerlendirilmelidir. Yani düşük canlı ağırlığın nedeni ortaya konmadan yalnızca yem miktarını artırmak, erişim veya sağlık sorunundan kaynaklanan farklılığı gidermeyebilir.

Yemleme yönetiminde, sürüye verilen toplam yem miktarının yanı sıra her hayvanın bu yemden yeterince yararlanıp yararlanamadığı da dikkate alınmalıdır. Özellikle sınırlı yemleme uygulanan sürülerde, toplam yem miktarı gereksinimi karşılasa bile

bazı hayvanlar yeterli miktarda yem tüketemeyebilir. Bu nedenle hayvan başına düşen yemlik alanı, yemlik yüksekliğinin hayvanların gelişimine uygunluğu ve yemin kümes genelinde hızlı ve eşit biçimde dağıtılması büyük önem taşımaktadır. Dozier (2024), hızlı ve eşit yem dağıtımını, yemliklerin çalışmasının denetlenmesini ve altlık düzeyine bağlı yükseklik farklılıklarının giderilmesini manejman uygulamalarının temel unsurları arasında göstermektedir. Yönetim açısından önemli olan, günlük hesaplanan yem miktarının kümes içindeki bütün yemliklerde 3-4 dakika gibi kısa bir zaman aralığında erişilebilir hâle gelmesidir.

Yemin formu yani fiziksel yapısı da aynı çerçevede değerlendirilmelidir. Xu et al. (2015), etlik piliçlerde ilk 14 gün kırıntı ve toz yem tüketiminin sürü üniformitesi ve performans parametreleri üzerine etkisini değerlendirmişler, kırıntı yemin toz yeme göre canlı ağırlık üniformitesini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Bu bulgu, rasyonun yalnızca kimyasal bileşiminin değil, hayvanın yemi tüketebilmesini etkileyen fiziksel özelliklerinin de önemli olduğunu gösterir. Hangi yem formunun kullanılacağına hayvanların verim yönü, yaşı, tüketim hızı ve yem dağıtım sisteminin özelliklerine göre karar verilmelidir.

Kümes içi yerleşim sıklığı da sürü üniformitesini etkileyen önemli etmenlerdendir. Goo et al. (2019), Ross 308 etlik piliçlerde 1-28 günler arasında yerleşim sıklığının performansa etkisini değerlendirmişler, yüksek yerleşim sıklığında canlı ağırlık artışı ve yem tüketiminin azaldığını, bağırsak bariyer işlevinin olumsuz etkilendiğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, üniformite sonuçlarına göre büyümedeki düşüşün her zaman daha geniş ağırlık dağılımıyla birlikte ortaya çıkmadığını belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada yerde yetiştirilen Lohmann LB-Lite kahverengi yumurtacı piliçlerde yüksek yerleşim sıklığının üniformiteyi düşürdüğü, ancak beyaz genotipte ters yönde sonuç elde edildiği ve etkinin genotipe bağlı olduğunu bildirilmiştir (Abraham et al., 2024). Bu nedenle yerleşim sıklığı belirlenirken yalnızca üniformite

üzerinden karar verilmemeli, hayvan başına ekipman erişimi, büyüme ve sağlık bulguları da incelenmelidir.

Sıcaklık, hava hareketi ve diğer çevresel koşulların kümes içindeki bölgelere göre farklılık göstermesi, hayvanların aynı ortamdan eşit biçimde yararlanmasını etkiler. Hayvanların belirli alanlarda toplanması veya bazı alanları kullanmaktan kaçınması kümes içi çevrenin kümesin her yerinde ideal olmadığının göstergesidir. Dolayısıyla yalnızca kümes ortalamasına dayanan çevresel ölçümler hayvanların bulunduğu iç ortam koşullarını yeterince yansıtmayabilir. Sağlık sorunları da bireyleri farklı düzeylerde etkileyerek yem tüketimi ve besin maddelerinden yararlanma bakımından sürü içindeki farklılıkları artırabilir. Choi et al. (2026), sürü üniformitesinin genetik özellikler, başlangıç canlı ağırlığı, yaş ve eşeyin yanı sıra besleme, barındırma ve sürü yönetimi uygulamalarından etkilendiğini belirtmiştir. Araştırıcılar, ısı stresi, besin madde yetersizlikleri, enfeksiyonlar ve yüksek yerleşim sıklığı gibi olumsuz koşulların bireyler arasındaki canlı ağırlık farklılıklarını artırarak üniformiteyi azaltabileceğini vurgulamıştır. Bu etmenlerin birlikte değerlendirilmesi, üniformitenin korunmasına yönelik yönetim uygulamalarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Sürü üniformitesinin bozulduğu durumlarda hayvanları canlı ağırlıklarına göre gruplandırmak farklı gelişim düzeyindeki bireylerin ayrı yönetilmesini sağlar. Zuidhof et al. (2015), dört haftalık aralıklarla canlı ağırlıklarına göre hafif, orta ve ağır gruplara ayrılan etlik damızlıklarda, 22. haftada canlı ağırlık varyasyon katsayısını %6.2 olarak belirlerken, kontrol grubunda bu değerin %15'in üzerinde olduğunu bildirmişlerdir. Canlı ağırlığa göre gruplandırılan hayvanlarda incik uzunluğu, göğüs genişliği ve göğüs kası ağırlığı bakımından da en düşük değişkenlik saptanmıştır. Bu bulgular, canlı ağırlığa göre düzenli gruplandırmanın hem canlı ağırlık hem de vücut gelişimi açısından üniformitenin iyileştirilmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Burada

önemli olan üniformitedeki iyileşmenin daha erken gözlenmesi için grupların ağırlık sınıflarının çok dar olmaması ve genotipe özgü büyüme eğrileriyle uygunluğunun düzenli olarak izlenmesidir. Hafif grupta yeme erişimin sağlanması, ağır grupta aşırı gelişimin önlenmesi ve ekipman kapasitesinin yeniden düzenlenmesi gerekir (Zuidhof et al., 2015; Dozier, 2024).

Sürü üniformitesinin iyileştirilmesi için hassas yemleme uygulamasında, canlı ağırlığa göre gruplandırmadan farklı olarak, her hayvanın canlı ağırlığı hedef ağırlıkla karşılaştırılarak yeme erişiminin bireysel olarak düzenlenmesi amaçlanır. Zuidhof et al. (2017), aynı bölmede yetiştirilen 20 adet etlik dişi damızlık piliçte yürüttükleri prototip çalışmada hedef ağırlığın altında kalan hayvanlara kısa öğünlerde küçük miktarlarda yem vermişler, hedefe ulaşanlara ise yem verilmemiştir. Sonuç olarak denemenin 20. haftasında varyasyon katsayısı %2'nin altına düşmüştür. Bulgular, bu deneme koşullarında bireysel ağırlığa dayalı yemleme ile yüksek üniformite sağlanabildiğini, yani bireysel ağırlık kontrolünün teknik olarak mümkün olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, küçük ölçekli bir prototip denemesinin bütün ticari sürülerde aynı ekonomik ve üreme performansı sonucunu sağlayacağı varsayılamaz. Ticari uygulamadaki başarı için hayvanların sisteme uyumu, bu sistemin kapasitesi ve hedef büyüme programı ayrıca incelenmelidir. Otomatik tartım, bireysel yemleme ve gelecekte kullanılabilecek görüntüleme sistemleri sürü üniformitesinin değerlendirilmesini destekler ancak sadece canlı ağırlık ölçümlerinden sürüdeki sorunun nedeni kesin olarak belirlenememektedir. Yeni bir sistemin başarısı, ölçüm doğruluğunun yanında canlı ağırlıklarda erken fark edilen sapmaların uygun müdahaleye dönüşüp dönüşmediğiyle de değerlendirilmelidir (Zhou et al., 2023; Zuidhof et al., 2017).

Üniformitenin korunması, hayvanların gelişim özellikleri ile besleme, barındırma ve sağlık koşullarının birlikte ele alınmasını gerektirir. Aynı sürüdeki hayvanların yem ve suya yeterli düzeyde

erişebilmesi, çevre koşullarının kümes genelinde uygun olması ve sağlık sorunlarının zamanında belirlenmesi ağırlık farklılıklarının azaltılmasında önem taşır. Damızlıklarda canlı ağırlığa göre gruplandırma ve bireysel gereksinimleri gözeten yemleme uygulamaları yararlı olabilir, ancak bu uygulamalar sürünün gelişimine ve işletmenin koşullarına göre düzenlenmelidir. Düzenli tartımlarda ortalama ağırlıkla birlikte ağırlık dağılımının da izlenmesi, sürü içindeki farklılıkların çok geç olmadan fark edilmesini sağlar. Kümes manejmanında esas olan düşük üniformite saptandığında yalnızca yem miktarını değiştirmek yerine farklılığın kaynağını belirleyerek buna uygun önlem almaktır.

Sonuç

Sürü üniformitesinin yetiştiricilikteki önemi, hayvanlardaki bireysel gelişim farklılıklarını görünür kılması ve ortak yönetim programlarının uygulanmasına yardımcı olmasıdır. Damızlıklarda üreme dönemine hazırlık, yumurtacılarda büyütmeden yumurta üretimine geçiş, etlik piliçlerde kesim ağırlığı dağılımı üniformite değerlendirmesinin yapıldığı başlıca alanlardır. Bununla birlikte yapılan çalışmalar üniformite artışının sürünün bütün verim özelliklerine aynı biçimde yansımadığını göstermektedir. Bu nedenle üretimin başarısı tek bir üniformite yüzdesiyle açıklanmamalıdır.

Uygulamada ortalama canlı ağırlığın, genotipe özgü hedef canlı ağırlık ile karşılaştırılması, bireysel ağırlık dağılımının varyasyon katsayısı ve/veya üniformite yüzdesiyle izlenmesi ve ölçümlerin zaman içindeki seyrinin değerlendirilmesi gerekir. Canlı ağırlıklardaki sapmalar ile yem ve suya erişim, çevre ve sağlık kayıtları birlikte incelenmeli, hayvanları ağırlıklarına göre gruplandırma veya yemleme değişikliği belirlenen gereksinime göre yapılmalıdır. Büyümenin uygun hedefte sürdürülmesi ve fiziksel/fizyolojik gelişim düzeyinin sağlanması, dar bir ağırlık dağılımı elde etmekten daha geniş bir yetiştirme sorumluluğudur.

Kaynakça

Abbas, S. A., Gasm Elseid, A. A., & Ahmed, M.-K. A. (2010). Effect of body weight uniformity on the productivity of broiler breeder hens. *International Journal of Poultry Science, 9*(3), 225–230. https://doi.org/10.3923/ijps.2010.225.230

Abraham, M. E., Robison, C. I., Serpa, P. B. S., Strandberg, N. J., Erasmus, M. A., Fraley, G. S., Erf, G. F., & Karcher, D. M. (2024). Cage-free pullets minimally affected by stocking density stressors. *Animals, 14*(10), Article 1513. https://doi.org/10.3390/ani14101513

Anene, D. O., Akter, Y., Thomson, P. C., Groves, P., & O'Shea, C. J. (2020). Variation and association of hen performance and egg quality traits in individual early-laying ISA Brown hens. *Animals, 10*(9), Article 1601. https://doi.org/10.3390/ani10091601

Asensio, X., Piedrafita, J., Puente, A., & Barroeta, A. C. (2020). Effect of body weight on uniformity, livability, and skeletal development and strength of broiler breeder females. *Journal of Applied Animal Research, 48*(1), 320–325. https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1789647

Choi, J., Goo, D., Ko, H., Lee, J., & Kim, W. K. (2026). Factors affecting flock uniformity in broiler production: Individual, environmental, and management characteristics. *Animals, 16*(2), Article 185. https://doi.org/10.3390/ani16020185

Çolak, A., & Yetişir, R. (2010). Yumurtacı piliçlerde, 18. haftalık yaştaki canlı ağırlık ve sürü üniformitesinin verim dönemi bazı performans kriterlerine etkileri üzerinde bir araştırma. *Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 24*(3), 9–20. https://dergipark.org.tr/tr/pub/selcukjafsci/article/1290469

Dozier, W. A. (2024). Managing uniformity in rearing: Feeder space and feed distribution. Alabama Cooperative Extension System. https://www.aces.edu/blog/topics/commercial-

poultry/managing-uniformity-in-rearing-feeder-space-and-feed-distribution/ (Erişim tarihi: 01 Ekim 2026)

England, A. D., Gharib-Naseri, K., Kheravii, S. K., & Wu, S.-B. (2022). Rearing broilers as mixed or single-sex: Relevance to performance, coefficient of variation, and flock uniformity. *Poultry Science, 101*(12), Article 102176. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102176

Fulla, S., & Gebreslassie, A. (2024). Evaluation of egg production, fertility, hatchability, embryonic mortality and chick quality of different chickens. *International Journal of Animal Science and Technology, 8*(3), 55–65. https://doi.org/10.11648/j.ijast.20240803.14

Goo, D., Kim, J. H., Choi, H. S., Park, G. H., Han, G. P., & Kil, D. Y. (2019). Effect of stocking density and sex on growth performance, meat quality, and intestinal barrier function in broiler chickens. *Poultry Science, 98*(3), 1153–1160. https://doi.org/10.3382/ps/pey491

Houngbo, M. Z., Koura, B. I., Oke, O. E., & Aboh, B. A. (2026). Laying performance, hatching egg characteristics, chick quality, and early growth of three indigenous chicken ecotypes in Benin under intensive management. *Poultry Science, 105*(3), Article 106347. https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.106347

Hudson, B. P., Lien, R. J., & Hess, J. B. (2001). Effects of body weight uniformity and pre-peak feeding programs on broiler breeder hen performance. *The Journal of Applied Poultry Research, 10*(1), 24–32. https://doi.org/10.1093/japr/10.1.24

Kling, L. J., Hawes, R. O., Gerry, R. W., & Halteman, W. A. (1985). Effects of early maturation of brown egg-type pullets, flock uniformity, layer protein level, and cage design on egg production, egg size, and egg quality. *Poultry Science, 64*(6), 1050–1059. https://doi.org/10.3382/ps.0641050

National Institute of Standards and Technology (a). Coefficient of variation. Dataplot reference manual. https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman2/auxillar/coefvari.htm (Erişim tarihi: 15 Ekim 2026)

National Institute of Standards and Technology (b). Measures of scale. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda356.htm (Erişim tarihi: 15 Ekim 2026)

Petitte, J. N., Hawes, R. O., & Gerry, R. W. (1982). The influence of flock uniformity on the reproductive performance of broiler breeder hens housed in cages and floor pens. *Poultry Science, 61*(11), 2166–2171. https://doi.org/10.3382/ps.0612166

Vasdal, G., Granquist, E. G., Skjerve, E., de Jong, I. C., Berg, C., Michel, V., & Moe, R. O. (2019). Associations between carcass weight uniformity and production measures on farm and at slaughter in commercial broiler flocks. *Poultry Science, 98*(10), 4261–4268. https://doi.org/10.3382/ps/pez252

Xu, Y., Stark, C. R., Ferket, P. R., Williams, C. M., & Brake, J. (2015). Effects of feed form and dietary coarse ground corn on broiler live performance, body weight uniformity, relative gizzard weight, excreta nitrogen, and particle size preference behaviors. *Poultry Science, 94*(7), 1549–1556. https://doi.org/10.3382/ps/pev074

Zhou, D., Zhou, Y., He, P., Yu, L., Pan, J., Chai, L., & Lin, H. (2023). Development of an automatic weighing platform for monitoring bodyweight of broiler chickens in commercial production. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 10*(3), 363–373. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2023510

Zuidhof, M. J. (2018). Lifetime productivity of conventionally and precision-fed broiler breeders. *Poultry Science, 97*(11), 3921–3937. https://doi.org/10.3382/ps/pey252

Zuidhof, M. J., Fedorak, M. V., Ouellette, C. A., & Wenger, I. I. (2017). Precision feeding: Innovative management of broiler breeder feed intake and flock uniformity. *Poultry Science, 96*(7), 2254–2263. https://doi.org/10.3382/ps/pex013

Zuidhof, M. J., Holm, D. E., Renema, R. A., Jalal, M. A., & Robinson, F. E. (2015). Effects of broiler breeder management on pullet body weight and carcass uniformity. *Poultry Science, 94*(6), 1389–1397. https://doi.org/10.3382/ps/pev064

BÖLÜM 2

BÖLÜM X

FONKSİYONEL BİR GIDA OLAN BALIN YAPISI VE İNSAN SAĞLIĞINDAKİ YERİ

Prof. Dr. Sezai ALKAN[1]

[1] Ordu Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü, Ordu, Türkiye.
sezaialkan61@gmail.com, Orcid ID: 0000-0003-0601-0122

GİRİŞ

Balın yapımı; çiçek nektarının, bitkilerin canlı dokularından salgılanan tatlı sıvıların veya bitki özsuyu ile beslenen bazı böceklerin şekerli salgılarının bal arıları tarafından toplanarak kovana getirilmesi ve petek gözlerine doldurulmasıyla başlar. Petek gözlerine aktarılan bu hammadde, arıların salgıladığı enzimlerle zenginleştirilip, fiziksel ve kimyasal yapısı çeşitli biyolojik süreçlerle değiştirildikten sonra su içeriği büyük ölçüde azaltılarak olgunlaştırılır ve petek gözlerinde depolanır. Böylece bal, doğal, tatlı ve besin değeri yüksek bir arı ürünü haline gelir (Anonim, 2020; Mutlu ve ark. 2017; Bengü, 2022; Bakoğlu ve ark. 2014).

Genel olarak bal, elde edildiği kaynağa bağlı olarak kendine has tat ve kokuya sahiptir. Bununla birlikte bala uygulanan ısıtma, işleme, depolama ve hasat gibi işlemler, balın özgün tat ve aromasını değiştirebilmekte ve buna bağlı olarak balın karakteristik özelliklerinde bazı değişiklikler meydana gelebilmektedir. Aynı zamanda balın rengi de elde edildiği kaynağa göre değişebilmekte ve bal su beyazından siyaha yakın koyu tonlara kadar geniş bir varyasyon gösterebilmektedir (Al-Kafaween ve ark. 2023).

1. BALIN YAPIMI

Bal arısı kolonilerinde görev yapan tarlacı işçi arılar tarafından nektar ve bal çiyi gibi şekerli hammaddelerin toplanarak kovana getirilmesi bal yapımının ilk aşamasıdır. Bal midesinde kovana taşınan bu hammadde, kovan içi görevleri üstlenen genç işçi arılara aktarılır. Yalayıcı-emici ağız yapısına sahip genç işçi arılar, aldıkları nektarı hortumları üzerinde ince bir damla halinde defalarca dışarı verip geri alarak sıvının hava ile temas etmesini sağlar. Bu uygulama ile nektarın yapısında bulunan suyun belirli bir kısmı buharlaşma yoluyla havaya verilir. Nektarın kovana taşınması ve işçi arılarca olgunlaştırılması sürecinde; arıların sindirim kanalı ile yutak üstü bezlerinden salgılanan enzimler nektara karışarak onun biyokimyasal yapısını değiştirir. Bu süreçte nektara geçen glukoz oksidaz enzimi, glikozun oksitlenmesini sağlayarak glukonik asit ve hidrojen peroksit bileşiklerinin oluşmasını sağlar. Bu süreçte bal midesi ile orta bağırsak arasında yer alan ön mide (proventrikulus), bal midesindeki sıvıda bulunan polen gibi katı parçacıkları

süzerek sindirim kanalına iletirken sıvı kısmın bal midesinde kalmasını sağlar. Daha sonra bu sıvı, arıların kanat çırparak oluşturduğu sürekli hava akımı ile neminin uzaklaştırıldığı petek gözlerine yerleştirilir. Olgunlaşma sırasında su oranı %20'nin altına (çoğunlukla %17-18 düzeyine) düşürülen bal, petek gözlerinde depolanarak üzeri ince bir balmumu tabakasıyla sırlanır. Tarlacı bir işçi arı her uçuşta ortalama 40 mg kadar nektar taşıyabilmektedir; bu miktar arının kendi ağırlığının yaklaşık yarısına karşılık gelir. Bu yükü tamamlayabilmek için arı, çiçeklerin nektar verimine bağlı olarak tek bir uçuşta 50 ile 1.000 arasında çiçeği ziyaret edebilmektedir.

Arının günlük uçuş sayısı, nektar kaynağının kovana olan uzaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte bir tarlacı arı günde ortalama 10-12 kez nektar toplamaya çıkmakta ve her uçuş yaklaşık 30-45 dakika sürmektedir. İki uçuş arasında kovanda geçirilen süre ise ortalama 4 dakika kadardır. Bitki türüne göre farklılık göstermekle birlikte nektarın bileşiminde %50-70 su, %10-50 şeker, %1-4 aromatik maddeler, çeşitli enzimler ve mineral maddeler bulunmaktadır. Nektardaki sakaroz oranı başlangıçta %30-35 düzeyindedir. Sakaroz, invertaz enzimi aracılığıyla balın temel şekerleri olan glikoz ve fruktoza parçalanır (Winston, 1987; Doğaroğlu, 2009).

2. BALIN YAPISI

Balın yaklaşık %80'ini çeşitli şekerler, %17 kadarını ise su oluşturmaktadır. Geri kalan yaklaşık %3'lük kısım ise protein, amino asit, enzim, mineral, vitamin, organik asit ve fenolik maddelerden oluşmaktadır. Balda; demir, bakır, potasyum, kalsiyum, magnezyum, fosfor, silisyum, alüminyum, krom, nikel ve kobalt gibi mineral ve iz elementler de bulunmaktadır. Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği'ne (2020/7) göre çiçek balında bulunması gereken standart değerler; nem en fazla %20, sakaroz en fazla 5 g/100 g, fruktoz + glikoz en az 60 g/100 g, fruktoz/glikoz 0,9-1,4 arasında, suda çözünmeyen madde en fazla 0,1 g/100 g, elektrik iletkenliği en fazla 0,8 mS/cm, diastaz sayısı en az 8, HMF en fazla 40 mg/kg, C4 şekeri en fazla %7, prolin en az 300 mg/kg ve serbest asitlik en fazla 50 meq/kg şeklindedir (Mutlu ve ark. 2017; Özmen ve Alkın, 2006; İslam ve ark. 2012; Bengü, 2022; Al-Kafaween ve ark. 2023).

2.1. Karbonhidratlar

Balın temel bileşeni karbonhidratlar olup toplam ağırlığın yaklaşık %75–85'ini oluşturmaktadır. Bu karbonhidratlar çoğunlukla basit şekerler (monosakkaritler) ve daha az miktarda disakkaritler ile oligosakkaritlerden oluşmaktadır. Balın karbonhidrat yapısı; nektar kaynağına, bitki türüne ve balın olgunlaşma düzeyine göre değişiklik gösterebilmektedir.

2.1.1. Monosakkaritler

Balın en büyük karbonhidrat grubunu monosakkaritler oluşturmaktadır. Balda en fazla bulunan şeker fruktoz olup oranı yaklaşık olarak %35-45 arasında değişmektedir. Balın belirgin tatlılığı büyük ölçüde fruktozdan kaynaklanmaktadır. Fruktoz higroskopik özelliğe sahip olup balın nem çekmesine katkıda bulunmaktadır. Glikoz (dekstroz) balda ikinci en yüksek oranda bulunan şekerdir. Genellikle glikoz balda %25-40 arasında bulunmaktadır. Glikoz, balda meydana gelen kristalleşmeden büyük ölçüde sorumludur. Glikoz oranı yüksek olan ballar daha hızlı kristalize olmaktadır. Genel olarak balın enerji değeri oldukça yüksek olup yaklaşık olarak 100 gram bal 300 - 320 kilokalori enerji sağlamaktadır.

2.1.2. Disakkaritler

Balda daha düşük miktarda disakkaritler bulunmaktadır. Bu grup içerisinde bulunan sakaroz bitkilerden elde edilen nektarın temel şekeri olup arılar tarafından invertaz enzimi ile parçalanmaktadır. Balda ortalama olarak %0,5–5 arasında değişen oranlarda bulunmaktadır. Baldaki yüksek sakaroz oranı balın tam olgunlaşmadığının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Baldaki maltoz oranı genel olarak %1-8 arasında değişmektedir. Maltoz balın aroma ve tat özelliklerine katkı sağlamaktadır. İzomaltoz balda az miktarda bulunan disakkaritlerden biridir. Balın olgunlaşması sırasında oluşabilmektedir. Turanoz, kojibioz ve nigeroz da balda bulunan diğer disakkaritlerdendir.

2.1.3. Oligosakkaritler

Balda düşük miktarlarda oligosakkaritler de bulunmaktadır. Balda bulunan başlıca oligosakkaritler erloz, melezitoz, rafinoz ve maltotriozdur. Balda bulunan bu bileşikler balın prebiyotik özellik göstermesine, aroma oluşumuna ve viskozitesine katkı sağlamaktadır.

2.2. Su

Balın ikinci büyük bileşenini su oluşturmaktadır. Baldaki su oranı genellikle %10–20 arasında değişmekte olup bu değer Bal Tebliği'ne göre %20'yi geçmemelidir. Su miktarı balın dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksek su içeriği maya gelişimini kolaylaştırarak fermantasyon riskini artırmakta ve balın raf ömrünü kısaltmaktadır. Düşük su içeriği ise balın daha uzun süre dayanmasını sağlamaktadır. Bal higroskopik olduğundan ortamdaki nemi çekebilmektedir. Balın bünyesindeki su miktarı; ürünün ne zaman toplanıp sağından geçirildiğine, peteklerin sırlanma oranına, sağım anındaki hava şartlarına ve saklama ortamının niteliğine bağlı olarak belirgin değişiklik gösterir (Mutlu ve ark. 2017; Anonim, 2020; Nombre ve ark. 2010; Stephens ve ark. 2015).

2.3. Protein ve Amino Asit Yapısı

Bal düşük miktarda protein içermesine rağmen biyolojik açıdan önemli amino asitlere sahiptir. Balda bulunan başlıca amino asitler prolin, lizin, alanin, fenilalanin, tirozin ve valindir. Prolin miktarı balın olgunlaşma düzeyinin belirlenmesinde kalite kriteri olarak değerlendirilmektedir. Protein miktarı düşük olmasına rağmen balın besleyici özelliklerine katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda, baldaki serbest amino asitlerin %50-85'ini büyük ölçüde arı salgılarından kaynaklanan prolinin oluşturduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla prolin miktarı, balın kalitesini doğrulama ve tağşiş (sahtecilik) durumlarını saptamada kilit bir gösterge kabul edilmekte olup Bal Tebliği uyarınca balda en az 300 mg/kg prolin bulunması zorunludur. Arının genotipine ve bitki florasına bağlı olarak değişmekle birlikte balda yaklaşık %0,1–0,5 oranında protein bulunmaktadır (Mutlu ve ark. 2017; Anonim, 2020; İslam ve ark. 2012; Bengü, 2022; Babacan ve Rand, 2005; Al-Kafaween ve ark. 2023).

2.4. Enzim Yapısı

Balın biyolojik aktivitesini belirleyen önemli bileşenlerden biri de enzimlerdir. Bu enzimlerin büyük bölümü arı kaynaklı olup bir kısmı da nektar ve polenden gelmektedir; enzimler balın olgunlaşma sürecinde görev almaktadır. Bal, miktarca az olmakla birlikte biyolojik açıdan önemli doğal enzimler içeren bir besin maddesidir. Balda bulunan başlıca enzimler invertaz (α-glukozidaz), diastaz (amilaz), glukoz oksidaz, katalaz ve asit fosfatazdır. Nektar ve arı kaynaklı bir enzim olan diastaz, ısıl işlem ve depolama sırasında aktivitesini kaybettiğinden balın tazeliğinin belirlenmesinde bir kriter olarak kullanılmaktadır (Sak-Bosnar ve Sakac, 2012; Bengü, 2022; Bogdanov ve ark. 2008). İşçi arıların yutak üstü bezlerinden salgılanan invertaz enzimi, nektarın kovana taşınması ve olgunlaşması aşamalarında bala aktarılır. Balın maruz kaldığı sıcaklık yükseldikçe bu enzimin aktivitesinde düşüş gözlenir; yüksek ısı işlemine tabi tutulan ballarda ise invertaz aktivitesi tamamen yok olabilmektedir. Arı ve bitki kaynaklı olan diastaz enzimi, nişastayı dekstrinlere ve maltoza parçalamaktadır. Bu enzim yutak üstü bezi tarafından salgılanmaktadır. Diastaz ısıya oldukça duyarlı olup aktivitesi ısıtma ve depolama süresine bağlı olarak düşmektedir. Diastaz sayısı; 1 g balda bulunan amilaz enzimlerinin 40°C'de 1 saat içerisinde parçaladığı %1'lik nişasta çözeltisinin mL cinsinden miktarını ifade etmektedir. Balın içerdiği diyastazın 90-100°C arasında geri dönülemez olarak aktivitesini kaybettiği bildirilmektedir (Karadal ve Yıldırım, 2012; Mutlu ve ark. 2017; Bengü, 2022; Young ve Blundell, 2023).

2.5. Organik Asit Yapısı

Bal hafif asidik özellik gösteren bir besin maddesidir. Balın pH değeri genellikle 3,2–4,5 arasında değişmektedir. Bu asidik yapı balda mikroorganizmaların gelişimini sınırlandırmaktadır. Balda bulunan başlıca organik asitler glukonik asit, malik asit, sitrik asit, formik asit ve oksalik asittir. Balın asiditesinden en fazla sorumlu olan bileşik glukonik asittir. Organik asitler aynı zamanda balın aroma ve lezzet oluşumunda da rol oynamaktadır (Bengü, 2022; Al-Kafaween ve ark. 2023).

2.6. Mineral Madde Yapısı

Bal, çeşitli mineral maddeler içeren doğal bir besin maddesidir; toplam mineral madde miktarı açık renkli ballarda yaklaşık %0,04, koyu renkli ballarda ise %0,2 düzeyindedir. Mineral içeriği balın elde edildiği floraya ve coğrafi bölgeye göre önemli oranda değişmektedir. Balda bulunan başlıca mineraller potasyum, kalsiyum, magnezyum, demir, çinko, bakır, fosfor ve manganezdir. Koyu renkli ballarda mineral madde miktarı genellikle daha yüksektir. Mineral maddeler balın besin değerine katkı sağlamakla birlikte, bu katkı günlük gereksinim açısından sınırlı düzeydedir (Bengü, 2022; Bogdanov ve ark. 2008; Al-Kafaween ve ark. 2023).

2.7. Vitamin Yapısı

Bal düşük miktarda vitamin içermektedir. Ancak içerdiği vitaminler, miktarları düşük olsa da metabolik faaliyetler açısından önem taşımaktadır. Balda bulunan başlıca vitaminler B1 vitamini, B2 vitamini, B3 vitamini, B5 vitamini, B6 vitamini ve C vitaminidir. Baldaki vitamin miktarı nektar kaynağına, balın tazeliğine, polen varlığına, üretim, işleme ve muhafaza şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Vitamin kayıplarının başlıca nedenleri ısıl işlem ve polenin büyük ölçüde uzaklaştırıldığı filtrasyon işlemidir. Polen içeriği daha yüksek olan petekli balın vitamin içeriği, süzme bala göre daha yüksek olabilmektedir. Süzme balın yapısında, az oranlarda olmak üzere C vitamini ve B grubu vitaminleri yer almakla beraber bir insanın günlük ihtiyacını karşılayacak miktarda vitamin bulunmamaktadır. 100 g bal içerisinde 3-6 µg tiamin (B1), 22-63 µg riboflavin (B2), 7,6-320 µg piridoksin (B6), 1.000-4.000 µg askorbik asit (C), 100-300 µg niasin (B3), az miktarda E ve K vitamini bulunmaktadır (Al-Kafaween ve ark. 2023).

2.8. Fenolik, Antioksidan ve Aromatik Bileşik Yapısı

Gıda bileşenlerinin havadaki oksijenle temas etmesi sonucu gelişen oksidasyon tepkimeleri; besin değerinde kayıplara yol açmasının yanı sıra tat, koku ve renk gibi duyusal niteliklerde bozulmalara neden olabilmektedir. Gıdaların yapısında doğal olarak yer alan ya da dışarıdan eklenebilen ve bu bozunma tepkimelerini önleyen bileşikler genel olarak antioksidan maddeler şeklinde tanımlanır (Mutlu ve ark. 2017). Balın antioksidan madde içeriği; nektarın toplandığı bitkisel kaynağa, mevsimsel değişimlere ve değişen çevre

faktörlerine bağlı olarak değişmektedir (Spilioti ve ark. 2014). Balın antioksidan kapasitesi; glikoz oksidaz, katalaz ve peroksidaz gibi enzimlerin yanı sıra flavonoidler, fenolik asitler, karotenoidler, amino asitler, askorbik asit ve Maillard tepkimesi ürünlerinden ileri gelmektedir. Bu özellik doğrudan toplam fenolik bileşik miktarıyla ilişkilidir; nitekim fenolik madde derişimi yükseldikçe antioksidan potansiyel de artış gösterir. Ayrıca yapılan araştırmalar, koyu renkli balların açık renkli olanlara kıyasla genellikle daha zengin fenolik içeriğe ve buna bağlı olarak daha güçlü bir antioksidan etkinliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Ajibola ve ark. 2012; Marshall ve ark. 2015; Bengü, 2022; Dzugan ve ark. 2018; Weston ve ark. 1999; Young ve Blundell, 2023). Balın sahip olduğu antioksidan özellikleri sayesinde polifenol oksidaz enzim aktivitesi sonucu meyve ve sebzelerde gerçekleşen enzimatik esmerleşme reaksiyonları ve lipitlerde meydana gelen ve acılaşmaya neden olan oksidasyon reaksiyonlarını engelleyebildiği bildirilmektedir (Karadal ve Yıldırım, 2012; Mutlu ve ark. 2017). Al-Mamary ve ark. (2002) tarafından farklı ballar üzerinde yapılan çalışmada, balın yapısında bulunan fenolik bileşenlerin antioksidatif etkiye sahip olduğu ve antioksidan aktivitenin toplam fenolik madde içeriği ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir.

3. BALIN BAZI ÖZELLİKLERİ VE MUHAFAZASI

3.1. Balın Antibakteriyel Özelliği

Balın antimikrobiyal potansiyeli; düşük su aktivitesi, yüksek ozmotik basınç ve belirgin asitlik gibi fizikokimyasal faktörlerin yanı sıra bünyesindeki hidrojen peroksit, flavonoid ve fenolik asit gibi biyoaktif bileşenlerden ileri gelmektedir. Bu özgün nitelikler, balı insan sağlığını tehdit eden patojen mikroorganizmaların çoğalmasını engelleyen doğal bir ortama dönüştürür. Balın bakteri engelleyici etkisinden büyük ölçüde sorumlu olan ve sonradan hidrojen peroksit olduğu anlaşılan faktöre "inhibin" adı verilmiştir. Balın inhibin aktivitesi ısı ve ışığa karşı çok duyarlı olup katalaz enziminden ve düşük pH'dan olumsuz yönde etkilenmektedir. Doğal bal, birçok bakteri türünün üremesini sınırlandırabilmektedir. Balın antibakteriyel etkisinin düzeyi, botanik ve coğrafi kökenine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir (Karadal ve Yıldırım, 2012; Mutlu ve ark. 2017; Young ve Blundell, 2023;

Coşkun ve Coşkun, 2022). Ancak balın antibakteriyel etkisi büyük ölçüde mikroorganizmaların vejetatif formlarına yöneliktir; bal, bakteri sporlarını etkisiz hale getirememektedir. Nitekim bal, *Clostridium botulinum* sporlarını içerebildiğinden bir yaş altındaki bebeklere verilmemelidir.

3.2. Balın Kristalizasyonu

Kristalizasyon, balda bulunan glikozun kristal tanecikler oluşturması sonucunda balın akışkanlığını kısmen veya tamamen kaybetmesidir. Balların büyük bir kısmı, kristallenmeye eğilimlidir. Şekerlenme eğilimi, baldaki fruktoz ve glikoz miktarı ile yakından ilişkilidir. Fruktoz/glikoz oranı yüksek olan ballar geç şekerlenirken, bu oranın düşük olduğu ballar daha kolay şekerlenmektedir. Balda şekerlenmeyi etkileyen bir diğer önemli faktör de glikoz/su oranıdır. Glikoz/su oranı 1,70 ya da daha düşük olan ballar genellikle şekerlenmezken, bu oranın 2,10'un üzerinde olduğu ballarda ise kısa sürede şekerlenme meydana gelmektedir (Escuredo ve ark. 2012; Mutlu ve ark. 2017). Bal yaklaşık 14-15°C civarında kristalleşmeye yatkındır ve havaların soğuması ballarda kristalleşmeyi hızlanmakta; ani sıcaklık değişimleri de bu sürecin daha hızlı ilerlemesine zemin sağlamaktadır. Kristalizasyon, sıvı fazda çözünmüş halde bulunan glikoz miktarını azaltarak bu fazın su aktivitesini artırmakta; artan su aktivitesi ise maya hücrelerinin gelişmesine ve fermantasyona zemin hazırlamaktadır (Shafiq ve ark. 2014). Kristalleşmiş balı yeniden sıvılaştırmak için bal kavanozu, sıcaklığı 45°C'yi geçmeyen su banyosuna yerleştirilmelidir. Bal doğrudan soba veya ocak üzerinde ısıtılırsa aroması kaybolur ve karamelizasyon meydana gelir. Ayrıca enzimler, vitaminler ve aroma bileşenleri büyük ölçüde bozunur. Baldaki diastaz aktivitesi azalır ve hidroksimetilfurfural (HMF) miktarı artar. HMF, ısıtma sırasında asidik ortamda başta fruktoz olmak üzere heksoz şekerlerinin dehidratasyonu sonucunda oluşmaktadır. Doğal balda olması gereken HMF miktarı en fazla 40 mg/kg'dır (Mutlu ve ark. 2017).

3.3. Balın Muhafaza Koşulları

Bal, düşük su aktivitesi ve asidik yapısı sayesinde uzun süre dayanabilen doğal bir arı ürünüdür. Ancak uygun olmayan koşullarda depolanan balın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir.

Özellikle sıcaklık, nem, ışık ve depolama materyali balın kalite kriterlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle balın uygun koşullarda (kuru, temiz, serin vb.) muhafaza edilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

3.3.1. Sıcaklığın Bala Etkisi

Balın muhafazasındaki en önemli faktör sıcaklıktır. Yapılan araştırmalarda yüksek sıcaklığın balın enzim aktivitesini azalttığı, hidroksimetilfurfural (HMF) oluşumunu artırdığı ve antioksidan kapasitesini düşürdüğü belirtilmiştir. Fallico ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada, 35°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda depolanan ballarda HMF miktarının hızla arttığını bildirmiştir. Bal için önerilen depolama sıcaklığı genellikle 20°C'nin altındadır. Bu sıcaklık aralığında balın kimyasal stabilitesi daha iyi korunmaktadır.

3.3.2. Nemin ve Su İçeriğinin Bala Etkisi

Bal higroskopik bir yapıya sahip olduğundan çevreden nem çekebilmektedir. Balın depolandığı ortamda nem oranının artması balda fermantasyon riskini artırmaktadır. Özellikle osmofilik mayaların gelişmesi sonucu balda alkol ve organik asit oluşumu gözlenebilmektedir. Finola ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, balın yüksek nemli ortamlarda depolanmasının maya gelişimini artırdığı ve balda kalite kayıplarına neden olduğunu bildirmiştir. Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği'ne göre balın nem oranı en fazla %20 olmalıdır.

3.3.3. Işığın Bala Etkisi

Doğrudan güneş ışığı balın fenolik bileşiklerinde ve vitamin içeriğinde kayıplara neden olabilmektedir. Bertoncelj ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, ışığa maruz kalan ballarda antioksidan aktivitenin azaldığını belirtmiştir. Bu nedenle bal karanlık ortamda, ışık geçirmeyen kaplarda ve doğrudan güneş ışığından uzak şekilde muhafaza edilmelidir.

3.3.4. Depolama Kaplarının Bala Etkisi

Depolama kabının niteliği, balın kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Balın asidik yapısı bazı metallerle reaksiyona girebilmektedir. Bu nedenle de bal cam kaplarda, paslanmaz çelik kaplarda ya da gıda ile temasa uygun plastik kaplarda saklanmalıdır. Buna karşın bal bakır, demir ve galvanizli kaplarda asla depolanmamalıdır.

3.4. Kristalleşmenin Mekanizması ve Değerlendirilmesi

Balın depolanması sırasında meydana gelen en yaygın fiziksel değişimlerden biri kristalleşmedir. Tüketiciler tarafından çoğu zaman bozulma veya şeker ilavesinin bir göstergesi olarak değerlendirilen bu olay, gerçekte doğal ve beklenen bir süreçtir. Kristalleşme, balın yapısında bulunan glikozun çözünürlüğünü kaybederek kristal forma dönüşmesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu nedenle balın kristalleşmesi, ürünün bozulduğunu gösteren bir durum olmayıp doğal yapısının bir sonucudur. Özellikle glikoz oranı yüksek olan ballarda kristalleşme daha hızlı gerçekleşmektedir.

Bal, yaklaşık %75–85 oranında karbonhidrat ve %15–20 oranında su içeren aşırı doymuş bir şeker çözeltisidir. Bu özelliği nedeniyle termodinamik açıdan kararsız bir sistem olarak kabul edilmektedir. Zamanla çözeltide bulunan glikoz molekülleri çözünürlük sınırını aşarak kristal çekirdekleri oluşturmakta ve bu çekirdeklerin büyümesi sonucunda kristalleşme meydana gelmektedir. Kristalleşme sırasında başlıca glikoz monohidrat kristalleri oluşurken, daha yüksek çözünürlüğe sahip olan fruktoz sıvı fazda kalmaya devam etmektedir. Kristalleşme süreci üzerinde depolama sıcaklığının önemli bir etkisi bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, kristalleşmenin en hızlı şekilde 10–15°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştiğini ve yaklaşık 14°C'nin kristal oluşumu için optimum sıcaklık olduğunu göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda glikozun çözünürlüğü arttığından kristalleşme yavaşlamakta, çok düşük sıcaklıklarda ise moleküler hareketlerin azalması nedeniyle kristal oluşumu gecikmektedir.

Balın kristalleşmesi, doğal ve kaçınılmaz bir fiziksel olay olup kalite kusuru olarak değerlendirilmemelidir. Kristalleşme hızı; glikoz/fruktoz oranı, su içeriği, depolama sıcaklığı, polen ve diğer partiküllerin varlığı ile balın botanik kökeni gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Kristalleşmiş balın

tüketilmesinde herhangi bir sakınca bulunmamakta olup, ürün kontrollü koşullarda 45°C'yi aşmayan sıcaklıklarda ısıtılarak yeniden sıvı hale getirilebilmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli ısıtma işlemleri, balın enzim aktivitesinin azalmasına, aroma bileşenlerinin kaybına ve hidroksimetilfurfural (HMF) miktarının artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle sıvılaştırma işleminin kontrollü sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Sonuç olarak, tüketicilerin balın kristalleşmesini bozulma veya tağşiş göstergesi olarak değil, doğal yapısının ve özgün bileşiminin bir sonucu olarak değerlendirmeleri gerekmektedir (Bogdanov ve ark. 2008; da Silva ve ark. 2016; Akgün ve Şahin, 2023; Güney, 2010).

4. BALIN İNSAN SAĞLIĞINDAKİ YERİ

Bal, insanlık tarihinin en eski doğal besinlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Antik çağlardan günümüze kadar farklı kültürlerde hem besin hem de geleneksel tedavi yöntemi olarak kullanılmıştır. Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar, balın yalnızca tatlandırıcı bir besin maddesi olmadığını; aynı zamanda sağlık üzerinde olumlu etkileri bulunan fonksiyonel bir gıda olduğunu göstermektedir.

4.1. Balın İnsan Sağlığı Üzerindeki Faydaları

4.1.1. Balın Antioksidan Etkisi

Bal, flavonoidler ve fenolik asitler başta olmak üzere çeşitli fenolik bileşikler içermektedir. Balın içerdiği flavonoidler ve fenolik asitler serbest radikalleri nötralize ederek oksidatif stresi azaltmaktadır. Bu bileşiklerin ayrıca inflamatuar süreçleri baskılayabildiği bildirilmektedir. Oksidatif stres; yaşlanma, kalp-damar hastalıkları, diyabet ve bazı kanser türleriyle ilişkilendirilmektedir. Düzenli ve kontrollü bal tüketimi vücudun antioksidan savunma sistemini destekleyerek bazı kronik hastalıkların riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir (Samarghandian, 2017). Alvarez-Suarez ve ark. (2010) fenolik maddelerin balın toplam antioksidan kapasitesinin önemli bir kısmını oluşturduğunu bildirmiştir. Balda bulunan bazı enzimler de antioksidan savunmaya katkı sağlamaktadır. Başlıca antioksidan etkili enzimlerin katalaz, glukoz oksidaz ve peroksidaz olduğu bildirilmektedir (Bogdanov ve ark. 2008).

Beretta ve ark. (2005) balın rengi ile toplam fenolik madde miktarı arasında pozitif ilişki olduğunu bildirmiştir.

4.1.2. Balın Antibakteriyel ve Antimikrobiyal Etkisi

Balın insan sağlığı açısından en önemli özelliklerinden biri antimikrobiyal etkisidir. Balın düşük pH değeri, düşük su aktivitesi, yüksek ozmotik basıncı ve glukoz oksidaz enzimi sayesinde oluşan hidrojen peroksit, mikroorganizmaların gelişimini engelleyebilmektedir. Özellikle bazı bal çeşitlerinin yara enfeksiyonlarına neden olan bakterilere karşı etkili olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle tıbbi bal uygulamaları yara bakımında kullanılmaktadır (Samarghandian, 2017). Molan (1992) yaptığı çalışmada balın yüksek ozmotik basıncı sayesinde birçok bakterinin büyümesini inhibe ettiğini bildirmiştir. Yine Bogdanov ve ark. (2008) düşük pH'ın balın doğal koruyucu özelliklerinden biri olduğunu belirtmiştir.

4.1.3. Yara ve Yanıkların İyileşmesine Katkı

Balın yara yüzeyini nemli tutması, enfeksiyon riskini azaltması ve doku yenilenmesini desteklemesi nedeniyle yara tedavisinde kullanılabildiği belirtilmektedir. Araştırmalar bal uygulamalarının özellikle yüzeysel yanıklar ve kronik yaralarda iyileşme sürecini hızlandırabileceğini göstermektedir (Samarghandian, 2017). Tarihsel kayıtlar, balın yara tedavisinde yaklaşık 4000 yıldır kullanıldığını göstermektedir. Modern tıp uygulamalarında ise özellikle sterilize edilmiş tıbbi ballar yara bakım ürünleri içerisinde yer almaktadır (Molan, 2001). Subrahmanyam (1998) tarafından yapılan çalışmada yanık yaralarında bal uygulamasının, haşlanmış patates kabuğu ile yapılan pansumana kıyasla inflamasyonu azaltarak iyileşmeyi hızlandırdığı belirtilmiştir. Yine Wijesinghe ve ark. (2009) tarafından yapılan meta-analiz çalışmasında ise balın yüzeysel ve kısmi kalınlıktaki yanıklarda iyileşme süresini konvansiyonel pansumanlara göre kısaltabildiği belirtilmiştir.

4.1.4. Bağışıklık Sisteminin Desteklenmesi

Balda bulunan fenolik bileşikler ve diğer biyoaktif maddeler bağışıklık sisteminin işleyişine katkıda bulunabilir. Düzenli tüketimin vücudun

enfeksiyonlara karşı direncini artırabileceği bildirilmektedir. Ayrıca soğuk balın mide asidi salgılanmasını teşvik ettiği, buna karşın sıcak balın söz konusu salgıyı baskılayarak yüksek asiditeye bağlı ülser oluşumunu engellediği rapor edilmektedir (Young ve Blundell, 2023). Gharzouli ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada, bal ile glikoz-fruktoz-sakaroz-maltoz karışımının sıçanlara oral yolla verilmesinin ardından yapılan incelemelerde, etanol ile oluşturulan mide lezyonlarının büyük ölçüde önlendiği tespit edilmiştir.

4.1.5. Solunum Yolu Rahatsızlıklarını Destekleyici Etkisi

Bal özellikle boğaz tahrişi ve öksürük gibi üst solunum yolu şikâyetlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Balın boğaz yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak tahrişi azaltabildiği ve öksürük sıklığını hafifletebildiği bildirilmektedir (Samarghandian, 2017). Balın porsiyon kontrolü sağlanarak düzenli tüketilmesi, bağışıklık hücrelerinin işlevselliğini güçlendirerek üst solunum yolu enfeksiyonları benzeri hafif seyirli rahatsızlıkların iyileşme sürecini hızlandırabilmektedir. Paul ve ark. (2007) tarafından çocuklarda yürütülen randomize kontrollü bir çalışmada yatmadan önce verilen balın öksürük sıklığını azalttığı, öksürük şiddetini hafiflettiği ve uyku kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Cohen ve ark. (2012) tarafından çocuklarda yürütülen çift kör, plasebo kontrollü bir başka çalışmada bal tüketiminin gece öksürüğünü önemli düzeyde azalttığı ve hem çocukların hem de ebeveynlerin uyku kalitesini iyileştirdiğini belirtmiştir. Oduwole ve ark. (2018) ise sistematik derlemelerinde, balın çocuklarda akut öksürük semptomlarını plaseboya veya tedavi uygulanmamasına kıyasla daha fazla hafifletebildiğini bildirmişlerdir.

4.1.6. Sindirim Sistemine Katkısı

Balın prebiyotik özellik gösterebildiği ve yararlı bağırsak bakterilerinin gelişimini destekleyebildiği belirtilmektedir. Ayrıca bazı çalışmalar balın mide ve bağırsak fonksiyonları üzerinde olumlu etkiler gösterebildiğini ve bağırsak florasının dengelenmesine, hazımsızlık ve reflü gibi sindirim sorunlarının hafifletilmesine yardımcı olabileceğini göstermektedir (Samarghandian, 2017). Yine asidoza engel olması, yağ sindirimini kolaylaştırması, iştahı artırması, bağırsak hareketlerini kolaylaştırması bakımından balın sindirim sistemi

üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır. Sindirim sistemi, besinlerin parçalanması, emilmesi ve metabolik süreçlerde kullanılabilir hale getirilmesinden sorumludur. Sindirim sistemi sağlığının korunması, genel sağlık açısından büyük önem taşımaktadır. Doğal ürünlerin sindirim sistemi fonksiyonları üzerindeki etkileri son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu ürünlerden biri olan bal, içerdiği biyolojik aktif bileşenler nedeniyle fonksiyonel gıda olarak değerlendirilmektedir.

Sanz ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada balda bulunan oligosakkaritlerin özellikle *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* türleri üzerinde büyümeyi teşvik edici etki gösterdiği belirtilmiştir. Erejuwa ve ark. (2014) balın yararlı bakterilerin çoğalmasını desteklerken bazı patojen mikroorganizmaların gelişimini baskılayabildiğini, mikrobiyal dengeyi koruyabileceğini, bağırsak sağlığını destekleyebileceğini ve sindirim fonksiyonlarını iyileştirebileceğini vurgulamışlardır. Al Somal ve ark. (1994) tarafından yapılan in vitro çalışmada ise manuka balının, mide ülseri etkenlerinden *Helicobacter pylori* üzerinde antibakteriyel etki gösterdiği belirtilmiştir.

4.1.7. Enerji Kaynağı Olarak Kullanımı

Bal hızlı sindirilebilen doğal karbonhidratlar içerdiğinden sporcular ve yoğun fiziksel aktivite yapan bireyler için doğal bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Glukoz hızlı enerji sağlarken, fruktoz daha uzun süreli enerji desteği sunabilmektedir (Samarghandian, 2017; Bogdanov ve ark. 2008). Balın yaklaşık %80'i karbonhidratlardan oluşmaktadır. Bu karbonhidratların büyük kısmını fruktoz (%38–41) ve glukoz (%30–35) oluşturmaktadır. Balın 100 gramında ortalama olarak 300–320 kkal, 1 yemek kaşığı balda (ortalama 20 g) 64 kkal enerji bulunmaktadır.

Murray ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada, balın egzersiz öncesi ve sırasında tüketildiğinde kan glukoz seviyelerini koruyabildiğini, kan şekerinde ani dalgalanmaları azaltabildiğini, kas glikojen depolarının korunmasına yardımcı olduğunu ve egzersiz sırasında enerji devamlılığı sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Al-Waili (2003) tarafından yapılan çalışmada ise balın kolay sindirilebilir karbonhidrat içeriği sayesinde hızlı enerji sağladığını ve günlük enerji gereksinimine katkıda bulunduğu, ayrıca yaşlı

bireylerde iştahsızlık ve enerji yetersizliğinin önlenmesinde destekleyici bir gıda olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

4.1.8. Göz Hastalıklarına Etkisi

Göz hastalıkları dünya genelinde yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen sağlık problemleri arasında yer almaktadır. Antibiyotik direncinin artması ve kronik göz hastalıklarının yaygınlaşması, alternatif ve tamamlayıcı tedavi yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bal, doğal antimikrobiyal ve yara iyileştirici özellikleri nedeniyle oftalmoloji alanında dikkat çeken doğal ürünlerden biridir.

Göz yüzeyinde meydana gelen inflamasyon birçok göz hastalığının temel mekanizmasını oluşturmaktadır. Balın içerdiği antioksidan ve fenolik maddeler inflamatuar sitokinlerin üretimini azaltarak göz dokularındaki hasarın sınırlandırılmasına yardımcı olabilmektedir. Kornea ülserleri görme kaybına yol açabilen ciddi göz hastalıkları arasında yer almaktadır. Bazı klinik çalışmalarda steril bal bazlı göz damlalarının kornea ülseri ve kuru göz hastalığı gibi durumlarda iyileşmeyi destekleyebileceği bildirilmiştir (Majtanova ve ark. 2016; Albietz ve Schmid, 2023). Yapılan bir çalışmada balın topikal olarak hiperozmotik ajan olarak uygulanmasının, ön ve arka segment cerrahisi sonrasında gelişen kornea epitel ödeminin tedavisinde olumlu sonuç verdiği belirtilmiştir (Mansour, 2002; Sönmez, 2004).

5. SONUÇ

Bal, yalnızca doğal bir enerji kaynağı değil; aynı zamanda içerdiği fenolik bileşikler, flavonoidler, enzimler ve diğer biyoaktif maddeler sayesinde insan sağlığı açısından önemli bir fonksiyonel gıda olarak değerlendirilmektedir. Antioksidan, antimikrobiyal, antienflamatuvar, sindirim sistemi sağlığı, bağışıklık sistemi desteği, enfeksiyonlara karşı koruyucu etkileri ve yara iyileştirici özellikleri nedeniyle balın tıbbi ve beslenme alanındaki önemi giderek artmaktadır. Bununla birlikte balın bir ilaç değil, sağlıklı ve dengeli beslenmenin destekleyici bir bileşeni olduğu unutulmamalıdır. Bilimsel çalışmalar balın sağlık üzerindeki olumlu etkilerini desteklemekle birlikte, bu etkilerin balın türüne, bileşimine ve tüketim

miktarına bağlı olarak değişebileceği belirtilmektedir. Ancak balın kontrollü tüketilmesi ve botulizm riski nedeniyle özellikle bir yaş altındaki bebeklerde kullanılmaması gerektiği unutulmamalıdır.

KAYNAKÇA

Akgün, M., Şahin, T. (2023). Kristallenmiş çiçek balının sıvılaşma hızının artırılmasının deneysel incelenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 13(1): 96-108.

Al Somal, N., Coley, K. E., Molan, P. C., Hancock, B. M. (1994). Susceptibility of *Helicobacter pylori* to the antibacterial activity of manuka honey. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 87(1), 9–12.

Alvarez-Suarez, J. M., Tulipani, S., Romandini, S., Bertoli, E., Battino, M. (2010). Contribution of honey in nutrition and human health: A review. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 3(1), 15–23.

Ajibola, A., Chamunorwa, J.P., Erlwanger, K.H. (2012). Nutraceutical values of natural honey and its contribution to human health and wealth. *Nutrition & Metabolism*, 9: 61.

Albietz, J.M., Schmid, K.L. (2023). Honey-related treatment strategies in dry eye disease: *Systematic Review and Meta-Analysis*.

Al-Kafaween, M., Alwash, M., Mohd Hilmi, A.B., Abulebdah, D.H. (2023). Physicochemical characteristics and bioactive compounds of different types of honey and their biological and therapeutic properties: A Comprehensive Review. *Antibiotics*, 12(2): 337.

Al-Waili, N. S. (2003). Effects of daily consumption of honey solution on hematological indices and blood levels of minerals and enzymes in normal individuals. *Journal of Medicinal Food*, 6(2), 135–140.

Anonim (2020). Türk Gıda Kodeksi Bal Tebliği (Tebliğ No: 2020/7). Resmî Gazete, 22.04.2020, Sayı: 31107.

Babacan, S., Rand, A.G. (2005). Purification of amylase from honey. *Journal of Food Science*, 70(6): 413-418.

Bakoğlu, A., Kutlu, M., Bengü, A. (2014). Bingöl ilinde arıların yoğun olarak konakladıkları alanlarda üretilen ballarda bulunan polenlerin tespiti. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1 (3): 348-353.

Bengü, A. Ş. (2022). Balın kimyası, özellikleri ve sağlığımız. *Bingöl Üniversitesi Sağlık Dergisi*, 2 (2): 93-98.

Beretta, G., Granata, P., Ferrero, M., Orioli, M., Facino, R. M. (2005). Standardization of antioxidant properties of honey by a combination of

spectrophotometric/fluorimetric assays and chemometrics. *Analytica Chimica Acta*, 533(2), 185–191.

Bertoncelj, J., Doberšek, U., Jamnik, M., Golob, T. (2007). Evaluation of the phenolic content, antioxidant activity and colour of Slovenian honey. *Food Chemistry*, 105(2): 822–828.

Bogdanov, S., Jurendic, T., Sieber, R., Gallmann, P. (2008). Honey for nutrition and health: A Review. *Journal of the American College of Nutrition*, 27(6): 677-689.

Cohen, H. A., Rozen, J., Kristal, H., Laks, Y., Berkovitch, M., Uziel, Y., Kozer, E., & Efrat, H. (2012). Effect of honey on nocturnal cough and sleep quality: A double-blind, randomized, placebo-controlled study. *Pediatrics*, 130(3), 465–471.

Coşkun, Z.H., Coşkun, F. (2022). A review about honey effect on human body. *Journal of Apitherapy and Nature*. 5, 1:35-68.

da Silva, P.M., Gauche, C., Gonzaga, L.V., Costa, A.C.O., Fett, R. (2016). Honey: Chemical composition, stability and authenticity. *Food Chemistry*, 196: 309-323.

Doğaroğlu, M. (2009). *Modern Arıcılık Teknikleri*. Balparmak Yayınevi.

Dzugan, M., Tomczyk, M., Sowa, P., Grabek-Lejko, D. (2018). Antioxidant activity as biomarker of honey variety. *Molecules*, 23(8): 2069.

Erejuwa, O. O., Sulaiman, S. A., Wahab, M. S. A. (2014). Effects of honey and its mechanisms of action on the development and progression of gastrointestinal disorders. *Molecules*, 19(2), 2497–2522.

Escuredo, O., Silva, L.R., Valentao, P., Seijo, M.C., Andrade, P.B. (2012). Assessing rubus honey value: Pollen and phenolic compounds content and antibacterial capacity. *Food Chemistry*, 130(3):671-678.

Fallico, B., Zappala, M., Arena, E., Verzera, A. (2004). Effects of conditioning on HMF content in unifloral honeys. *Food Chemistry*, 85(2), 305-313.

Finola, M.S., Lasagno, M.C., Marioli, J.M. (2007). Microbiological and chemical characterization of honeys from central *Argentina. Food Chemistry*, 100(4): 1649–1653.

Güney, F. (2010). Isıtma ile balın yapısında meydana gelen olumsuz değişiklikler. *Ordu'da Gıda Güvenliği Dergisi*, 11:30-34.

Gharzouli, K., Gharzouli, A., Amira, S., Khennouf, S. (1999). Prevention of ethanol-induced gastric lesions in rats by natural honey and glucose-fructose-sucrose-maltose mixture. *Pharmacological Research*, 39(2): 151-156.

Molan, P. C. (2001). Potential of honey in the treatment of wounds and burns. *American Journal of Clinical Dermatology*, 2(1), 13–19.

İslam, A., Khalil, M.I., İslam, N., Moniruzzaman, M., Mottalib, A., Sulaiman, S.A., Gan, S.H. (2012). Physicochemical and antioxidant properties of Bangladeshi honeys stored for more than one year. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 12(1):177.

Karadal, F., Yıldırım, Y. (2012). Balın kalite nitelikleri, beslenme ve sağlık açısından önemi. *Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 9(3): 197-209.

Majtanova, N., Cernak, M., Majtan, J. (2016). Honey: A natural remedy for eye diseases. *Forschende Komplementärmedizin*, 23(6):364-369.

Al-Mamary, M., Al-Meeri, A., Al-Habori, M. (2002). Antioxidant activities and total phenolics of different types of honey. *Nutrition Research*, 22(9): 1041-1047.

Mansour, M.A. (2002). Epithelial corneal oedema treated with honey. *Clinical and Experimental Ophthalmology*, 30: 141-142.

Marshall, S., Gu, L., Schneider, K.R. (2015). *Health benefits and medicinal value of honey*. IFAS Extension, University of Florida.

Molan, P. C. (1992). The antibacterial activity of honey. *Bee World*, 73(1), 5–28.

Murray, R., Paul, G. L., Seifert, J. G., Eddy, D. E., Halaby, G. A. (2001). The effects of glucose, fructose, and honey ingestion during endurance exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(5), 886–893.

Mutlu, C., Erbaş, M., Tontul, S.A. (2017). Bal ve diğer arı ürünlerinin bazı özellikleri ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Akademik Gıda Dergisi*, 15(1):75-83.

Nombre, I., Schweitzer, O., Boussim, J.I., Rasolodimby, J.M. (2010). Impacts of storage conditions on physicochemical characteristics of honey samples from Burkina Faso. *African Journal of Food Science*, 4(7):458-463.

Oduwole, O., Udoh, E. E., Oyo-Ita, A., Meremikwu, M. M. (2018). Honey for acute cough in children. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 4, CD007094.

Paul, I. M., Beiler, J., McMonagle, A., Shaffer, M. L., Duda, L., Berlin, C. M. (2007). Effect of honey, dextromethorphan, and no treatment on nocturnal cough and

sleep quality in children and their parents. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 161(12), 1140–1146.

Sak-Bosnar, M., Sakac, N. (2012). Direct potentiometric determination of diastase activity in honey. *Food Chemistry*, 135(2):827-831.

Samarghandian, S., Farkhondeh, T., Samini, F. (2017). Honey and health: A review of recent clinical research. *Pharmacognosy Research*, 9(2):121–127.

Sanz, M. L., Polemis, N., Morales, V., Corzo, N., Drakoularakou, A., Gibson, G. R., Rastall, R. A. (2005). In vitro investigation into the potential prebiotic activity of honey oligosaccharides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(8), 2914–2921.

Shafiq, H., Iftikhar, F., Ahmad, A., Kaleem, M., Sair, A.T. (2014). Effect of crystallization on the water activity of honey. *International Journal of Food and Nutritional Sciences*, 3(3):1-6.

Spilioti, E., Jaakkola, M., Tolonen, T., Lipponen, M., Virtanen, V., Chinou, I., Kassi E., Karabournioti, S., Moutsatsou, P. (2014). Phenolic acid composition, antiatherogenic and anticancer potential of honeys derived from various regions in Greece. *Plos ONE*, 9(4):e94860.

Stephens, J., Greenwood, D., Fearnley, L., Bong, J., Schlothauer, R., Loomes, K. (2015). Honey production and compositional parameters. In: Preedy, V. (Ed.), *Processing and Impact on Active Components in Food*. Academic Press, 675-680.

Subrahmanyam, M. (1998). Honey dressing versus boiled potato peel in the treatment of burns. *Burns*, 24(2), 157–161.

Özmen, N., Alkın, E. (2006). Balın antimikrobiyal özellikleri ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Uludağ Arıcılık Dergisi*, 4:155-160.

Sönmez, B. (2004). Balın insan sağlığındaki yeri ve önemi. *Uludağ Arıcılık Dergisi*, 127-130.

Wijesinghe, M., Weatherall, M., Perrin, K., Beasley, R. (2009). Honey in the treatment of burns: A systematic review and meta-analysis. *New Zealand Medical Journal*, 122(1295), 47–60.

Weston, R.J., Mitchell, R.K., Allen, L.K. (1999). Antibacterial phenolic components of New Zealand manuka honey. *Food Chemistry*, 64(3): 295-301.

Winston, M.L. (1987). *The Biology of the Honey Bee*. Harvard University Press, 281 sayfa.

Young, G.W.Z., Blundell, R. (2023). A review on the phytochemical composition and health applications of honey. *Heliyon*, 9(2): e12507.

BÖLÜM 3

WATER FOOTPRINT IN ANIMAL FARMING: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES FOR SUSTAINABLE LIVESTOCK PRODUCTION IN TURKIYE

NAZAN KOLUMAN[1]
YAVUZKAN PAKSOY[2]

Entrance

Water scarcity is becoming an increasingly important constraint for livestock production in Türkiye, particularly in Mediterranean and semi-arid regions where rising temperatures, prolonged droughts and competition for freshwater directly affect both animals and feed production. The water footprint of livestock farming extends from the water consumed directly by animals to water used for feed production, cleaning and other farm operations. Drinking water should not be overlooked, as adequate access to clean water is essential for feed intake, thermoregulation, health, welfare and productivity, particularly during periods of heat stress. The relative importance of green, blue and grey water varies among production systems, species, regions and feeding strategies. In Türkiye, intensive dairy and beef systems based partly on irrigated forage crops may place different pressures on freshwater resources

[1] Prof. Dr., Cukurova University, Agricultural Faculty, Department of Animal Science, Orcid: 0000-0002-1388-2298
[2] Assoc. Prof. Dr., Cukurova University, Veterinary Faculty, Department of Animal Science, Orcid: 0000-0002-0935-7693

than sheep and goat systems relying more strongly on rangelands, crop residues and locally available feeds. Thus, water footprint values should be interpreted within their climatic and production context rather than solely as litres of water per unit of animal product. Reducing freshwater demand requires approaches that integrate animal, feed and water management. Efficient irrigation, drought-tolerant forage crops, crop residues and agro-industrial by-products offer important opportunities. The safe reuse of appropriately treated wastewater for forage production may further reduce dependence on freshwater while supporting circular water management, provided that microbiological, chemical, soil and animal-feed safety requirements are carefully addressed.

For Türkiye, sustainable livestock production will increasingly depend on managing water as a circular resource. Integrating drinking water requirements, feed-related water use and wastewater reuse into water footprint assessment can provide a more realistic basis for developing climate-resilient livestock systems.

Water is a fundamental resource for livestock production, influencing animal health and welfare, feed availability, farm productivity and the long-term sustainability of production systems. Increasing temperatures, more frequent droughts and growing competition among agricultural, domestic and industrial users are placing additional pressure on freshwater resources, particularly in arid and semi-arid regions. Under these conditions, improving water-use efficiency in livestock production is becoming as important as improving feed efficiency or reducing greenhouse gas emissions. The water footprint (WF) concept provides a useful framework for this purpose because it considers both direct and indirect water use throughout the production chain (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen and Hoekstra, 2012).

The water footprint is commonly divided into green, blue and grey components. Green water represents rainwater stored in the soil

and used by vegetation, blue water refers to surface and groundwater consumed during production, while grey water represents the volume of freshwater required to assimilate pollutants to acceptable water-quality standards (Hoekstra et al., 2011). This distinction is particularly important for livestock systems because the same total water footprint may have very different environmental implications depending on whether production relies primarily on rainfall or on irrigation from increasingly scarce freshwater resources. More recent approaches therefore emphasize that volumetric water footprint values should be interpreted together with the geographical location, seasonality and local level of water scarcity (Demir and Muratoglu, 2025).

Water use in livestock production occurs both directly and indirectly. Direct water use includes drinking water consumed by animals as well as water required for cleaning, milking, cooling and other farm operations. Although drinking and service water generally represent a relatively small proportion of the total water footprint when the entire feed-production chain is considered, their biological importance should not be underestimated (Mekonnen and Hoekstra, 2012). Adequate access to clean drinking water is essential for maintaining feed intake, digestion, thermoregulation, metabolic function, milk production and animal welfare. This becomes particularly important under heat stress, when animals increase water intake as part of their thermoregulatory response. Thus, direct drinking-water requirements and the indirect water embedded in feed should be considered as complementary rather than competing components of livestock water management. Water footprint assessment has progressively moved beyond simple volumetric accounting towards approaches that consider the source, geographical location and potential environmental consequences of water consumption. ISO 14046 provides a life-cycle-based framework for assessing water-related environmental impacts of

products, processes and organisations, while the FAO LEAP guidelines adapt this approach specifically to livestock production systems and supply chains (ISO, 2014; FAO, 2019). Therefore, livestock water use should be evaluated not only according to the volume consumed but also according to water source, local scarcity, production system and supply-chain characteristics.

In most livestock systems, however, feed production accounts for the largest share of total water use. The magnitude and composition of this footprint depend strongly on the type and origin of feed ingredients, crop water requirements, irrigation practices, climate and animal productivity. Consequently, production systems based largely on rain-fed pastures and locally available forage resources may have a markedly different blue-water demand from intensive systems relying on irrigated maize, alfalfa and concentrate ingredients. Recent research has further demonstrated that feed selection itself can substantially modify the blue-water footprint of livestock production, highlighting ration formulation as a potential water-management strategy rather than solely a nutritional decision. This issue is particularly relevant for Türkiye, where animal production ranges from intensive dairy and beef systems to extensive and semi-extensive sheep and goat production across highly contrasting climatic regions. Earlier assessments already indicated that changes in production structure and resource management could increase the water footprint of Türkiye's livestock sector even when livestock numbers did not increase proportionally (Ocak et al., 2013). At basin scale, Muratoglu (2019) reported that livestock production accounted for approximately 16% of the total water footprint in the Upper Tigris River Basin, illustrating the importance of including livestock in regional water-resource planning.

More recent national estimates provide an even clearer picture. Sarıözkan (2026), using 2023 production data, estimated the total water footprint associated with major animal products in

Türkiye at approximately 60.9 billion m^3. Beef accounted for 42.3%, cow milk for 33.4%, poultry meat for 12.5%, eggs for 6.9%, and sheep and goat meat for approximately 5% of the calculated total. Importantly, green water represented 87.2% of the total footprint, whereas grey and blue water accounted for 6.7% and 6.1%, respectively. These results demonstrate that interpretation of livestock water use in Türkiye should not be limited to a single total volume but should distinguish between water sources and production systems.

Farm-level evidence from Türkiye also illustrates the importance of feed production. A recent assessment of raw milk production calculated a water requirement of approximately 1,112 L per litre of milk when the water associated with feed crops, animal drinking and farm cleaning operations was included. The study considered locally produced wheat, maize grain and silage, barley, alfalfa and sunflower, demonstrating how the crop–feed–animal relationship largely determines the overall water footprint of dairy production. At the policy level, modelling studies for Türkiye have similarly indicated that irrigated fodder production and livestock-production efficiency can substantially influence agricultural water depletion and that improvements in livestock efficiency and forage policy may generate water savings (Schuenemann et al., 2023).

Water scarcity, however, should not be addressed solely by reducing water consumption. An increasingly important option is to reconsider the source of water used in agricultural production. The reuse of appropriately treated municipal wastewater for irrigation may reduce demand for high-quality freshwater while simultaneously providing nutrients to crops and contributing to circular resource management. This approach may be particularly relevant for forage production because livestock systems require large quantities of biomass and forage cultivation can represent a substantial component of their indirect water demand. Research

conducted in Türkiye has shown that biologically treated domestic wastewater can be used in the cultivation of forage species such as alfalfa (Medicago sativa), orchard grass (Dactylis glomerata) and crested wheatgrass (Agropyron cristatum), although its effects on crop performance and elemental composition depend on wastewater concentration and species (Arvas and Taslı, 2024). Such applications must nevertheless be managed carefully, with particular attention to microbiological safety, salinity, nutrient loading, heavy metals, soil properties and potential transfer of contaminants through the feed–animal–food chain.

For Türkiye, therefore, the future of water-efficient livestock production requires a broader approach than simply asking how many litres of water are required to produce one litre of milk or one kilogram of meat. Drinking-water requirements, animal responses to heat stress, the green and blue water associated with feed production, regional water scarcity and opportunities for the safe reuse of treated wastewater should be considered together. Integrating these components within water footprint assessment can provide a more realistic basis for improving water productivity and developing climate-resilient livestock systems adapted to Türkiye's diverse environmental and production conditions.

1-Components of the Water Footprint in Livestock Production:

Water use in livestock production is considerably broader than the amount of water consumed directly by animals. It includes water required for drinking, feed and forage production, cleaning, cooling and other farm operations, as well as the water associated with nutrient and pollutant loads generated throughout the production chain. Accordingly, the water footprint (WF) of livestock comprises the indirect water footprint of feed and the direct water footprint associated with drinking and service water (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen and Hoekstra, 2012).

Drinking water represents the most direct interaction between livestock and water resources. In global water-footprint calculations, drinking water accounts for approximately 1.1% of the total livestock water footprint, while service water contributes around 0.8%; the overwhelming share is associated with feed production (Mekonnen and Hoekstra, 2012). Nevertheless, the relatively small volumetric contribution of drinking water should not be interpreted as evidence of limited biological importance. Water is essential for digestion, nutrient transport, maintenance of body fluid balance, thermoregulation, metabolic processes and milk synthesis. Water intake is influenced by animal species, body weight, physiological stage, dry matter intake, diet composition, milk yield, ambient temperature and water quality. In high-producing dairy cows, daily free-water intake may reach approximately 100 L, with milk yield, dietary dry matter, protein and salt content, and environmental temperature among the major determinants of intake (Jensen and Vestergaard, 2021). The relationship between water intake and heat stress is particularly relevant to livestock production under Mediterranean conditions. A recent systematic review and meta-analysis of lactating Holstein cows showed that heat-stressed animals consumed approximately 10 L more water per day than cows maintained under thermoneutral conditions. Moreover, water intake increased by approximately 1.5 L/day for each unit increase in the temperature–humidity index (THI), demonstrating the close relationship between thermal load and drinking behaviour (Zoroaster et al., 2026). These responses are highly relevant for Türkiye, particularly in Mediterranean and semi-arid regions where dairy cattle, sheep and goats are exposed to prolonged periods of high summer temperatures. Adequate access to clean and good-quality drinking water should therefore be regarded as an animal-health and welfare requirement rather than simply as another component of the water footprint. Water-saving strategies at farm level should focus on preventing leakage, overflow and unnecessary losses and

improving drinker design and water distribution, rather than restricting animals' access to water (Jensen & Vestergaard, 2021).

Feed production constitutes the dominant component of the livestock water footprint. Globally, Mekonnen and Hoekstra (2012) estimated the water footprint of livestock feed production at approximately 2,376 Gm^3/year. Grazing contributed the largest individual share, followed by maize and fodder crops. Feed production also accounted for an estimated 12% of global blue-water consumption associated with crop production. The distinction between green and blue water is particularly important when interpreting these figures. Green water originates from precipitation stored in the soil and subsequently used by vegetation, whereas blue water represents surface and groundwater consumed during production (Hoekstra et al., 2011). Consequently, a large green-water footprint associated with rain-fed rangelands does not necessarily exert the same pressure on freshwater resources as a smaller blue-water footprint associated with irrigated forage production in a water-scarce basin. According to the FAO LEAP framework, water use in livestock systems includes both direct and indirect components. Direct use primarily comprises animal drinking and service water, whereas indirect water use is largely associated with feed production and other inputs throughout the livestock supply chain (FAO, 2019). This distinction is important because feed production generally dominates total water use, while drinking water, despite its smaller volumetric contribution, remains essential for animal health, welfare and productivity (Mekonnen and Hoekstra, 2012; FAO, 2019).

The composition and origin of the diet therefore strongly influence the water footprint of animal products. Feed conversion efficiency, crop choice, irrigation requirement, geographical origin of feed ingredients, utilisation of rangelands and the inclusion of crop residues and agro-industrial by-products should all be considered. This is particularly relevant for Türkiye, where intensive

dairy systems relying partly on irrigated maize silage and alfalfa coexist with sheep and goat systems that make greater use of natural rangelands, cereal stubbles and locally available crop residues.

In addition to drinking and feed-related water, livestock farms require water for cleaning animal housing, milking parlous, milk tanks and equipment, as well as for cooling and other routine operations. This component is defined as service water within conventional livestock water-footprint assessment (Mekonnen and Hoekstra, 2012). Although service water represents a relatively small proportion of the total water footprint at global scale, it is generally drawn directly from freshwater supplies and can therefore be locally important. This is particularly relevant in intensive dairy systems located in water-stressed regions. Cooling requirements may further increase direct farm water demand during hot periods. Improving efficiency in this component should focus on avoiding unnecessary consumption while maintaining hygiene, biosecurity and animal welfare. Regular maintenance of pipelines and drinkers, pressure-controlled cleaning systems, appropriate cooling technologies and the reuse of suitable process-water streams can contribute to reducing direct freshwater demand.

Water sustainability in livestock farming is not limited to the quantity of water consumed. The grey water footprint represents the volume of freshwater theoretically required to assimilate pollutants to specified water-quality standards (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen and Hoekstra, 2012). In livestock systems, potential pollutant sources include fertiliser used for feed production, manure and slurry, nitrogen and phosphorus excretion, cleaning water and other farm effluents. Appropriate nutrient management is therefore closely related to water-footprint reduction. Precision feeding can reduce unnecessary nutrient excretion, while improved manure storage and appropriate timing and rates of field application can limit nutrient losses to surface and groundwater. Water management,

nutrient cycling and manure management should consequently be addressed as interconnected components of livestock sustainability.

The increasing scarcity of freshwater requires not only improvements in water-use efficiency but also consideration of alternative water sources. Appropriately treated wastewater is increasingly recognised as a potential resource for agricultural irrigation, particularly in arid and semi-arid regions. Its reuse can reduce pressure on freshwater resources and may simultaneously return nitrogen, phosphorus, organic matter and other nutrients to agricultural soils, potentially reducing mineral fertiliser requirements (Hayat et al., 2026).

This approach may be particularly relevant to livestock farming because forage production represents a major component of indirect livestock water use. In Türkiye, crops such as maize silage, alfalfa and forage grasses are commonly produced under irrigation in regions that increasingly experience seasonal water scarcity. The safe use of treated wastewater for these crops could therefore partially substitute blue-water demand while contributing to a more circular feed-production system. However, treated wastewater should not be considered an unrestricted irrigation resource. Its suitability depends on treatment level, salinity, sodium concentration, nutrient loading and the presence of pathogens, heavy metals, microplastics and other emerging contaminants. Long-term effects on soil quality and the potential transfer of contaminants through the water–soil–plant–animal–food continuum should also be evaluated (Hayat et al., 2026). For forage crops, this issue deserves particular attention because the harvested biomass enters the animal feed chain. Safe wastewater reuse therefore requires appropriate treatment standards, continuous monitoring, suitable crop and irrigation-system selection and assessment of both soil and feed safety.

The water sustainability of livestock production cannot be adequately described by a single value expressed as litres of water per kilogram of meat or litre of milk. Water-footprint assessment should distinguish between green, blue and grey water and should consider the geographical and seasonal context in which water is consumed (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen and Hoekstra, 2012). An integrated approach should therefore address three interconnected dimensions: water for the animal, including drinking water required for health, production and thermoregulation; water for the feed, which generally represents the dominant component of the livestock water footprint; and water recovered or production, including the safe reuse of appropriately treated wastewater for forage irrigation.

For Türkiye, where intensive cattle systems, extensive small-ruminant production and mixed crop–livestock farming coexist under highly diverse climatic conditions, such an approach may provide a more meaningful basis for water management than simple volumetric comparisons. Future strategies should aim not merely to reduce the quantity of water used, but to optimise which water source is used, where and when it is used, and for what productive purpose.

2-Water Footprint of Major Livestock Production Systems in Türkiye: Türkiye has a diverse livestock sector in which intensive dairy and beef production, pasture-based small-ruminant farming, mixed crop–livestock systems and industrial poultry production coexist. These systems differ considerably in feed sources, productivity, dependence on irrigation and direct water requirements. Consequently, their water footprints should not be interpreted solely according to total water volume, but also according to the relative contribution of green, blue and grey water and the local availability of freshwater resources.

A recent national assessment based on 2023 production data estimated the total water footprint of major livestock products in Türkiye at approximately 60.9 billion m^3. Beef accounted for 42.3% of this total, followed by cow milk (33.4%), chicken meat (12.5%), eggs (6.9%) and sheep and goat meat (approximately 5%). At national level, green water represented 87.2% of the livestock water footprint, while grey and blue water accounted for 6.7% and 6.1%, respectively (Sarıözkan, 2026). These figures provide an important national overview, but substantial differences exist among production systems and regions.

Dairy Cattle Production: Dairy production illustrates particularly well why livestock water use should be evaluated through the entire feed–animal system. Dairy cows require substantial quantities of drinking water because of their body size, dry matter intake and milk production. However, direct drinking and service water generally account for only a limited proportion of the overall water footprint; the largest component is associated with feed production.

A farm-level study conducted at Ankara University's Haymana Research and Application Farm provides a useful example from Türkiye. The study included water associated with wheat, maize grain and silage, barley, alfalfa and sunflower used in dairy cattle diets, together with drinking water and water used for cleaning the barn and milking facilities. The estimated water requirement was 1,112.3 L per litre of raw milk (Çolak et al., 2025). This result demonstrates that the water footprint of milk is strongly linked to the cropping and feeding system supporting the dairy herd.

The importance of direct water use should nevertheless not be underestimated. Research on commercial dairy farms in Adana has explicitly included animal drinking water together with water used for cleaning equipment, facilities and shelters when evaluating resource consumption (Küçükerdem, 2026). This is particularly

relevant under Mediterranean conditions, where high summer temperatures can simultaneously increase drinking-water requirements and the need for cooling and cleaning.

The major opportunity for reducing the blue-water footprint of dairy production may therefore lie in feed production rather than in restricting animal water consumption. Increasing irrigation efficiency, selecting forage crops adapted to regional water availability, improving forage yield per unit of water, incorporating locally available by-products and reducing feed losses may all contribute to improved water productivity.

Beef Cattle Production: Beef production represents the largest individual contribution to the national livestock water footprint reported for Türkiye. Sarıözkan (2026) estimated that beef accounted for approximately 42.3% of the water footprint of the major animal products evaluated.

The relatively high water footprint of beef is primarily related to feed requirements over the animal's production cycle. Water is required for forage, cereals and protein feeds consumed during growth and finishing, in addition to the direct water required for drinking and farm operations. Consequently, production duration, growth rate, feed conversion efficiency and ration composition can substantially affect the amount of water attributed to each kilogram of beef produced.

However, a high total water footprint does not necessarily correspond to an equivalent pressure on scarce freshwater. Beef produced predominantly from rain-fed forage, rangeland or crop residues may rely heavily on green water, whereas intensive finishing systems based on irrigated feed crops may have greater dependence on blue water. Modelling of Türkiye's livestock sector has shown that blue-water use can differ substantially between grazing and industrial livestock systems, highlighting the importance

of production-system structure when interpreting water-footprint values (Schuenemann et al., 2023).

Strategies for improving the water efficiency of beef production should therefore include improved feed conversion, reduced time to market, efficient use of locally produced roughages, integration of crop residues and agro-industrial by-products, and reduced dependence on water-intensive irrigated feeds where appropriate.

Sheep and Goat Production: Sheep and goat production occupies a distinctive position in Türkiye's livestock sector. Small ruminants are frequently raised under extensive or semi-intensive conditions and can utilise rangelands, shrubs, cereal stubbles, crop residues and other feed resources that cannot be directly consumed by humans. Their water footprint should therefore be interpreted differently from systems heavily dependent on irrigated feed crops (Kaya et al., 2024; Köseman et al., 2022).

An early Türkiye-focused assessment of small-ruminant water footprints emphasised the importance of sheep and goats within national agricultural water use and the contribution of grazing resources to their production systems (Karakuş and Demir, 2016). More recent national calculations estimated that sheep and goat meat together accounted for approximately 5% of Türkiye's total water footprint associated with the major livestock products considered (Sarıözkan, 2026).

This relatively small national share should not, however, be interpreted as meaning that small-ruminant production is universally water-efficient. The outcome depends on productivity, grazing pressure, supplementary feeding, reproductive efficiency and regional climatic conditions. Low-output animals maintained for long production periods may require considerable resources per unit of product even when most water is derived from rainfall.

On the other hand, the ability of sheep and goats to convert rangeland vegetation, crop residues and other non-human-edible biomass into milk and meat offers an important opportunity for water-smart livestock production. This characteristic is especially relevant in semi-arid areas of Türkiye where expanding irrigated forage production may not be environmentally or economically feasible (Erdem et al., 2022).

Future water-footprint assessments of Turkish sheep and goat systems should therefore distinguish between green water associated with natural vegetation and rangelands and blue water embedded in purchased or irrigated supplementary feeds. Such differentiation would provide a more meaningful measure of the pressure exerted by small-ruminant production on freshwater resources.

Poultry and Egg Production: Poultry production differs from ruminant systems because broilers and laying hens have high feed conversion efficiency and relatively short production cycles. Nevertheless, poultry systems depend heavily on compound feeds containing cereals and protein sources, meaning that most of their water footprint is embedded in feed ingredients rather than in drinking or service water (Kaynak et al., 2010).

According to the national assessment by Sarıözkan (2026), chicken meat accounted for approximately 12.5% and eggs for 6.9% of the total water footprint associated with the major animal products evaluated in Türkiye. Together, these sectors therefore represent a substantial component of livestock-related water demand.

Water use in poultry production is influenced by the origin and water footprint of maize, wheat, soybean meal and other feed ingredients. This raises an additional issue: part of the water footprint of livestock production may occur outside the geographical region—or even outside the country—where the animal product is produced. Assessments including Türkiye and other Middle Eastern and North

African countries have demonstrated the importance of imported feed and associated virtual-water flows when evaluating the livestock water footprint.

For poultry production, improving feed conversion efficiency, reducing feed losses and mortality, sourcing feed ingredients from regions with lower water scarcity, and considering alternative or by-product feed resources may therefore be more effective strategies than focusing exclusively on direct farm water use.

Comparing Livestock Systems: Beyond Litres per Kilogram: Comparisons among livestock species are frequently presented as litres of water required per kilogram of meat, milk or eggs. Although such indicators are useful for communication, they can oversimplify the environmental meaning of water use. A litre of rainfall used by natural vegetation does not have the same opportunity cost as a litre of groundwater extracted for irrigation in a water-stressed region. This distinction is particularly important for Türkiye. Livestock production extends from rain-fed and rangeland-based systems in Central and Eastern Anatolia to intensive dairy and beef systems relying on irrigated forage in other regions. National averages may therefore conceal substantial regional differences in water scarcity and production practices. The environmental relevance of livestock water use should consequently be assessed according to at least four dimensions: total water footprint, proportion of blue water, regional water scarcity and animal productivity. Feed origin and the use of human-inedible resources such as rangeland vegetation, crop residues and agro-industrial by-products provide additional information on resource efficiency.

From this perspective, the objective of sustainable livestock production in Türkiye should not simply be to identify the species with the lowest volumetric water footprint. Rather, the priority should be to design production systems that generate animal-source

foods while minimizing dependence on scarce freshwater resources and making greater use of locally available rainfall, rangelands, crop residues, alternative feeds and safely recovered water resources.

Tablo 1 Water-use characteristics and water-footprint reduction opportunities of major livestock production systems in Türkiye

Production system	**Main water-related issue**	**Main direct water use**	**Major indirect water component**	**Main opportunities for improvement**
Dairy cattle	Irrigated forage production and heat stress	Drinking, milking, cleaning and cooling	Maize silage, alfalfa and concentrate feeds	Irrigation efficiency, alternative feeds, improved feed efficiency and water reuse
Beef cattle	High feed requirement throughout the production cycle	Drinking and service water	Forages, cereals and concentrate feeds	Improved feed conversion, crop residues, agro-industrial by-products and shorter production cycles
Sheep and goats	Strong regional and seasonal variation in water availability	Drinking water	Rangelands, pastures and supplementary feeds	Greater use of rain-fed resources, rangelands, crop residues and locally adapted feeds
Broilers	Dependence on compound feed ingredients	Drinking and cooling	Cereals and protein-rich feed ingredients	Improved feed efficiency, alternative feed resources and

				appropriate feed sourcing
Laying hens	Indirect water use associated mainly with feed production	Drinking and cleaning	Cereals and protein-rich feed ingredients	Feed efficiency, longer productive life and alternative feed resources

Source: Adapted and synthesized from Hoekstra et al. (2011), Mekonnen and Hoekstra (2012), Karakuş and Demir (2016), Schuenemann et al. (2023), Çolak et al. (2025), and Sarıözkan (2026).

3-Strategies to Reduce the Water Footprint of Livestock Production in Türkiye: Water-management strategies should prioritise the stages of the livestock supply chain where the greatest pressure on freshwater resources occurs. The FAO LEAP guidelines emphasise the importance of transparent water accounting throughout feed and livestock supply chains and recommend that water-use assessment considers climate, agricultural practices, feed utilisation and production-system characteristics (FAO, 2019). Improving crop water productivity, particularly for irrigated feed crops, therefore represents an important intervention point for livestock systems.

At the animal-production level, improved feed conversion, reproductive performance, animal health and longevity can reduce the amount of water and feed required per unit of milk, meat or eggs. Drinking water, however, should be considered differently from other components of the water footprint. Adequate access to clean water is essential for animal health, welfare, digestion and thermoregulation and becomes increasingly important under heat stress. Therefore, water-saving strategies should focus on preventing leakage, overflow and inefficient use rather than restricting animals' physiological water requirements (Zoroaster et al., 2026).

The third component of the framework concerns recovery and reuse of water and nutrients. Wastewater generated by livestock farms and other suitable treated wastewater streams can potentially be recovered and reused for agricultural purposes. Appropriately treated wastewater may partially substitute freshwater used for forage irrigation while simultaneously recycling nutrients such as nitrogen and phosphorus. In this way, water that would otherwise leave the production system as waste can become an input for subsequent forage production.

Water footprint should not be interpreted as an isolated environmental indicator. ISO 14046 defines principles, requirements and guidelines for assessing water-related environmental impacts within a life-cycle framework and allows water footprint assessment to be conducted either independently or as part of a broader environmental assessment (ISO, 2014). Similarly, the FAO LEAP methodology provides livestock-specific guidance compatible with life-cycle assessment principles and international standards (FAO, 2019).

Consequently, water footprint results should increasingly be interpreted together with carbon footprint, land use, nutrient flows and other environmental indicators. Such integration is particularly important when evaluating alternative feeding strategies because an intervention that reduces blue-water consumption may potentially increase energy use, greenhouse gas emissions or other environmental burdens.

Şekil 1 Integrated strategies for reducing the water footprint of livestock production in Türkiye



The use of reclaimed water for crops such as alfalfa, maize, forage grasses and other locally adapted forage species may be particularly relevant in water-stressed regions of Türkiye. Nevertheless, wastewater reuse requires careful management. Microbiological contamination, salinity, sodium, heavy metals and emerging contaminants should be monitored, together with their potential accumulation in soil and plant biomass. Since forage crops

enter the animal production chain, risk assessment should extend across the entire water–soil–plant–animal–food continuum.

The framework can therefore be summarised through three complementary principles: Reduce, Recover and Reuse. Reduce refers primarily to improving water-use efficiency and decreasing unnecessary reliance on blue water; Recover involves capturing water and nutrients that would otherwise be lost from the production system; and Reuse refers to the safe return of appropriately treated water to forage production. These processes close the loop between crop and livestock production and transform water management from a linear "extract–use–discharge" model towards a circular "reduce–recover–reuse" model.

For Türkiye, the application of this framework should be region-specific. Water-scarce Mediterranean and semi-arid regions may prioritise efficient irrigation, drought-resilient forage resources, alternative feeds and reclaimed-water irrigation, whereas predominantly grazing systems may benefit more from improved rangeland management and greater utilisation of rainfall-derived green water. Thus, the objective is not simply to minimise the total volumetric water footprint, but to reduce pressure on scarce freshwater resources while maintaining animal productivity, health and welfare.

4-Treated Wastewater as an Alternative Water Resource for Forage Production: Increasing pressure on freshwater resources requires livestock systems to consider not only how much water is used, but also the quality and source of that water. Appropriately treated wastewater can provide an alternative irrigation source for forage production, particularly in arid and semi-arid regions, while also returning nutrients to agricultural soils.

This approach is consistent with circular-bioeconomy principles, in which water, nutrients and biomass are recovered and

reused rather than lost from the production system. Livestock can play an important role in such systems by converting biomass not directly edible by humans and contributing to nutrient cycling (FAO, 2025). The safe reuse of treated wastewater for forage production can extend this circular approach from nutrient recycling to water recovery.

Feed production represents the largest component of the livestock water footprint (Mekonnen and Hoekstra, 2012). In Mediterranean and semi-arid regions of Türkiye, irrigated forage crops can place considerable pressure on blue-water resources, particularly during dry summer periods. Replacing part of this freshwater with appropriately treated wastewater may therefore provide an important water-saving option. Potential crops include alfalfa (Medicago sativa), silage maize (Zea mays), forage grasses and drought-tolerant species such as sorghum (Sorghum bicolor). Crop selection should consider water requirements, soil characteristics, irrigation method, wastewater quality, feed value and the potential accumulation of undesirable compounds. Evidence from Türkiye supports this approach. Arvas and Taslı (2024) evaluated biologically treated domestic wastewater for alfalfa, orchard grass (Dactylis glomerata) and crested wheatgrass (Agropyron cristatum). Their results showed that plant response and elemental composition varied among species and application levels, indicating that wastewater irrigation should be adapted to specific crops and conditions.

Treated wastewater can provide both irrigation water and nutrients such as nitrogen, phosphorus and potassium. It should therefore be viewed not simply as an effluent requiring disposal, but as a potential secondary resource that can partly replace freshwater and mineral fertilisers. For livestock systems, this creates a circular pathway:

Treated wastewater → forage production → animal feeding → animal production → nutrient/water recovery → forage production

Such integration can improve resource efficiency and strengthen the resilience of crop–livestock systems, particularly where freshwater availability is limited. The main benefits of treated wastewater irrigation are freshwater conservation, nutrient recycling, forage security and circular resource use. Substituting reclaimed water for conventional irrigation can reduce pressure on surface and groundwater resources, while nutrients contained in the water may contribute to crop nutrition. An additional irrigation source may also help maintain forage production during drought or water restrictions. These benefits are likely to become increasingly relevant as climate change increases the variability of freshwater availability and the frequency of drought. Treated wastewater reuse is not without risk. Its suitability depends on treatment level, water quality, irrigation method, soil properties and crop characteristics. Potential concerns include pathogens, salinity, sodium, heavy metals, excessive nutrient loads and emerging contaminants such as pharmaceutical residues and microplastics. Long-term irrigation may also lead to the accumulation of salts or contaminants in soil. For this reason, monitoring should extend beyond irrigation-water quality and follow the entire:

WATER → SOIL → PLANT → ANIMAL → ANIMAL PRODUCT continuum.

This is particularly important for forage crops because they enter the animal feed chain, creating a potential pathway for undesirable substances to reach animals and, ultimately, animal-derived foods. A practical wastewater-reuse programme for forage production should therefore include monitoring at several levels.

Tablo 2 Proposed monitoring framework for the safe use of treated wastewater in forage production along the water–soil–plant–animal–food continuum

Monitoring point	**Key parameters to be monitored**
Treated wastewater	pH, electrical conductivity (EC), salinity, sodium (Na), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), microbiological quality, heavy metals and relevant emerging contaminants
Soil	pH, EC, salinity and sodium accumulation, organic matter, N and P status, heavy metals and long-term contaminant accumulation
Forage crop	Biomass yield, dry matter yield, nutritional composition, mineral profile, microbial contamination, heavy metals and undesirable residues
Animal	Feed intake, growth or milk production, general health status, hematological and biochemical parameters, and indicators of possible contaminant exposure
Animal products	Milk and meat quality, microbiological safety, heavy metals and relevant chemical residues

**The proposed monitoring framework extends wastewater safety assessment beyond water and soil quality to include forage quality, animal responses and the safety of animal-derived foods.*

This approach allows treated wastewater to be evaluated as part of the feed–animal–food system, rather than solely as an irrigation practice. Türkiye has considerable potential for treated wastewater reuse, particularly in regions where high livestock density, substantial forage demand and freshwater scarcity occur together. Mediterranean livestock-production areas are especially relevant because high summer temperatures increase both irrigation requirements and animal drinking-water demand. A practical water-quality hierarchy may therefore be appropriate. High-quality freshwater should remain the priority for animal drinking and critical hygiene, while appropriately treated reclaimed water can be used for suitable forage crops when regulatory and safety requirements are met. Such reuse does not eliminate the livestock water footprint, but it can reduce dependence on conventional blue-water resources.

Future studies in Türkiye should therefore assess not only crop yield but also freshwater substitution, forage nutritional value, soil effects, contaminant transfer, animal responses and environmental impacts. Integrating these outcomes with water-footprint and life-cycle assessment would provide a stronger basis for evaluating the sustainability of reclaimed-water use in livestock systems.

5-Conclusions and Recommendations: Water is becoming a strategic resource for the future of livestock production, particularly in Mediterranean and semi-arid regions such as large parts of Türkiye. The water footprint of animal production is determined not only by the water consumed directly by animals but, to a much greater extent, by the water required to produce feed and forage. Therefore, meaningful water-management strategies should distinguish between green, blue and grey water and consider local water scarcity rather than relying solely on total volumetric water-footprint values.

Animal drinking water deserves consideration. Although its contribution to the total water footprint is relatively small compared with feed-related water use, adequate access to clean and safe drinking water is essential for animal health, welfare, productivity and thermoregulation. This requirement becomes even more critical under heat stress. Consequently, drinking-water restrictions should not be considered a water-saving strategy. Instead, unnecessary losses through leakage, overflow and inefficient watering and cooling systems should be minimised. Future livestock water management in Türkiye should therefore combine conventional water-footprint accounting with life-cycle and water-scarcity perspectives. International methodological frameworks such as ISO 14046 and FAO LEAP provide a basis for moving from simple volumetric indicators towards assessments that consider the environmental consequences of water consumption within specific production and geographical contexts (ISO, 2014; FAO, 2019).

The greatest potential for reducing the water footprint of livestock production lies within the feed-production system. Improving irrigation efficiency, increasing the use of drought-tolerant and locally adapted forage crops, utilising rain-fed resources, and incorporating crop residues and suitable agro-industrial by-products can reduce dependence on scarce freshwater resources. Improving feed conversion, reproductive efficiency, animal health and productive longevity can further decrease water requirements per unit of animal product.

The safe reuse of appropriately treated wastewater represents an additional opportunity for Türkiye. Reclaimed water can potentially substitute for part of the freshwater used for forage irrigation while simultaneously recovering nitrogen, phosphorus and other nutrients. This approach is particularly relevant in water-stressed livestock-producing regions where forage production and animal drinking requirements compete with other sectors for limited freshwater resources. However, wastewater reuse must be based on a risk-based monitoring system. Water quality alone is not sufficient to demonstrate safety. Monitoring should extend through the entire water–soil–plant–animal–food continuum, including soil quality, forage composition, animal health and, where relevant, the safety of milk and meat. Attention should be given to pathogens, salinity, sodium, heavy metals and emerging contaminants.

For Türkiye, future livestock water-management policies and research should therefore focus on five priorities:

1. Reduce dependence on blue water, particularly for irrigated feed and forage production.
2. Protect animal drinking-water requirements, especially under increasing heat stress.
3. Increase the use of locally available and water-efficient feed resources, including rangelands, crop residues, agro-industrial by-products and drought-tolerant forage crops.

4. Recover and safely reuse treated wastewater for suitable forage-production systems, supported by comprehensive monitoring from irrigation water to animal products.
5. Integrate water footprint with carbon footprint and life-cycle assessment, thereby avoiding environmental burden shifting between water use, greenhouse gas emissions, land use and other impacts.

Ultimately, sustainable livestock water management should move from a linear "extract–use–discharge" model towards a circular "Reduce–Recover–Reuse" approach. For Türkiye, this transition can help reconcile livestock production with increasing water scarcity by connecting efficient feed production, adequate animal water supply, reclaimed-water use and nutrient recycling within an integrated crop–livestock system. The future objective should therefore not simply be "less water per kilogram of product", but rather "the right water, of the right quality, used in the right place and at the right time." Such an approach can contribute to water-secure, climate-resilient and environmentally sustainable livestock production in Türkiye.

References

Arvas, Ö., & Taslı, İ. (2024). The effect of biological secondary treated domestic wastewater on agronomic properties and element content of some forage plants. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 27(Suppl. 2), 463–474. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1404764

Çolak, M. S., Polat, H. E., Yıldırım, A. C., & Alptekin, N. D. (2025). The water footprint of raw milk production on a dairy farm. Ziraat Fakültesi Dergisi, 20(2), 89–100. https://doi.org/10.54975/isubuzfd.1819179

Demir, M. S., & Muratoglu, A. (2025). Water footprint concept, approaches, and applications: A comprehensive review for the agricultural sector. Water and Environment Journal, 39(2), 128–142. https://doi.org/10.1111/wej.12968

Erdem, E., Özbaşer Bulut, F.T., Erat, S. (2022). Comparison of Growth and Development Characteristics of Hair and Damascus Kids Reared under Extensive Conditions. Kocatepe Vet J., 15(1), 84-93. https://doi.org/10.30607/kvj.995521

FAO. (2019). Water use in livestock production systems and supply chains: Guidelines for assessment. Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

FAO. (2025). The role of livestock in circular bioeconomy systems. Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. doi:10.4060/cd6765en.

Hayat, F., AL-Zayadneh, W., Khan, U., Asghar, S., Rehman, T., Kandhan, K., & Alyafei, M. (2026). Treated wastewater irrigation: Unlocking sustainability in agriculture and food security—A

comprehensive review. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1595066. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1595066

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK.

ISO. (2014). ISO 14046:2014 Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jensen, M. B., & Vestergaard, M. (2021). Invited review: Freedom from thirst—Do dairy cows and calves have sufficient access to drinking water? Journal of Dairy Science, 104(11), 11368–11385. https://doi.org/10.3168/jds.2021-20487

Karakuş, F., Demir, A. Ö. (2016). An evaluation on water footprint of small ruminants in Turkey. In Proceedings of the EURO-AGRIWAT Conference: Water Footprint of Agricultural Products: Progress, Challenges and Solutions, Wageningen, The Netherlands, 7–9 March 2016.

Kaynak, İ., Güneş, H., Koçak, Ö. (2010). Effects of stocking density on broiler performance. J. Fac. Vet. Med. Istanbul Üniv., 36(1), 9-19.

Kaya, Z.K., Azizoğlu, H., Paksoy, Y. (2024). Kasaplık Kuzu Üretiminde Çevresel Faktörlerin Islahı. BIDGE Publications.

Köseman, A., Şeker, İ., Kul, S., Karaca, M. (2022). Investigation of Herd Structure and Breeding Practices in Sheep Farms in Elazig Province. KSU J. Agric Nat, 25(2), 555-565. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1086849

Küçükerdem, K. (2026). Evaluation of energy consumption and the greenhouse gas emissions on dairy cattle farms in Adana Province of

Türkiye. Çukurova Journal of Agricultural and Food Sciences, 41(1), 106–118. https://doi.org/10.36846/CJAFS.2026.224

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. Ecosystems, 15(3), 401–415. https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8

Muratoglu, A. (2019). Water footprint assessment within a catchment: A case study for Upper Tigris River Basin. Ecological Indicators, 106, 105467. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105467

Ocak, S., Öğün, S., & Emsen, E. (2013). Turkey's animal production water footprint: Heading in the wrong direction. Procedia Technology, 8, 255–263. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.035

Sarıözkan, S. (2026). Türkiye'de hayvansal ürünlere ait su ayak izinin hesaplanması [Calculating the water footprint of livestock products in Türkiye]. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 23(1), 13–19. https://doi.org/10.32707/ercivet.1814459

Schuenemann, F., & Hess, S. (2023). Livestock support and water depletion in Turkey. Water Resources Research, 59, e2020WR028860. https://doi.org/10.1029/2020WR028860

Zoroaster, A., Marcon, C., Contiero, B., Gottardo, F., Peker, A., & Magrin, L. (2026). Effects of heat stress on water intake in Holstein dairy cows: A systematic review and meta-analysis. Journal of Dairy Science. Advance online publication. https://doi.org/10.3168/jds.2025-28150

BÖLÜM 4

HİDROPONİK YEŞİL YEM RASYONA GİRMELİ

Muhammet KARAŞAHİN[1]

Giriş

Su kaynaklarının azalması ve hızlı büyüme nedeniyle su kalitesinin bozulması tatlı su kaynaklarının en büyük kullanıcısı olan tarımda (%70) su kullanımını kısıtlama yoluna gidilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu zorunluluk suyun daha verimli ve etkin kullanıldığı hidroponik üretim tekniklerini ön plana çıkarmaktadır. Hidroponik yeşil yem üretim sistemi; tahıl tanelerinin çimlenme ve büyümeleri için gerekli olan nem, ısı, ışık vb. şartların topraksız ortamda sağlanmasından ibarettir. Bu sistemde tarlada yapılan üretimde kullanılan suyun sadece %3-5'i ile aynı miktarda üretim yapılabilmektedir. Hidroponik ortamda 130 m² alandan bir yılda elde edilen yeşil yem üretimi için 120 ha meraya ihtiyaç duyulmaktadır Al-Karaki and Al-Hashimi (2012). Hidroponik yeşil yem üretimi Dünyada ilk olarak Avustralya'da yaşanılan şiddetli kuraklıklar sonucu ortaya çıkan kaba yem sorununu çözmek için uygulamaya başlanılmıştır. Daha sonra diğer ülkelere yayılmıştır. Özellikle kuraklık, sulama suyu kısıtı, arazi yokluğu ve kaba yemin aşırı

[1] Prof. Dr. Selçuk Üniversitesi Çumra Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu Organik Tarım İşletmeciliği Bölümü ORCID: 0000-0001-8586-0701

pahalılığı gibi durumlarla karşı karşıya kalan bölgelerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Seaman and Bricklebank, 2011).

Tahıl çimi, ön ıslatma sonrası arpa tohumlarının tavalarda 6-8 gün çimlendirme ve filizlendirmeye tabi tutulmasıyla elde edilmektedir. Bu süre sonunda elde edilen halı gibi birbirine geçmiş kökler ile yeşil sürgünler hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Filizlenme sonunda tahıl tanelerinde önemli miktarda ağırlık artışı olmakta ve çimlenme ile tanede bulunan nişasta, protein ve yağ bileşikleri şeker, aminoasit ve yağ asitleri gibi basit formlara dönüşmektedir (Karaşahin, 2022).

Hayvancılıkta girdilerin yaklaşık %70'ini yem maliyetleri oluşturmaktadır. Hayvan sağlığı ve performansı için kaliteli kaba yemlerin rasyonda oranı %40'lara kadar çıkabilmektedir. Kaba yemlerin hayvan fizyolojisine uygunluğu yanında kesif yeme göre ucuz olması hayvansal üretimde kullanımını kaçınılmaz hale getirmektedir (Alçiçek et al., 2010).

Hayvancılığı gelişmiş ülkelerde yem bitkileri ekiliş oranı %25'in üzerinde iken bu oran ülkemizde %9'dur. Türkiye'de yaklaşık 11.2 milyon BBHB hayvan varlığı bulunmakta ve yaklaşık 57 milyon ton kaliteli kaba yeme ihtiyaç duyulmaktadır, ancak bunun % 58'i karşılanabilmektedir ve yaklaşık 24 milyon ton kaliteli kaba yem açığı vardır. Bu açığı kapatabilmek için üretimini ve kalitesini arttırabileceğimiz alternatif kaba yem kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ülke hayvancılığımızın geliştirilmesinde çözülmesi gereken en önemli sorunlardan biri kaliteli ve ucuz kaba yem ihtiyacının karşılanmasıdır. Ülkemiz hayvancılığının ihtiyacı olan kaliteli kaba yem açığın kapatılması durumunda, yem değeri düşük ve selülozca zengin sap, saman ve kavuz gibi kaba yemlerin hayvan beslemede kullanım düzeyi azalacak ve birim hayvandan elde dilen verimlerde iyileşmeler gözlenecektir. Hayvansal üretimde verim artışı maliyetleri düşürecek ülkemiz insanı hayvansal protein ağırlıklı beslenme imkanı elde edecektir. Hayvan beslemede kaliteli kaba yemler, ucuz bir kaynak olması yanı sıra, geviş getiren

hayvanların rumen mikro flora ve faunasının gelişimi için gerekli protein, yağ, selüloz içermesi, mineral ve vitaminlerce zengin olması, hayvanların performansını iyileştirmesi, beslemeye bağlı pek çok metabolik hastalığın önlenmesi ve yüksek kalitede hayvansal ürün sağlaması bakımından önemlidir (Alçiçek et al., 2010). Buğdaygil kaba yemleri başta enerji olmak üzere vitamin ve mineraller bakımından önemli yem kaynaklarından olup dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır (Canbolat, 2012).

Topraksız ortamda çimlendirilmiş tahıl tohumları ekim alanı yetersizliği ve kuraklık yaşanan bölgelerde hayvancılık yapan çiftçiler için alternatif yeşil yem kaynağı olarak önerilmektedir.

Bir hayvanın günlük tüm ihtiyaçlarını karşılayacak yem maddeleri ve katkı maddeleri karışımına rasyon adı verilir. Uygun ve dengeli bir rasyonun, hayvanların yaşama payı ile verim payı için gerekli olan enerji ve besin maddesi ihtiyaçlarını yeterli ve uygun oranlarda içermesi gerekir. Rasyonda tavsiye edilen minimum selüloz düzeyi %17'dir. Bu, hayvanın sağlığı, sindirim faaliyetlerinin düzenli olması ve istenilen süt yağı ile süt veriminin ekonomik olarak sağlanabilmesi için mutlaka gereklidir. Bu oranda ham selüloz düzeyini sağlayabilmek için rasyonda canlı ağırlığın %1-1.5'u oranında kaba yem bulunması gerekir. Su içeriği %15-20'den ya da ham sellüloz içeriği kuru maddede %16-18'den daha fazla olan yemlere kaba yem adı verilir. Toplam rasyonda ham protein oranının %15 ve üzerinde olmasının süt verimi ve süt yağ oranı üzerine olumlu etkide bulunduğu bilinmektedir. Yemin kuru madde kapsamı bir taraftan o yemin besin maddesi ve enerji yoğunluğu hakkında bilgi verirken diğer taraftan rasyonda ne kadar yer alabileceği konusunda da fikir sahibi olmamızı sağlar. Geviş getiren hayvanlarda her türlü azotlu maddeden işkembedeki mikro organizmalar tarafından protein üretiliyor olsa da yüksek verimli ineklerde işkembede üretilen protein miktarı gereksinimin tümünü karşılayamayabilir. Bu durumda rasyonda işkembede

parçalanmayan protein oranının %6 ve daha üzerinde olması istenir (Yavuz, 2006).

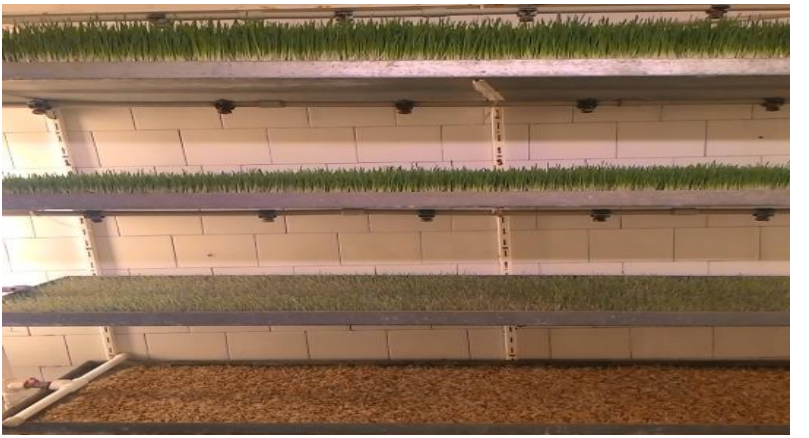
Artan nüfusla birlikte hayvansal gıdalara olan talepte artmaktadır. Hayvan varlığımızda görülen artışa rağmen yem bitkileri ekim alanlarının istenilen seviyeye ulaşmaması ve çayır mera alanlarımızın aşırı otlatma ve bakımsızlıktan zayıf kalmaları hayvanların kaba yem ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte hayvan varlığımızın da ıslah çalışmaları ile entansif tarıma daha yatkın hale gelmesi, ülkemizdeki kaba yem açığının giderek artmasına neden olmuştur. Mevcut kaba yem üretimimiz, toplam kaba yem ihtiyacımızın yaklaşık yarısını karşılayabilmektedir. Bu nedenle, hayvancılık işletmelerinin kaliteli kaba yem gereksinimini karşılamak için çayır meraların ıslahı, yem bitkisi üretim alanlarının artırılması, ucuz ve alternatif diğer kaba yem kaynaklarının hayvansal üretime kazandırılması ve kaliteli kaba yem üretim tekniklerinin üreticilere aktarılması gerekmektedir (Yolcu and Tan, 2008; Alçiçek et al., 2010).

Filizlenme sonunda arpa tanelerinde önemli miktarda ağırlık artışı olmakta ve çimlenme ile tanede bulunan nişasta, protein ve yağ bileşikleri şeker, aminoasit ve yağ asitleri gibi basit formlara dönüşmektedir. Bunun sonucunda hayvanların bağışıklık sistemleri güçlenmekte sağlık ve performanslarında artış sağlanmaktadır. Ayrıca yılın her günü kaliteli yeşil yem üretiminin yapılabilmesi hidroponik yeşil yem üretim sistemlerini gün geçtikçe yaygınlaştırmaktadır (Dung et al., 2010; Fazaeli et al., 2012; Hafla et al., 2014).

Hidroponik Yeşil Yem Üretim Prensibi

Hidroponik yeşil yem üretim sistemi; tahıl tanelerinin çimlenme ve büyümeleri için gerekli olan nem, ısı, ışık vb. şartların topraksız ortamda sağlanmasından ibarettir (Şekil 1 ve 2).

Şekil 1. *Tavalı yeşil yem üretim sistemi*



Şekil 2. *Küvetli yeşil yem üretim sistemi*



Taneler çimlendikten sonra kökler birbirine geçerek halı görünümünü almakta 6-8 gün içerisinde yeşil aksam 16-24 cm boya ulaşmakta ve 4-7 kat yeşil yem elde edilebilmektedir (Şekil 3, 4 ve 5).

Şekil 3. *Birinci günden altıncı güne kadar hidroponik arpa çimi gelişimi*

1. *gün*



2. *gün*



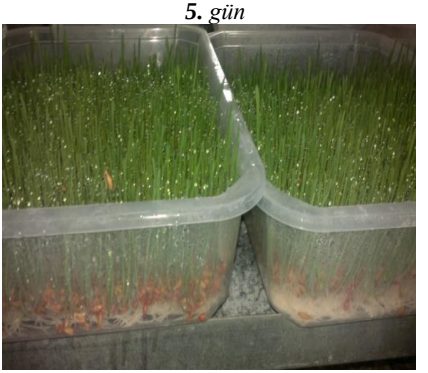
3. *gün*



4. *gün*



5. *gün*



6. *Gün*



Şekil 4. *Altı günlük arpa yeşil yemi*

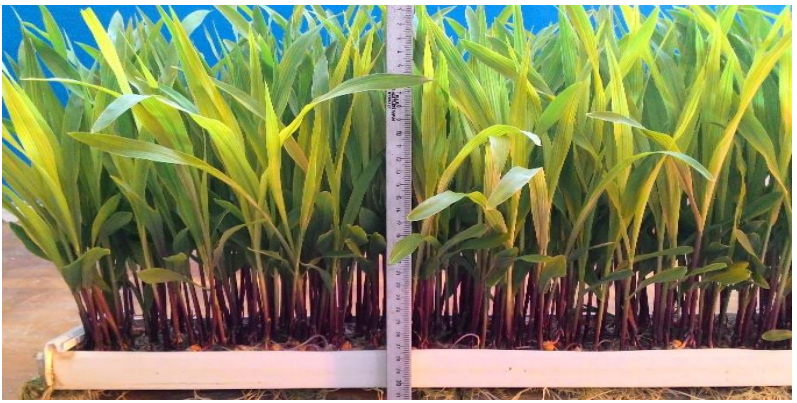


Şekil 5. *Altı günlük arpa çimi kök gelişimi*



Arpa, yulaf, buğday ve mısır gibi tahıl taneleri bu üretimde kullanılabilmekte ise de en yaygın kullanılanı ise arpa taneleridir (Şekil 6 ve 7).

Şekil 6. *Hidroponik mısır çimi*



Şekil 7. *Hidroponik buğday çimi*



Tohum kalitesi: Tohum safiyeti, bin tane ağırlığı, embriyo sağlamlığı gibi unsurlar çimlenmeyi doğrudan etkilediği için hidroponik üretimde kullanılacak tohum kalitesi yüksek olmalıdır.

Ön muamele: Yetiştirme süresince küflenmeyi önlemek için tohumlar 15-20 dakika %10'luk sodyum hipoklorit çözeltisinde bekletilmeli daha sonra ön ıslatma işlemine alınmalıdır.

Ön ıslatma ve priming uygulamaları: Tahıl taneleri 6-24 h süre ile sadece suda veya farklı kombinasyonlarda bitki besin elementi karışımlarında bekletilmektedir. Bu esnada tohum %30-50 oranında su veya karışım alabilmektedir. Bu uygulamaların bitki gelişim parametreleri üzerine olumlu etkileri olmaktadır.

Tohum yoğunluğu: Genelde 4-8 kg/m^2 tohum yoğunluğu tercih edilmektedir.

Sulama: Hidroponik üretimde genellikle sprey veya nutrient film technique sulama yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 8 ve 9).

Şekil 8. *Yağmurlama (sprey) sulama*



Şekil 9. *Nutrient film technique (NFT) sulama*



Aşırı sulama ile tohumlarda çimlenme ve gelişme olumsuz etkilenmekte küflenme artmaktadır. Eksik sulamada ise yeterli su olmadığı için çimlenme ve gelişme olumsuz etkilenmektedir. Sprey sulamalarda çoğunlukla 1-3 saat ara ile 10-40 sn sulama yapılmaktadır. Bazı sistemler drene olan suyu dezenfeksiyondan geçirip tekrar sulamada kullanırken bazıları doğrudan deşarj etmektedirler.

Sıcaklık: Ortam sıcaklığı genelde 18-24 ºC arasında tutulmaktadır.

Işık: Genellikle beyaz ışıklı floranslar ışık kaynağı olarak kullanılmakta 16-24 h ışıklandırma yapılmaktadır.

Nem: Ortam nemi ideal olarak %65-75 arasında tutulmaya çalışılmakta aşırı nemde küflenme ciddi problem olmaktadır.

Hidroponik üretimde verim ve kalite; sistem yönetimi, kullanılan tohum çeşidi ve kalitesi, su kalitesi ve pH, sulama süresi ve sıklığı, ön ıslatma süresi, bitki besi elementi varlığı, sıcaklık, nem oranı, ışık yoğunluğu ve pozisyonu, tohum yoğunluğu ve yetiştirme süresi gibi özelliklerden etkilenmektedir (Sneath and McIntosh, 2003; Dung et al., 2010; Fazaeli et al., 2012).

Hidroponik Yeşil Yem Üretiminin Avantajları

Su tüketimi: Geleneksel tarımda kullanılan su miktarı ile hidroponik üretimde kullanılan su miktarı mukayese edildiğinde; hidroponik üretimde 1-2 lt su ile 1 kg yeşil yem elde edilebilirken geleneksel tarımda 60-90 lt su ile 1 kg yeşil yem üretilebilmektedir (Mooney, 2005; Al-Karaki and Al-Hashimi, 2012).

Arazi kullanımı: Mooney (2005), 52 m^2 kapalı alanda yıl boyunca yapılan hidroponik üretimde elde edilen yeşil yemi meradan elde edebilmek için 4800 da meraya ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Al-Karaki and Al-Hashimi (2012), hidroponik ortamda 130 m^2 alanda

bir yılda elde edilen yeşil yem üretimi için 120 ha sulanabilir tarlaya ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Sürekli aynı kalitede üretim: Bu sistemde yıl boyu kesintisiz aynı kalitede yeşil yem üretme imkanı vardır. Üretim günlük yapıldığı için stok kayıpları oluşmaz.

Organik üretim: Sistemde herhangi bir kimyasal kullanmadan tamamen organik üretim yapma imkanı mevcuttur.

İşçilik: Sistemde hasat, temizlik ve ekimden başka işçilik yoktur. Sulama, havalandırma, ışıklandırma otomatik olarak yapılmaktadır.

Lif, protein oranı ve sindirilebilirliği yüksek ürün: Arpa tanesinde bulunan %3.7 lif oranı 5 günlük arpa çiminde %6'ya çıkmıştır (Fazaeli et al., 2012). Bu sebeple kaba yem üretim imkanı olmayan işletmelerde kaba yem kaynağı olarak kullanılabilir. Hidroponik ortamda üretilen yeşil arpa yeminde ham protein oranı %16-20'lere çıkabilmektedir. Halbuki arpa danesinde bu oran %11-14'ler arasındadır. Arpa danesine göre yeşil yemin sindirilebilirliğinde artış olmaktadır (Özkan, 2012).

Hidroponik Yeşil Yem Üretiminin Dezavantajları

Küflenme: İyi yönetilmeyen hidroponik yetiştirme ortamında küflenme başlıca sorunlardandır. Küflü yeşil yemler hayvanların performansını düşürmekte hatta ölümle bile sonuçlanmaktadır (Myers, 1974).

Sürekli enerji ihtiyacı: Ortamın iklimlendirilmesi için sürekli enerji kullanımı vardır.

Kuru madde kaybı: Dung et al. (2010), orijinal tanenin kuru madde miktarı ile elde edilen yeşil yemin kuru madde miktarı kıyaslandığında kuru madde miktarına artışa dair herhangi bir kayda rastlamadıklarını belirtmişlerdir.

İlk yatırım maliyeti ve amortisman giderleri: Sistemin ilk kuruluşunda gerekli olan yatırım ve bunun amortisman giderleri maliyet analizine dahil edilmelidir.

Hidroponik Yeşil Yem Maliyet Analizi

Araştırma amaçlı kullanılan üretim alanı boyutları küçük olduğu için gerçekçi yeşil yem maliyetlerini yansıtmayacaktır. Bu sebeple 70 metrekarelik bir alanda günlük 750 kg yeşil yem üretim kapasitesi olan ticari üretim sistemi maliyetleri dikkate alınmıştır. Girdi olarak günlük 110 kg arpa, 2 ton su, 2lt dezenfektan, 4 saat işçilik, 60 KW elektrik ve 100 TL amortisman gideri hesap edilmiştir. Üretimde kullanılan arpanın kuru madde oranı %90, ham protein oranı ise %12.2 olarak alınmıştır. Elde edilen yeşil yemin kuru madde oranı %12, ham protein oranı ise %16 olarak maliyet analizine tabi tutulmuştur. Güncel arpa, mısır silajı, yonca, saman ve süt yemi fiyatları ulusal süt konseyi verilerinden alınmıştır. Hidroponik yeşil yem ve tane arpa dışındaki diğer yemlerin kuru madde ve ham protein oranları Kamalak (2005) ile Yaylak and Alçiçek (2003)'den alınmıştır. Bu veriler ışığında hidroponik yeşil yem maliyeti oluşturularak bazı yemlerle mukayesesi yapılmıştır. Kapasite artışı ile birlikte yeşil yem maliyetlerin daha aşağı çekileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Tablo 1).

Tablo 1. *Hidroponik yeşil yem maliyeti ve bazı yemlerle mukayesesi*

Girdiler	Fiyat	Miktar	Tutarı TL	Yem Cinsi	Fiyatı TL	KM Oranı (%)	KM Fiyatı TL Kg^{-1}	HP Oranı (%)	HP Birim Fiyatı
Tane arpa	13	110,0	1430	**Arpa çimi**	4,0	12,0	33,6	16,0	2,1
İşçilik	260	4,00	1040	**Mısır silajı**	4,7	30,0	15,7	7,5	2,1
Enerji	6	60,0	360	**Yonca**	13,0	91,5	14,2	18,4	0,8
Su-Dezen fektan	30	3,0	90	**Saman**	3,5	92,2	3,8	3,1	1,2
Amortis man	50	2,0	100	**Kesif yem**	17,0	88,0	19,3	22,0	0,9
Günlük Toplam Maliyet			3020	**Tane arpa**	13,0	90,0	14,4	12,2	1,2

Yeşil yem üretim maliyetleri ile diğer yem fiyatları kıyaslandığında gerek kuru madde gerekse ham protein birim fiyatları açısından diğer yemlere göre en yüksek maliyetli olduğu görülmektedir. En düşük kuru madde fiyatlı yemin saman olduğu görülürken en düşük ham protein birim fiyatlı yemin ise yoncanın olduğu ortaya çıkmıştır (Tablo 1).

Rasyonda Hidroponik Yeşil Yem Kullanımı İle İlgili Bazı Çalışmalar

Gebremedhin (2015) Konkan Kanyal keçilerinde farklı oranda hidroponik yeşil mısır (HMY) ve arpa (HAY) yeminin etkilerini belirlemek amacıyla araştırma yapmıştır. Kontrolde %100 darı samanı (DS), uygulama 1'de(%80 DS+%20 HMY), uygulama 2 de (%80 DS+%20 HAY), uygulama 3'te (%60 DS+%40 HMY), uygulama 4'te (%60 DS+%40 HAY) ve uygulama 5'te (%60 DS+ %20 HMY+ %20 HAY) rasyonları uygulayarak 90 gün besleme yapmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre hidroponik mısır ve arpa yeşil yeminlerinin keçilere verilmesinin toplam kuru madde alımını, yem dönüşüm verimliliğini, vücut ağırlığı artışını artırdığı ve ekonomik olarak tavsiye edilebilir olduğunu savunmuştur.

Ata (2016) hidroponik arpa yeşil yemi (HAY) ile beslemenin Awassi erkek kuzularının performansına etkisini incelemek amacıyla yürütmüş olduğu çalışmada birinci gruba buğday samanı ile karışık ticari yem uygularken, ikinci gruba ise birinci grubun rasyonundaki dane arpa miktarı kadar HAY ile değiştirerek 90 boyunca besleme yapmıştır. Günde iki kez yemleme yapılmış yenmeyen yemler günlük toplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre HAY diyetiyle beslenen kuzuların, birinci grup diyetiyle beslenen kuzulara kıyasla yem alımı, son vücut ağırlığı, toplam ağırlık artışı,

ortalama günlük ağırlık artışı ve FCR üzerinde istatistiki olarak olumlu bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir.

Kaouche-Adjlane et al. (2016) hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) süt inekleri üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada kontrol uygulaması olarak 9 kg konsantre ticari yem (KTY) ve 15 kg yulaf samanı (YS) ile besleme yaparken araştırma grubunda 9 kg KTY + 5 kg YS+ 10 kg HAY (kuru madde oranı %16.91) ile besleme yapmışlardır. HAY yemi rasyona ilave edilirken kontrol grubunun kuru madde oranına göre değil yem ağırlık hesabı dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre süt örneklerinin fizikokimyasal analiz sonuçlarında sütün faydalı maddesinde anlamlı bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır. Ekonomik açıdan bakıldığında, hidroponik yöntemin tarlada yetiştirilen yemlerle rekabet edemediği ortaya çıktımıştır.

Jeminah et al. (2018) Yeni Zelenda beyaz tavşan yavruları beslemesinde konsantre yem yerine hidroponik mısır yeşil yemi (HMY) karışımlarının büyüme performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Kontrol de sadece konsantre yem, diğer uygulamalarda %75 konsantre+%25 HMY ile %50 konsantre ve %50 HMY rasyonu ile beslemişlerdir. Konsantre yemin %50'sinin HMY ile değiştirilen tavşan yavruları, önemli ölçüde daha yüksek vücut ağırlığı artışı, daha iyi yem dönüşüm oranı (FCR) ve düşük üretim maliyeti gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, hidroponik mısır yeşil yeminin, tavşanların büyümesi ve karlılığı üzerinde herhangi bir olumsuz etki olmaksızın, diyetlerine %50'ye kadar dahil edilebileceği önerisinde bulunmuşlardır.

Ali et al. (2019) hidroponik buğday yeşil yeminin hindiler üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada rasyona farklı (%5, 10, 15 ve 20) oranında yeşil yem ilave etmişler ve elde ettikleri sonuçlara göre %15'e kadar yeşil yem ilavesinin hindilerin büyüme performansını artırdığını ve toplam üretim maliyetini düşüreceğini belirtmişlerdir.

Talalay et al. (2020) . 600 adet Ross 308 broyler tavuğu kullanarak yürüttükleri çalışmada rasyona %15 ve %20 hidroponik arpa yeşil yemi ilave ederek verimlilik ve et kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre rasyona %15-20 oranında hidroponik arpa yeşil yemi eklenmesinin, canlı ağırlıkta artışa, iç yağ içeriğinde %0,5-1,3 oranında azalmaya, kandaki hemoglobin, A vitamini ve karoten miktarında artışa ve deney gruplarındaki kümes hayvanlarının vücudundaki yağ değişiminde iyileşmeye katkıda bulunduğunu ve tavukların et kalitesi üzerinde olumlu etkiler yaptığını belirtmişlerdir.

Upreti et al. (2020) 1 Temmuz 2017 ile 11 Ağustos 2017 tarihleri arasında altı hafta boyunca sütten kesilmiş domuz yavrularının büyümesi ve besin sindirilebilirliği üzerindeki hidroponik mısır yeşil yeminin (HMY) etkilerini belirlemek için araştırma yapmışlardır. Araştırmayı uygulama 1 (%100 konsantre yem), uygulama 2 (%90 konsantre yem ve %10 HMY) ve uygulama 3 (%80 konsantre yem ve %20 HMY) olarak yürütmüşlerdir. Uygulamar arasında günlük ağırlık artışı, en son canlı ağırlık ve yem dönüşüm oranları bakımından istatistiki olarak farklı olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmada HMY oranlarının kuru madde üzerinden değil taze ağırlık üzerinden belirlendiği görülmektedir.

Fazaeli et al. (2021) hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) laktasyon dönemindeki ineklerin performansı üzerine etkilerini belirlemek için yürüttükleri çalışmada U1 kontrol (%62 konsantre ticari yem (KTY) + %20 yonca samanı + %18 mısır silajı) U2, U3 ve U4 rasyonlarında mısır silajı sırasıyla %20, 40 ve 60 oranında HAY ile değiştirilmiş böylece U1, U2, U3 ve U4 rasyonlarının toplam kuru maddesi sırasıyla %62.45, 58.72, 55.45 ve 52.47 olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre günlük süt verimlerinde, süt yağ ve kuru madde ve protein oranlarında istatistiki olarak önemli bir fark bulunmadığını ve HAY üretiminde yaşanılan kuru madde kayıplarının yem maliyetlerinde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Jeminah et al. (2021) hidroponik mısır yeşil yeminin %25 ve 50 oranında ilave edildiği rasyonlarda oğlaklarda daha erken ergenlik başlangıcı ve iyi sperm kalitesi olduğunu ve yem sindirilebilirliğinde artış olduğunu belirtmişlerdir.

Khaziev et al. (2021) hidroponik yeşil yemin rasyona %20, %25, %30 ve %35 oranında hidroponik yeşil yem ilavesinin kazlar üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada rasyona %25-30 oranında hidroponik yeşil yem ilavesinin yumurta üretim oranını %3.8 ve kuluçkalık yumurta verimini %4.9 oranında artırdığını ve kontrol grubuna göre yumurta sarısında karotenoid içeriği ile A ve B2 vitaminlerini artırdığını ve üretim karlılığını ise %9.6 oranında iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Al-Baadani et al. (2022) taze filizlendirilmiş hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) koyunlar üzerine etkilerini belirlemeye yönelik yürütmüş oldukları çalışmada; U1 kontrol (%70 arpa kırması + %30 yonca samanı), U2 (%75 U1+ %25 HAY), U3 (%50 U1+%50 HAY), U4 (%25 U1+%75 HAY), U5 (%100 HAY) rasyonları ile besleme yapmışlardır. Rasyonların kuru madde oranlarının sırasıyla U1 %95.5, U2 %76.7, U3 %57.8, U4 %38.9, U5 %20.1 olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, HAY yem ilavesinin sindirilebilirliği ve fermantasyon özelliklerini iyileştirirken, büyümeyi olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir.

Al-Kanaan et al. (2022) toplam 500 broyler tavuk kullanarak yürüttükleri araştırmada kontrol grubunu ticari pelet yem ile beslerken diğer iki grupta rasyonda %10 ve %20 oranında hidroponik arpa yeşil yemi ilave ederek ticari yem ile birlikte pelet haline getirip besleme yapmışlardır. En son grupta ise konsantre ticari pelet yemden ayrı olarak verilen taze doğranmış hidroponik arpa yeşil yemi kullanmışlardır. Sonuç olarak %10 hidroponik arpa yeşil yemi ilavesinin ve bunun taze doğranmış olarak sunulmasının, verimlilik performansını, mikrobiyal popülasyonu ve bağırsak morfolojisini iyileştirdiği ve 5 haftaya kadar olan besleme süresince

broyler üretim maliyetlerinde %9'luk bir azalma ile ekonomik değer göstergelerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Robinson and Baum (2022) hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) Saanen keçileri ve Friesian koyunlarının süt üretimi ve süt bileşimi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapmış oldukları çalışmada keçi rasyonlarında kontrol içerisinde yonca ve çim samanı bulunan konsantre ticari yem U1 (758 g/gün HAY), U2 (1498 g/gün HAY) ve U3 (2270 g/gün HAY) yer alırken, koyun rasyonlarında ise kontrol içerisinde yonca ve çim samanı bulunan konsantre ticari yem U1 (454 g/gün HAY), U2 (908 g/gün HAY) ve U3 (1362 g/gün HAY) yer almıştır. Kontrol, U1, U2 ve U3 rasyonlarının toplam kuru maddelerinin sırasıyla %90.2, 84.1, 79 ve 74.7 olduğu belirtilmiştir. Bu rasyonlara ilave olarak keçilere (798 g/gün) ve koyunlara (400 g/gün) sabah ve akşam sağımında tahıl karışımı verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre HAY ilavesi süt verimini istatistiki olarak etkilememiştir. Süt yağı içeriklerinde ise hem koyunlarda hemde keçilerde artış görülmüştür. Keçilerin kontrol rasyonu maliyetleri 0,82$/gün olurken, koyunlarda ise 0,72$/gün bulunmuş, yüksek düzeyde HAY ilavesi yapılan keçi rasyonlarında maliyet 1,06$/gün olurken koyunlarda 0,91$/gün elde edilmiştir.

Alharthi et al. (2023) hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) kuzular üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada U1 kontrol (%70 arpa kırması + %30 yonca samanı), U2 (%75 U1+ %25 HAY), U3 (%50 U1+%50 HAY), U4 (%25 U1+%75 HAY), U5 (%100 HAY) rasyonları ile besleme yapmışlardır. Rasyonların kuru madde oranlarının sırasıyla U1 %95.5, U2 %76.7, U3 %57.8, U4 %38.9, U5 %20.1 olduğu görülmektedir. HAY ile besleme yem sindirilebilirliğini ve rumen histomorfometrisini iyileştirdiği ve bazı uçucu yağ asitlerinin ve rumen bakterilerinin (*Anaerovibrio Lipolytica, Butyrivibrio Fibrisolvens*, and *Streptococcus Bovis Selenomonas Ruminantium)* konsantrasyonunu artırdığı, ancak ortalama kuru ve organik madde alımında azalmaya neden olduğu belirtilmiştir.

Arif et al. (2023) hidroponik mısır (HMY) ve arpa yeşil yemi (HAY) ile beslenen keçilerin besin sindirilebilirliği, büyüme ve tüketilen yem verimliliği ve bazı kan bileşenleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; kontrol (%100 temel diyet (TD; %80 yonca samanı+%20 buğday samanı)), U1 (%80 TD+%20 HMY), U2 ((%80 TD+%20 HAY), U3 (%60 TD+%40 HMY), U4 (%60 TD+%40 HAY), U5 (%60 TD+%20 HMY+%20 HAY) rasyonlarını 90 gün süre ile uygulayarak besleme yapmışlardır. Ayrıca kontrol dahil tüm uygulama gruplarına hayvan başına günlük 100 g konsantre yem vermişlerdir. U5 uygulama grubu diğer deney gruplarına kıyasla en yüksek nihai ağırlık, ağırlık artışı ve toplam ağırlık artışı değerlerini ve en düşük yem dönüşüm oranı elde ettiklerini bildirmişlerdir. Ek olarak, iki tip hidroponik yem içeren bir diyetle beslenen keçiler (U5), diğer deney gruplarına kıyasla tüm besin sindirilebilirliğinde ve toplam azot dengesinde oldukça önemli bir iyileşme gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Roy et al. (2023) hidroponik mısır yeşil yeminin (HMY) Bengal keçilerinin performansı üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmada kontrol grubuna konsantre yem verirken diğer gruba konsantre yemde %56 oranında bulunan mısır kırmasına karşılık gelecek şekilde HMY ile değiştirerek 70 gün süre ile besleme yapmışlardır. Sonuç olarak; HMY ile konsantre yemin birlikte verilmesinin Bengal keçilerinin kuru madde alımını, yemden yararlanma oranını ve vücut ağırlığı artışı açısından büyüme performansını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Baye et al. (2024) broyler yemine %3.5, %7 ve %10.5 hidroponik yeşil arpa yemi ilave ederek etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, %10,5 hidroponik yeşil arpa yemi takviyesinin, karkas özelliklerini iyileştirdiğini ve diğer uygulamalara kıyasla daha yüksek net gelir sağladığını belirtmişlerdir.

Masucci et al. (2024) hidroponik arpa yeşil yeminin (HAY) laktasyon dönemindeki bufaloların süt verimi ve bileşenleri üzerine etkilerini belirlemek için yürüttükleri çalışmada kontrol U0 (16 kg

mısır silajı, 4kg yonca samanı, 4kg yonca silajı, 1kg karışık saman, 3.8kg mısır unu, 2kg konsantre yem), ve diğer iki uygulamada rasyondaki sadece mısır silajı U1%50 ve U2%100 oranında HAY yemi ile değiştirilerek 5 haftalık besleme deneyi yapmışlardır. U0, U1 ve U2 rasyonlarının toplam kuru madde oranlarının sırasıyla %54, 42.6 ve 40.5 olduğu görülmektedir. HAY yem maliyetinin çiftlikte üretilen mısır silajının 4 katı olduğunu bu sebeple süt üretim maliyetlerini artırdığını belirtmişlerdir.

Min et al. (2024) ticari besleme rasyonuna %5, 10, 15 ve 20 oranında hidroponik buğday yeşil yemi (HBY) ilave ederek koyunlar üzerine etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre %15 HBY ilave edilen rasyonlarda en yüksek üretim performansı ve net kar elde etmeyi başarmışlardır. HBY ile besleme sonrasında bağışıklık sisteminin güçlenmesini ve yem sindirilebilirliğinde görülen artışı rumen florasında Olsenella ve Limosilactobacillus bakteri miktarlarındaki artış ile izah etmişlerdir.

Rajak et al. (2024) Kara Bengal keçilerinin büyüme ve üreme performansları üzerine hidroponik yeşil yemle beslenmenin etkilerini değerlendirmek amacıyla çalışma yürütmüşlerdir. Kontrol (C) grubunu; arazide otlatma, nohut samanı, konsantre yem ve yeşil yem ile beslemişlerdir. Uygulama 1 (U1) grubunda; C grubuna ek olarak günde 300 g hidroponik buğday yeşil yemi (HBY), U2 grubunda; günde sadece 300 g hidroponik mısır yeşil yemi (HMY), U3 grubunda; C grubuna ek olarak günde 150 g HBY ve 150 g HMY kombinasyonu ile besleme yapmışlardır. Büyüme performansı açısından, U3 uygulamasından en yüksek vücut ağırlığı artışı ve günlük ağırlık artışı ile en yüksek yavru doğum ağırlığı elde etmişlerdir. Sonuç olarak, HMY ve HAY yemi (U3) kombinasyonunun, yalnızca HMY ve HAY ile beslemeye kıyasla daha iyi büyüme ve üreme performansı sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, bu besleme stratejisinin, canlı ağırlık artışı başına maliyeti düşürerek, bölgedeki keçi yetiştirme sistemlerinin

sürdürülebilirliğini ve karlılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Johnson (2025) kontrol grubunda ticari rasyon kullanarak diğer gruplarda kuru madde bazında %10, %20 ve %30'u oranında hidroponik arpa yeşil yemi içeren rasyonlar oluşturarak koyunlar üzerine etkilerini araştırmıştır. Rasyonun %10'u oranında hidroponik arpa yeşil yemi verilmesinin, yem maliyetlerinde ve net gelirde artış sağladığını belirtmiştir.

Yasmin et al. (2025) hidroponik mısır yeşil yemi (HMY) ve hidroponik sesbania yeşil yemlerinin (HSY) ticari konsantre yem (TKY) yerine kısmi ikame olarak kullanılmasının hindi üretimindeki etkilerini belirlemek amacıyla yürüttükleri çalışmada; uygulama 1 (U1) (%100 TKY), U2 (%90 TKY+%10 hidroponik yeşil yem (%80 HMY+ %20 HSY), U3 (%70 TKY+%30 hidroponik yeşil yem (%70 HMY+ %30 HSY), ve U4 (%60 TKY+%40 hidroponik yeşil yem (%60 HMY+ %40 HSY) rasyonları ile besleme yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre en yüksek günlük ağırlık artışı (20,61 g/gün) U2 grubundaki hindilerde olmuştur. Bu grup ayrıca en iyi yem verimliliğine (4,03) ve en yüksek karlılık endeksine (0,36) sahip olduğunu belirlemişlerdir. Yapmış oldukları ekonomik analizde U2'nin en yüksek net çiftlik gelirine sahip olduğunu ve hidroponik yem takviyesinin maliyet etkin bir strateji olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, hidroponik yeşil yemim rasyona girdiği tüm gruplarda %100 hayatta kalma oranı belirlendiği gibi, bağırsak sağlığını iyileştirdiği, besin biyoyararlılığını artırdığı ve oksidatif stresi azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Birçok araştırmacı rasyonlarında hidroponik mısır, arpa veya buğday yeşil yemin yer aldığı oğlak ve keçilerin (Gebremedhin 2015; Jemimah et al., 2021; Arif et al., 2023; Roy et al., 2023; Rojak et al., 2024), koyun ve kuzuların (Ata 2015; Min et al., 2024; Johnson 2025), broyler tavuklarının (Talalay et al., 2020; Al-Kanaan et al., 2022; baye et al., 2024), hindi ve kazların (Yasmin et al., 2015; Ali et al., 2019; Khaziev et al., 2021), tavşanların (Jeminah et al.,

2018) bağırsak mikroflorasının iyileştiğini oksidatif streslerinin azaldığını, bağışıklık sistemlerinin güçlendiğini, yemlerin sindirilebilirlikleri ile biyoyararlılıklarının arttığını, büyüme ve gelişim performansları ile yem dönüşüm oranları üzerine olumlu etkiler sağladığını böylece canlı ağırlık artışı başına maliyeti düşürerek hayvancılıkta sürdürülebilirliği ve karlılığı artırma potansiyeline sahip olduğunu belirtilmişlerdir.

Yine hidroponik yeşil yemlerin rasyona girmesinin farklı hayvanlar; süt inekleri ve bufalolar (Kauche-Adjlane et al., 2016; Fazaeli et al., 2021; Masucci et al., 22024), koyun ve keçiler (Al-Baadani et al., 2022; Robinson and Baum, 2022; Alharthi et al., 2023) ve domuzlar (Upreti et al., 2020) üzerine etkilerinin araştırıldığı bazı çalışmalarda ise kontrol grubu ile yapılan uygulamalar arasında istatistiki olarak anlamlı farklılığın olmadığı, organik madde alımında azalmaya neden olduğu, büyümeyi olumsuz etkilediği ve ekonomik açıdan hidroponik yeşil yemlerin tarlada yetiştirilen yemlerle rekabet edemediği belirtilmektedir.

Yukarıdaki hem olumlu hem olumsuz sonuç alınan çalışmalar incelendiğinde olumsuz sonuç alınan araştırmaların çoğunda hidroponik yeşil yemlerin rasyona dahil edilmesinde kuru madde ağırlıklarının değil taze yaş ağırlıklarının dikkate alındığı görülmektedir.

Sonuç

Hidroponik ortamda üretimde çimlenme anında tohumlarında depo edilen enerji kullanıldığından kuru madde kaybı olmaktadır. Arpa çimleri mineral madde alımı ve etkili fotosentez ile birlikte yeniden kuru madde kazanabilmekte fakat büyüme süresi kısalığı nedeniyle genellikle kuru madde kayıpları %7 ile 40 arasında değişmektedir. Kuru madde oranı tohum hazırlama, tohum yoğunluğu, sulama ve yetiştirme süresinden etkilenmektedir. Optimum metot ve şartlarda kaybedilen kuru madde %90 oranında yeniden kazanılabilmektedir (Sneath and McIntosh 2003).

Besin değerini ölçme açısından yalnızca yeşil yem ağırlığı değil kuru madde verimi, enerji ve protein değerleri de dikkate alınmalıdır. Hayvan gelişimi ve performansında protein hayati rol oynamaktadır. Bu sebeple yemde bulunan protein miktarı yemin değerini belirlemede çok önem arz eder. Hidroponik yeşil yem üretiminde özellikle vitamin E, beta-karoten, biotin ve serbest folik asit miktarında önemli artışlar elde edilmiştir (Sneath and McIntosh, 2003; Dung et al., 2010; Fazaeli et al., 2012). Bu sayılan faydaları destekleyici bir diğer unsurda çözünebilir çim suyu faktörüdür. Çim suyu faktörü; sistemik bağışık sistemini güçlendirici olarak güçlü bir tedavi edici unsurdur. Çim suyunun bu faydalı etkileri E ve C vitaminleri ile biyoflavonoidler bakımından zengin besin madde kaynağı olmaları sebebi iledir (Yadav et al., 2013).

Sadece yeşil yem veriminin dikkate alındığı maliyet analizlerinde sistem ekonomik olurken kuru madde veriminin ön planda tutulduğu maliyet analizlerinde ise sistemin ekonomik olmadığı anlaşılmaktadır. Maliyet analizlerinde yeşil yem, kuru madde ve ham protein verimlerinin yanında, enerji değerleri, sindirilebilirlik oranları, arazi ve sulama suyu varlığı, iklim, vitamin içeriği, çim suyu faktörünün hayvanlar üzerindeki döl tutma, performans ve bağışıklık sistemi üzerine etkileri ile nihai ürün kalitesi gibi unsurlar dikkate alınarak hidroponik yeşil yemlerin rasyona dahil edilmesine karar verilmelidir (Karaşahin, 2014).

Konu ile ilgili daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde; hayvancılıkta verim, kalite ve ekonomiklik bakımından toplam rasyon içerisinde %10-20'si oranında hidroponik yeşil yem kullanımının doğru bir yaklaşım olduğu kanaatine varılmıştır. Mevcut rasyonda hidroponik yeşil yem ile değişim yaparken taze ağırlıkları değil kuru madde oranları dikkate alınmalıdır.

Kaynakça

Al-Baadani, H. H., Alowaimer, A. N., Al-Badwi, M. A., Abdelrahman, M. M., Soufan, W. H., & Alhidary, I. A. (2022). Evaluation of the nutritive value and digestibility of sprouted barley as feed for growing lambs: In vivo and in vitro studies. *Animals*, 12 (9), Article 1206. https://doi.org/10.3390/ani12091206

Alçiçek, A., Kılıç, A., Ayhan, V., & Özdoğan, M. (2010). *Türkiye'de kaba yem üretim ve sorunları*. Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi, Ankara, Türkiye.

Alharthi, A. S., Al-Baadani, H. H., Abdelrahman, M. M., & Alhidary, I. A. (2023). Effects of feeding different levels of sprouted barley on fermentation characteristics, bacterial quantification, and rumen morphology of growing lambs. *Veterinary Sciences*, 10 (1), Article 15. https://doi.org/10.3390/vetsci10010015

Ali, H. S., Miah, A. G., Sabuz, S. H., Asaduzzaman, M., & Salma, U. (2019). Dietary effects of hydroponic wheat sprouted fodder on growth performance of turkey. *Research in Agriculture, Livestock and Fisheries*, 6 (1), 101–110. https://doi.org/10.3329/ralf.v6i1.41388

Al-Kanaan, A. J. J. (2022). Effects of adding different levels of hydroponic barley fodder on the productive performance and economic value of broiler chickens. *Archives of Razi Institute*, 77 (5), 1853–1864. https://doi.org/10.22092/ARI.2022.358245.2185

Al-Karaki, G., & Al-Hashimi, M. (2012). Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. *ISRN Agronomy*, Article 924672. https://doi.org/10.5402/2012/924672

Arif, M., Iram, A., Fayyaz, M., Abd El-Hack, M. E., Taha, A. E., Al-Akeel, K. A., Swelum, A. A., Alhimaidi, A. R., Ammari, A., Naiel, M. A. E., & Alagawany, M. (2023). Feeding barley and corn

hydroponic based rations improved digestibility and performance in Beetal goats. *Journal of King Saud University – Science*, 35 (1), Article 102457. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102457

Ata, M. (2016). Effect of hydroponic barley fodder on Awassi lambs performance. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6 (8), 60–64.

Baye, W., Moges, F., & Andualem, D. (2024). Effect of hydroponic barley fodder on growth performance, carcass yield and carcass quality of Cobb 500 broilers. *Heliyon*, 10 (13), Article e33909. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33909

Canbolat, Ö. (2012). Bazı buğdaygil kaba yemlerinin in vitro gaz üretimi, sindirilebilir organik madde, nispi yem değeri ve metabolik enerji içeriklerinin karşılaştırılması. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 18 (4), 571–577. https://doi.org/10.9775/kvfd.2011.5831

Dung, D. D., Godwin, I. R., & Nolan, J. V. (2010). Nutrient content and in sacco digestibility of barley grain and sprouted barley. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9 (19), 2485–2492. https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2485.2492

Fazaeli, H., Golmohammadi, H. A., Tabatabayee, S. N., & Asgari-Tabrizi, M. (2012). Productivity and nutritive value of barley green fodder yield in hydroponic system. *World Applied Sciences Journal*, 16 (4), 531–539.

Fazaeli, H., Golmohammadi, H. A., & Tabatatbaei, S. N. (2021). Effect of replacing dietary corn silage with hydroponic barley green fodder on Holstein dairy cows performance. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 11(1), 47–57.

Gebremedhin, W. K. (2015). Nutritional benefit and economic value of feeding hydroponically grown maize and barley fodder for

Konkan Kanyal goats. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 8 (7), 24–30.

Hafla, A. N., Soder, K. J., Brito, A. F., Rubano, M. D., & Dell, C. J. (2014). Effect of sprouted barley grain supplementation of an herbage-based or haylage-based diet on ruminal fermentation and methane output in continuous culture. *Journal of Dairy Science*, 97 (12), 7856–7869. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8430

Jemimah, E. R., Gnanaraj, P. P. T., Muthuramalingam, T., Devi, T., Bharathidasan, A., & Sundaram, A. S. (2018). Growth performance and economics of feeding hydroponic maize fodder with replacement of concentrate mixture in New Zealand White rabbit kits. *Journal of Animal Health and Production*, 6 (2), 73–76. http://dx.doi.org/10.17582/journal.jahp/2018/6.2.73.76

Jeminah, E. R., Paulpandi, T. G., Kumar, T. S., Gopinathan, A., & Sundaram, S. M. (2021). Supplementation of the diets with hydroponic maize fodder affects digestibility, puberty, sexual behavior, and semen characteristics in buck kids. *Tropical Animal Health and Production*, 53 (2), Article 310. https://doi.org/10.1007/s11250-021-02761-9

Johnson, F. (2025). *Evaluating the economic viability of feeding hydroponic barley fodder to growing wethers*. https://digitalcommons.usu.edu/gradreports2023/77

Kamalak, A. (2005). Bazı kaba yemlerin gaz üretim parametreleri ve metabolik enerji içerikleri bakımdan karşılaştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (2), 116–120.

Kaouche-Adjlane, S., Serir, A. A., Bafdel, M., & Benhacine, R. (2016). Techno-economic approach to hydroponic forage crops: Use for feeding dairy cattle herd. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 6 (3), 83–87.

Karaşahin, M. (2014). Kaba yem kaynağı olarak hidroponik arpa çimi üretiminde kuru madde ve ham protein verimleri üzerine farklı uygulamaların etkileri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9 (1), 27–33.

Karaşahin, M. (2022). Hidroponik çim. *Nobel Akademik Yayıncılık.*

Khaziev, D., Gadiev, R., Yusupova, C., Kazanina, M., & Kopylova, S. (2021). Effect of hydroponic green herbage on the productive qualities of parent flock geese. *Veterinary World*, 14 (4), 841–846. https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.841-846

Masucci, F., Serrapica, F., Cutrignelli, M. I., Sabia, E., Balivo, A., & Di Francia, A. (2024). Replacing maize silage with hydroponic barley forage in lactating water buffalo diet: Impact on milk yield and composition, water and energy footprint, and economics. *Journal of Dairy Science*, 107 (11), 9426–9441. https://doi.org/10.3168/jds.2024-24902

Min, L., Tuo, Y., Li, D., Zang, C., Amat, G., Zhang, Z., & Guo, T. (2024). Impact of 5–20% hydroponic wheat sprouts inclusion on growth and metabolic parameters of growing ewes. *Animals*, 14 (11), Article 1630. https://doi.org/10.3390/ani14111630

Mooney, J. (2005). *Growing cattle feed hydroponically*. Meat and Livestock Australia.

Myers, J. R. (1974). *Feeding livestock from the hydroponic garden* [Yüksek lisans tezi, Arizona State University].

Özkan, P. (2012). *Taze yeşil yem üretiminde arpanın çimlenme performansının arttırılması üzerine araştırmalar* [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.

Rajak, S. K., Singh, A. K., Singh, A. K., Rai, A., & Gangwar, A. (2024). Assessment of feeding hydroponic fodder on growth and

reproduction performance in Black Bengal goat. *Tropical Animal Health and Production*, 56 (8), Article 388. https://doi.org/10.1007/s11250-024-04233-2

Robinson, T. F., & Baum, E. (2022). Inclusion of barley fodder in alfalfa/grass-based diets on milk production in goats and milking sheep. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 17 (2), 122–129. https://doi.org/10.3844/ajavsp.2022.122.129

Roy, A., Shee, A., Saren, A. K., Datta, S., & Sarkar, P. (2023). Study on effect of hydroponic maize fodder on performance of Bengal goat. *Journal of Animal Research*, 13 (4), 591–595. https://doi.org/10.30954/2277-940X.04.2023.15

Seaman, C., & Bricklebank, N. (2011). *Soil-free farming*. Society of Chemical Industry. https://www.soci.org/Chemistry-and-Industry/CnI-Data/2011/6/Soil-free-farming

Sneath, R., & McIntosh, F. (2003). *Review of hydroponic fodder production for beef cattle* (Project No. PRCOP.009). Meat and Livestock Australia.

Upreti, S., Ghimire, R. P., Tiwari, M. R., & Banskota, N. (2020). Production and economic feasibility of hydroponics maize fodder on performance of piglets. *Nepal Journal of Science and Technology*, 19 (2), 109–115. https://doi.org/10.3126/njst.v20i1.39445

Yadav, M., Sethi, J., Dahiya, K., Sood, S., Gupta, V., Singh, V., Talwar, A., & Sharma, R. (2013). Effect of *Triticum aestivum* on physiological and biochemical parameters in high fat diet fed rabbits. *JK-Practitioner*, 18 (3–4), 39–42.

Yasmin, K., Rashedi, M. A., Mehta, B. K., Salma, U., & Miah, A. G. (2025). Sustainable turkey farming: The role of hydroponic sprouted fodder in feed optimization. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 13 (3), 139–145. https://doi.org/10.3126/ijasbt.v13i3.84975

Yavuz, H. M. (2006). Süt sığırlarının beslenmesinde temel ilkeler. *Sütaş Süt Hayvancılığı Eğitim Merkezi Yayınları*.

Yaylak, E., & Alçiçek, A. (2003). Sığır besiciliğinde ucuz bir kaba yem kaynağı: Mısır silajı. *Hayvansal Üretim*, 44 (2), 29–36.

Yolcu, H., & Tan, M. (2008). Ülkemiz yem bitkileri tarımına genel bir bakış. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 14 (3), 303–312. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001048

BÖLÜM 5

SÜT SIĞIRI RASYONLARININ OPTİMİZASYONUNDA YAPAY ZEKÂNIN KULLANIMI

ESRA KAYA[1] HÜSEYİN DENK[2]

Giriş

Süt Sığırı İşletmelerinde Rasyon Optimizasyonunun Önemi

Süt sığırcılığı işletmelerinde yemleme stratejileri, üretim performansı ve işletme ekonomisi üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Hayvancılık sektöründe üretim maliyetlerinin yaklaşık %50–80'inin yem bileşenlerinden kaynaklandığı bildirilmektedir (Usigbe et al., 2025). Bu nedenle hayvanların besin madde gereksinimlerini karşılayacak, ekonomik ve dengeli rasyonların hazırlanması süt sığırcılığı işletmeleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Artan dünya nüfusu ve yüksek kaliteli hayvansal ürünlere yönelik talep, süt sığırcılığında daha hassas ve etkin yem formülasyonlarına olan ihtiyacı artırmıştır. Yemlerin besin madde

[1]Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Celal Oruç Hayvansal Üretim Yüksekokulu, ORCID:0000-0002-4697-7365
[2]Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Celal Oruç Hayvansal Üretim Yüksekokulu, ORCID:0000-0003-2591-0361

içeriği hayvanların fizyolojik durumunu doğrudan etkilemekte, yeterli düzeyde protein, enerji, vitamin ve mineral içeren dengeli rasyonlar hayvan sağlığı ve verimliliğinin sürdürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yem kalitesinin süt kalitesini etkilediği, yemlerin besin madde profili ile süt bileşimi arasında doğrudan bir ilişki bulunduğu bildirilmektedir (Akintan et al., 2025). Geleneksel yem formülasyon yöntemleri uzun yıllardır kullanılmasına rağmen, yem hammaddelerindeki kalite değişimleri, hayvanların besin madde gereksinimlerindeki farklılıklar ve çevresel koşullar gibi değişkenleri yeterince dikkate alamamaktadır. Bu yöntemler çoğunlukla sabit yem oranlarına ve genel besleme yaklaşımlarına dayanmakta olup, besin maddelerinin kullanımında verimsizliklere ve yem maliyetlerinde artışa neden olabilmektedir (Akintan et al., 2024; Akintan et al., 2025).

Son yıllarda veri bilimi, makine öğrenmesi ve yapay zekâ teknolojilerindeki gelişmeler, süt sığırı beslemesinde yeni yaklaşımların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapay zekâ sistemleri; besleme, ekonomi, genetik, üreme, sağlık, üretim ve çevre ile ilgili verileri birlikte değerlendirerek karar verme süreçlerini destekleyebilmektedir (Bach, 2026). Makine öğrenmesi modelleri ise yem bileşimi, yem tüketimi ve hayvan sağlığına ilişkin verileri analiz ederek rasyonların hayvanların ihtiyaçlarına göre düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Günümüzde süt sığırcılığı işletmelerinde kullanılan sensörler ve dijital kayıt sistemleri büyük miktarda veri üretmektedir. Bu verilerin analizinde kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri süt veriminin tahmin edilmesi, süt bileşenlerinin izlenmesi ve besleme etkinliğinin değerlendirilmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Grzesiak et al., 2025). Ayrıca yapay zekâ destekli modellerin, farklı yem hammaddelerinin ve besin maddelerinin optimum kombinasyonlarını belirleyerek süt verimi ve işletme kârlılığının artırılmasına yardımcı olabileceği bildirilmektedir (Bach, 2026). Bu nedenle yapay zekâ uygulamaları, süt sığırı rasyonlarının daha hassas biçimde optimize edilmesine olanak sağlayan önemli araçlar olarak değerlendirilmekte ve modern süt sığırcılığı işletmelerinde giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır.

Hassas Besleme Kavramı

Hassas besleme (precision livestock feeding), hassas hayvancılık (precision livestock farming, PLF) yaklaşımının bir parçası olarak geliştirilmiş olup, hayvanlara gereksinim duydukları besin maddelerinin uygun miktarda, uygun bileşimde ve uygun zamanda sağlanmasını amaçlayan bir besleme yaklaşımıdır. Pomar et al. (2019), hassas beslemeyi, bireysel hayvanlara veya hayvan gruplarına performans kaybı oluşturmadan besin maddelerinden yararlanmayı en üst düzeye çıkaracak miktarda besin maddesinin gerçek zamanlı olarak sağlanması şeklinde tanımlamıştır. Ayrıca hassas beslemenin, hayvanların besin madde gereksinimlerinde zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin ve hayvanlar arasındaki gereksinim farklılıklarının dikkate alınmasına dayandığı belirtilmiştir. Hassas besleme yaklaşımı, hassas hayvancılığın temel amaçları ile doğrudan ilişkilidir. Berckmans (2017), hassas hayvancılığı; hayvan sağlığı, refahı, üretim performansı ve çevresel etkilerin bireysel hayvan düzeyinde sürekli ve gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve yönetilmesi olarak tanımlamıştır. Bu yaklaşımda kameralar, mikrofonlar ve çeşitli sensörler kullanılarak hayvanlardan sürekli veri toplanmakta ve elde edilen bilgiler yönetim kararlarında kullanılmaktadır.

Hassas hayvancılık sistemlerinde temel amaç, üretim süreçlerinin sürekli izlenmesi ve yönetilmesidir. Berckmans (2017), hassas hayvancılığın çiftçilere gerçek zamanlı uyarılar sağlayarak sorunların erken dönemde belirlenmesine ve hızlı müdahaleye olanak verdiğini bildirmiştir. Bu sistemler, hayvanlardan elde edilen verilerin sürekli olarak analiz edilmesine dayanmakta ve yönetim kararlarının daha doğru şekilde alınmasını desteklemektedir. Halachmi & Guarino (2016), hassas hayvancılığı "hayvan bazlı yaklaşım (per animal approach)" olarak tanımlamış ve bu yaklaşımın gerçek zamanlı izleme teknolojileri kullanılarak bireysel hayvanlardaki değişkenliğin yönetilmesine dayandığını belirtmiştir. Araştırmacılar, bireysel yem tüketiminin tahmin edilmesinde farklı sensörlerin kullanılabildiğini ve yemleme davranışına ilişkin bilgilerin yem tüketim modellerine entegre edilebildiğini bildirmiştir. Ayrıca hassas hayvancılık uygulamalarının bireysel yem

tüketimi, hayvan davranışları, sağlık durumu ve refah göstergelerinin izlenmesinde kullanılabildiği belirtilmiştir.

Pomar et al. (2019), hassas beslemenin uygulanabilmesi için üç temel unsurun gerekli olduğunu belirtmiştir. Bunlar; verilerin otomatik olarak toplanması, toplanan verilerin işlenmesi ve elde edilen sonuçlara göre sistemin kontrol edilmesidir. Araştırmacılar, hassas besleme sistemlerinde hayvanın yem tüketimi, yem tüketim davranışı, canlı ağırlığı, vücut kondisyonu, aktivite düzeyi ve sağlık durumuna ilişkin verilerin doğrudan ve sık aralıklarla ölçülmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Hassas besleme yaklaşımının temel dayanağı, hayvanların besin madde gereksinimlerinin zaman içerisinde değişmesi ve aynı sürü içerisindeki hayvanlar arasında önemli farklılıklar bulunmasıdır. Geleneksel grup besleme sistemlerinde tüm hayvanlara aynı yem verilirken, hassas besleme sistemlerinde her hayvanın gerçek gereksinimine daha yakın besleme yapılması amaçlanmaktadır. Pomar et al. (2019), grup içerisindeki hayvanların besin madde gereksinimlerinin farklı olduğunu ve maksimum performans hedeflendiğinde birçok hayvana gereksinimlerinden daha fazla besin maddesi sağlandığını bildirmiştir. Araştırmacılar, hassas beslemenin fazla besin maddesi kullanımını azaltarak besin kullanım etkinliğini artırabileceğini belirtmiştir. Pomar et al. (2019) ayrıca hassas besleme uygulamalarının protein tüketimini yaklaşık %25, azot atılımını ise yaklaşık %40 oranında azaltabildiğini ve yem maliyetlerinde %10'dan fazla düşüş sağlayabildiğini bildirmiştir. Bu sonuçlar, hassas besleme sistemlerinin yalnızca üretim performansının değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin geliştirilmesine de katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu bölümün amacı, süt sığırı rasyonlarının optimizasyonunda yapay zekâ uygulamalarının kullanımını değerlendirmektir. Bu kapsamda hassas besleme kavramı, hassas hayvancılık sistemleri, veri toplama teknolojileri, makine öğrenmesi algoritmaları ve yapay zekâ tabanlı karar destek sistemlerinin rasyon formülasyonundaki rolleri ele alınmıştır. Ayrıca yapay zekâ uygulamalarının besin madde kullanım etkinliği, yem maliyetlerinin

azaltılması, üretim performansının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir hayvansal üretime sağlayabileceği katkılar güncel literatür ışığında incelenmiştir.

Rasyon Optimizasyonunun Temelleri

Besin Madde Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Rasyon optimizasyonunun temel aşamalarından biri, hayvanların besin madde gereksinimlerinin doğru şekilde belirlenmesidir. Artan dünya nüfusu ve yüksek kaliteli hayvansal ürünlere yönelik talep, özellikle süt ürünleri için daha hassas ve etkin yem formülasyonu uygulamalarına olan ihtiyacı artırmıştır. Yemlerin besin madde bileşimi hayvanların fizyolojik durumunu doğrudan etkilemektedir. Dengeli bir diyet, hayvanların yeterli düzeyde protein, enerji, vitamin ve mineral almasını sağlayarak sağlık ve verimliliğin sürdürülmesine katkıda bulunmaktadır. Araştırmalar, yem kalitesinin süt kalitesini önemli ölçüde etkilediğini ve rasyonun besin madde profilinin süt bileşimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Yüksek kaliteli yem hammaddeleri, süt içerisinde omega-3 yağ asitleri ve konjuge linoleik asit (CLA) gibi yararlı bileşenlerin düzeylerini artırabilirken, düşük kaliteli yemler veya dengesiz rasyonlar sağlık sorunları ve metabolik bozukluklarla ilişkilendirilmektedir (Akintan et al., 2025). Besin madde gereksinimlerinin doğru belirlenmesi, rasyon formülasyonunda kullanılacak yem hammaddelerinin seçiminden besin maddelerinin dengelenmesine kadar tüm planlama sürecini etkilemektedir. Bu nedenle enerji, protein, vitamin ve mineral gereksinimlerinin doğru tahmin edilmesi, rasyon optimizasyonunun başlangıç noktasını oluşturmaktadır.

Hayvancılık sektöründe uzun yıllardır kullanılan geleneksel yem formülasyonu yöntemleri çoğunlukla sabit yem oranlarına ve genelleştirilmiş besin madde profillerine dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar yem hammaddelerindeki kalite değişkenliğini, hayvan gereksinimlerindeki farklılıkları ve çevresel koşulları yeterince dikkate almamaktadır. Bunun sonucunda besin maddelerinin kullanımında verimsizlikler, optimum olmayan hayvan performansı ve artan yem maliyetleri ortaya çıkabilmektedir (Akintan et al., 2025). Günümüzde süt sığırcılığı işletmelerinde hayvanların verim

düzeyleri ve fizyolojik durumları arasındaki farklılıklar dikkate alındığında, gereksinimlerin daha doğru belirlenmesine yönelik yaklaşımların önemi artmaktadır.

Besin madde gereksinimlerinin daha doğru tahmin edilmesi amacıyla çeşitli besleme modelleri geliştirilmiştir. Van Amburgh et al. (2015), son yıllarda elde edilen yeni laboratuvar ve hayvan verilerinin enerji, protein ve amino asit gereksinimlerinin tahmin edilmesini geliştirme potansiyeline sahip olduğunu bildirmiştir. Araştırmacılara göre Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS)'nin amaçlarından biri, araştırma geliştirme çalışmaları ve yem formülasyonu için kullanılabilecek bir araç sağlamaktır. Model, rumen fonksiyonu ve metabolizmasına ilişkin yeni bilgilerin matematiksel eşitlikler ve nicel yaklaşımlar aracılığıyla sisteme entegre edilmesiyle güncellenmiştir. Ayrıca modelde yapılan güncellemelerin enerji ve metabolize olabilir protein arzı ile gereksinimlerinin tahmin edilmesine yönelik olduğu belirtilmiştir (Van Amburgh et al., 2015). Besleme modellerinin geliştirilmesi, yemlerin besin madde içerikleri ile hayvan gereksinimlerinin daha ayrıntılı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece rasyonların hazırlanmasında yalnızca yem bileşimi değil, aynı zamanda hayvanın fizyolojik gereksinimleri de dikkate alınabilmektedir.

Besin madde gereksinimlerinin belirlenmesi aynı zamanda hayvan sağlığı ile de yakından ilişkilidir. Geçiş dönemi, geç gebelikten laktasyon başlangıcına kadar olan süreçte hızla artan metabolik ve besin madde gereksinimleri ile karakterizedir. Doğum sonrasında görülen yüksek hastalık insidansı, negatif enerji dengesinin en şiddetli olduğu dönemle çakışmaktadır. Geçiş döneminde meydana gelen yetersiz adaptasyon; ketozis, asidozis ve abomasum deplasmanı gibi metabolik hastalıkların yanı sıra mastitis ve metritis gibi enfeksiyöz hastalıklarla ilişkilendirilmektedir (Cardoso et al., 2020). Bu bilgiler, rasyon optimizasyonunun yalnızca süt veriminin artırılmasına yönelik bir uygulama olmadığını, aynı zamanda hayvan sağlığının korunması açısından da önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle besin madde gereksinimlerinin doğru belirlenmesi, etkili ve sürdürülebilir bir

besleme programının temel unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir.

Yem Kaynaklarının Değerlendirilmesi

Yemlerin Besin Madde Bileşimi

Yem kaynaklarının besin madde bileşimi, rasyon optimizasyonunun temel unsurlarından biridir. Yemlerin içerdiği protein, enerji, vitamin ve mineraller hayvanların büyümesi, üremesi, sağlığının korunması ve süt üretimi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle rasyonların hazırlanmasında yem hammaddelerinin besin madde içeriklerinin doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Akintan et al., 2025). Hayvansal üretimde kullanılan yem hammaddeleri besin madde içerikleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle yem formülasyonu sürecinde yemlerin kimyasal bileşimlerinin ve besin madde katkılarının dikkate alınması gerekmektedir. Akintan et al. (2024), yem formülasyonunun hayvanların değişen gereksinimlerine uyum sağlayacak şekilde sürekli geliştirilmesi gerektiğini ve bu süreçte yem bileşiminin temel belirleyicilerden biri olduğunu bildirmiştir.

Yemlerin besin madde içeriklerinin doğru değerlendirilmesi, hayvanların gereksinimlerinin karşılanmasının yanı sıra yem kaynaklarının daha etkin kullanılmasına da katkı sağlamaktadır. Bu nedenle rasyon optimizasyonunda kullanılan tüm modellerin temelinde yem hammaddelerinin besin madde bileşimlerinin doğru şekilde tanımlanması yer almaktadır.

Enerji İçeriğinin Değerlendirilmesi

Enerji, süt sığırlarının gereksinim duyduğu en önemli besin unsurlarından biridir. Weiss (1998), yemlerin kullanılabilir enerji içeriklerinin bilinmesinin rasyon formülasyonunun ön koşulu olduğunu belirtmiştir. Araştırmacıya göre enerji içeriğinin doğru tahmin edilememesi, rasyonların yetersiz veya fazla enerji içermesine neden olabilmektedir. Enerji yetersizliği süt veriminde azalma, canlı ağırlık kaybı, üreme performansında bozulma ve hastalıklara karşı direncin azalması ile ilişkilendirilirken; aşırı enerji alımı ise aşırı kondisyon, metabolik problemler ve yem

maliyetlerinde artış gibi olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle rasyonların uygun enerji yoğunluğuna sahip olması gerekmektedir. Enerji değerlendirmesinde kullanılan sistemler zaman içerisinde geliştirilmiştir. Van Amburgh et al. (2015), Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS) modelinin temel amaçlarından birinin enerji ve protein arzı ile gereksinimlerinin daha doğru tahmin edilmesi olduğunu bildirmiştir. Modelde yapılan güncellemeler, yemlerin enerji değerlerinin ve hayvan gereksinimlerinin daha doğru tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Enerji içeriğinin doğru değerlendirilmesi, süt veriminin sürdürülmesi ve rasyonların ekonomik açıdan optimize edilmesi bakımından önemli bir gereklilik olarak kabul edilmektedir.

Lif İçeriği ve Sindirilebilirlik

Lif, süt sığırı rasyonlarının temel bileşenlerinden biridir ve rumen fonksiyonlarının sürdürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Mertens (1997), süt sığırı rasyonlarında lif gereksinimlerinin belirlenmesinde nötr deterjan lifi (NDF) değerinin temel ölçüt olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Araştırmacıya göre NDF, yemlerin toplam kimyasal lif içeriğini ifade eden önemli bir göstergedir. NDF yalnızca yemlerin lif içeriğini tanımlamakla kalmamakta, aynı zamanda yem tüketimi, geviş getirme aktivitesi, sindirilebilirlik ve rumen fonksiyonları ile de ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle lif değerlendirmelerinde NDF değerleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Van Soest (1994), ruminantların lifli yemlerden yararlanabilme yeteneğinin rumendeki mikrobiyal fermentasyon faaliyetleri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir. Ruminantlar, selülozca zengin yemleri sindirebilme özellikleri sayesinde diğer birçok hayvan türünün değerlendiremediği bitkisel kaynakları süt ve et gibi yüksek değerli ürünlere dönüştürebilmektedir. Lif içeriği ile sindirilebilirlik arasındaki ilişki, yemlerin besleme değerinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Bu nedenle rasyon optimizasyonunda yalnızca lif miktarı değil, lifin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile sindirilebilirliği de dikkate alınmaktadır.

Yem Kalite Değişkenliği

Yem hammaddelerinin besin madde içerikleri üretim koşulları, çevresel faktörler, hasat zamanı, depolama koşulları ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durum yem kalitesinde önemli farklılıklara neden olmakta ve rasyon formülasyonunu zorlaştırmaktadır. Akintan et al. (2024), yem formülasyonunun hayvanların değişen gereksinimlerine ve yem kaynaklarının özelliklerine uyum sağlayabilecek şekilde geliştirilmesi gerektiğini bildirmiştir. Modern yem formülasyonunda yalnızca yem analiz sonuçları değil, aynı zamanda besin veri tabanları, çevresel veriler ve hayvan performans göstergeleri de kullanılmaktadır. Akintan et al. (2025), güncel yem formülasyonu yaklaşımlarında farklı veri kaynaklarının birlikte değerlendirilerek daha doğru kararlar alınabildiğini belirtmiştir.

Yem kalite değişkenliğinin dikkate alınması, hayvanların gereksinimlerinin daha doğru karşılanmasına ve rasyonların performans ile maliyet açısından daha etkin şekilde optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle yem kalitesinin düzenli olarak izlenmesi ve güncel analiz verilerinin rasyon formülasyonuna dahil edilmesi önem taşımaktadır.

Geleneksel Optimizasyon Yöntemleri

Rasyon optimizasyonu, hayvanların besin madde gereksinimlerini karşılayacak yem kombinasyonlarının belirlenmesinde kullanılan matematiksel yaklaşımları kapsamaktadır. Tedeschi & Fox (2018), ruminant besleme modellerini farklı üretim koşullarında hayvanların besin madde gereksinimlerini, yem sindirimi ve metabolizmasını tahmin etmek ve rasyonların dengelenmesine yardımcı olmak amacıyla geliştirilen modeller olarak tanımlamıştır. Hayvancılık sektöründe yem formülasyonu, işletmelerin kârlılığı ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yem formülasyonu problemi, besin madde gereksinimleri ve belirli üretim hedefleri çerçevesinde tanımlanan doğrusal ve doğrusal olmayan kısıtların karşılanmasını gerektirmektedir. Bu amaçla doğrusal programlama da dâhil olmak üzere çeşitli matematiksel modeller kullanılmaktadır. Usigbe et al. (2025), geleneksel yem formülasyonu yaklaşımlarının temel olarak

doğrusal programlama modellerine dayandığını ve bu yöntemlerin çoğunlukla maliyet minimizasyonuna odaklandığını bildirmiştir. Bununla birlikte Usigbe et al. (2025), doğrusal programlama temelli geleneksel yaklaşımların besin madde içeriklerindeki değişkenliği ve diğer üretim hedeflerini yeterince dikkate almadığını belirtmiştir. Araştırmacılar ayrıca bu yöntemlerin sınırlı operasyonel kapsama sahip olduğunu ve maliyet minimizasyonunun ötesindeki hedeflere ulaşmak isteyen yetiştiriciler için karar verme sürecinde yetersiz kalabildiğini ifade etmiştir.

Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS), rasyon formülasyonunda yaygın olarak kullanılan modellerden biridir. Van Amburgh et al. (2015), CNCPS'nin temel amacının sığırlar için hem araştırma geliştirme hem de yem formülasyonu çalışmalarında kullanılabilecek bir araç oluşturmak olduğunu belirtmiştir. Araştırmacılar, modelin yeni araştırma verileri ile rumen fonksiyonu ve metabolizmasına ilişkin bilgilerin matematiksel eşitlikler ve nicel yaklaşımlar aracılığıyla sisteme entegre edilmesiyle sürekli geliştirildiğini bildirmiştir. Van Amburgh et al. (2015), CNCPS'de yapılan güncellemelerin besin madde gereksinimleri ve besin madde arzına ilişkin tahminlerin iyileştirilmesine yönelik olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca modelin çeşitli ticari yazılımlar tarafından rasyon değerlendirme ve yem formülasyonu amacıyla kullanıldığı belirtilmiştir. Usigbe et al. (2025), geleneksel yem formülasyonu çalışmalarının büyük bölümünün tek bir amaca veya sınırlı sayıdaki hedefe odaklandığını bildirmiştir. Araştırmacılar, çevresel sürdürülebilirlik, besin madde kalitesi ve diğer üretim hedefleri arasındaki ilişkilerin çoğu zaman yeterince değerlendirilemediğini ve farklı hedefler arasındaki ödünleşimlerin kapsamlı biçimde ortaya konulamadığını belirtmiştir.

Yapay Zekâ ve Hayvancılık

Yapay Zekâ Kavramı

Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), normalde insan zekâsı gerektiren öğrenme, problem çözme, örüntü tanıma, karar verme ve tahmin yapma gibi görevlerin bilgisayar sistemleri tarafından gerçekleştirilebilmesini ifade etmektedir. Son yıllarda

hesaplama kapasitesindeki gelişmeler, veri miktarındaki artış ve gelişmiş algoritmaların kullanımı sayesinde yapay zekâ uygulamaları tarım ve hayvancılık dâhil birçok alanda yaygınlaşmıştır. Tarım sektöründe yapay zekâ uygulamaları; üretim süreçlerinin izlenmesi, tahmin modellerinin geliştirilmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve karar destek sistemlerinin oluşturulması amacıyla kullanılmaktadır. Liakos et al. (2018), yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemlerinin tarımsal üretimde ürün verimi tahmini, hastalık teşhisi, çevresel koşulların değerlendirilmesi ve yönetim kararlarının desteklenmesi gibi çok sayıda alanda uygulandığını bildirmiştir. Araştırmacılar ayrıca sensör teknolojileri, görüntü işleme sistemleri ve veri analitiğindeki gelişmelerin yapay zekâ uygulamalarının yaygınlaşmasını hızlandırdığını belirtmiştir.

Hayvancılık sektöründe ise yapay zekâ uygulamaları; besleme, sağlık, üreme ve sürü yönetimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Büyük miktardaki üretim verilerinin analiz edilmesi sayesinde hayvan performansının izlenmesi, üretim süreçlerinin değerlendirilmesi ve yönetim kararlarının desteklenmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle yapay zekâ, modern hayvancılık sistemlerinde verimliliğin artırılmasına ve veri temelli karar verme süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlayan önemli teknolojilerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Hayvancılık sektöründe yapay zekâ uygulamalarının önemi, işletmelerde üretilen veri miktarındaki hızlı artışla birlikte daha da belirgin hale gelmiştir. Modern hayvancılık işletmelerinde süt ölçüm sistemleri, aktivite sensörleri, canlı ağırlık kayıtları, otomatik yemleme sistemleri ve çevresel sensörler sürekli veri üretmektedir. Bach (2026), bu verilerin bütünleştirilmesi ve analiz edilmesiyle hayvanların farklı yönetim uygulamalarına vereceği yanıtların tahmin edilebildiğini ve daha etkin kararların alınabildiğini bildirmiştir. Yapay zekâ sistemleri, çok sayıda veri kaynağını aynı anda değerlendirerek üretim süreçlerinde meydana gelen değişimleri belirleyebilmekte ve yöneticilere karar desteği sağlayabilmektedir. Yapay zekânın hayvancılıkta kullanım alanları oldukça geniştir. Besleme alanında yapay zekâ sistemleri, yem tüketimi, yem bileşimi, süt verimi ve hayvan performansına ilişkin verileri analiz

ederek rasyonların optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir. Bach (2026), yeterli veri sağlandığında makine öğrenmesi algoritmalarının belirli bir üretim hedefi doğrultusunda yem bileşenlerinin ve besin maddelerinin optimum miktar ve kombinasyonlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Hayvan sağlığının izlenmesi, yapay zekânın en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Sensörlerden elde edilen veriler yardımıyla hayvan davranışlarındaki değişiklikler belirlenebilmekte, hastalık belirtileri erken dönemde tespit edilebilmekte ve sağlık yönetimi süreçleri desteklenebilmektedir. Berckmans (2017), hassas hayvancılık sistemlerinin hayvan sağlığı, refahı ve üretim performansının bireysel düzeyde sürekli olarak izlenmesine olanak sağladığını bildirmiştir. Benzer şekilde Rutten et al. (2013), sensör teknolojilerinin süt sığırcılığı işletmelerinde sağlık yönetiminin desteklenmesinde önemli bir araç olduğunu belirtmiştir. Üreme yönetiminde yapay zekâ uygulamaları kızgınlık tespiti, gebelik tahmini ve sürü performansının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Aktivite sensörleri ve davranış kayıtlarından elde edilen veriler kullanılarak hayvanların üreme durumları hakkında tahminler yapılabilmektedir. Ayrıca sürü içerisindeki bireysel farklılıkların belirlenmesi ve yönetim uygulamalarının hayvan bazında planlanması mümkün olabilmektedir.

Yapay zekâ uygulamaları yalnızca besleme, sağlık ve üreme alanlarında değil, aynı zamanda işletme yönetiminde de kullanılmaktadır. Halachmi & Guarino (2016), hassas hayvancılığın bireysel hayvanlardan elde edilen verilerin kullanıldığı "hayvan bazlı yaklaşım" üzerine kurulduğunu belirtmiştir. Günümüzde yapay zekâ sistemleri; besleme, sağlık, üreme, ekonomi, çevre ve üretim verilerini birlikte değerlendirerek karar destek mekanizmaları oluşturabilmektedir. Bu sayede yöneticiler daha hızlı, daha doğru ve veri temelli kararlar alabilmektedir.

Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), yapay zekânın bir alt dalı olup bilgisayar sistemlerinin verilerden öğrenerek tahminlerde bulunmasını sağlayan yöntemleri kapsamaktadır. Liakos et al. (2018), makine öğrenmesinin veriler içerisindeki

ilişkileri belirleyerek gelecekteki olayların tahmin edilmesine olanak sağladığını bildirmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri genel olarak denetimli (supervised) ve denetimsiz (unsupervised) öğrenme olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Grzesiak et al. (2025), denetimli öğrenmede geçmiş veriler kullanılarak tahmin modelleri geliştirildiğini, denetimsiz öğrenmede ise veriler içerisindeki örüntülerin ve benzerliklerin ortaya çıkarıldığını belirtmiştir. Hayvancılıkta makine öğrenmesi algoritmaları süt verimi, süt bileşenleri ve yem tüketiminin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Grzesiak et al. (2025), yapay sinir ağları, rastgele ormanlar, destek vektör makineleri ve karar ağaçlarının süt sığırcılığı çalışmalarında sık kullanılan algoritmalar olduğunu bildirmiştir. Bu modeller üretim kayıtları, çevresel faktörler ve yönetim verilerini kullanarak süt verimindeki değişimleri tahmin edebilmektedir. Makine öğrenmesi yöntemleri besleme alanında da kullanılmaktadır. Bach (2026), yeterli veri sağlandığında makine öğrenmesi algoritmalarının belirli üretim hedefleri doğrultusunda yem bileşenlerinin ve besin maddelerinin optimum kombinasyonlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Morota et al. (2018) ise büyük veri ve makine öğrenmesi tekniklerinin karmaşık biyolojik sistemlerin analizinde ve tahmin modellerinin geliştirilmesinde önemli fırsatlar sunduğunu bildirmiştir.

Büyük Veri ve Karar Destek Sistemleri

Hayvancılık işletmelerinde sensör teknolojileri ve dijital kayıt sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte büyük miktarda veri üretilmeye başlanmıştır. Berckmans (2017), hassas hayvancılık sistemlerinde hayvan sağlığı, refahı ve üretim performansına ilişkin verilerin sensörler aracılığıyla sürekli olarak toplanabildiğini bildirmiştir. Bu sistemler, hayvanların bireysel düzeyde izlenmesine olanak sağlamaktadır. Halachmi & Guarino (2016), hassas hayvancılığı "hayvan bazlı yaklaşım" olarak tanımlamış ve gelişmiş izleme teknolojileri kullanılarak bireysel hayvanlardan veri elde edilebildiğini belirtmiştir. Bu yaklaşım, hayvanların performans, davranış ve sağlık durumlarına ilişkin bilgilerin sürekli olarak izlenmesine dayanmaktadır. Büyük veri sistemleri, farklı kaynaklardan elde edilen bilgilerin bir araya getirilerek analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Akintan et al. (2024), yem

formülasyonunda farklı veri kaynaklarının ve teknolojilerin birlikte kullanılmasının daha sürdürülebilir ve dayanıklı üretim sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlayabileceğini bildirmiştir. Benzer şekilde Akintan et al. (2025), yem formülasyonu, hayvan performansı ve üretim verilerinin birlikte değerlendirilmesinin veri temelli karar verme süreçlerini desteklediğini belirtmiştir.

Süt Sığırı Rasyonlarının Optimizasyonunda Yapay Zekâ Uygulamaları

Süt sığırcılığı işletmelerinde rasyon optimizasyonu, hayvanların besin madde gereksinimlerinin karşılanmasının yanı sıra süt verimi, yem tüketimi, ekonomik kârlılık ve çevresel sürdürülebilirlik gibi birçok faktörün birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Geleneksel rasyon formülasyonu yöntemleri uzun yıllardır başarıyla kullanılmasına rağmen, süt sığırcılığı sistemlerinde ortaya çıkan biyolojik değişkenlik ve veri yoğunluğu nedeniyle bazı sınırlılıklara sahiptir. Son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerindeki gelişmeler, büyük miktardaki verilerin analiz edilmesine olanak sağlayarak rasyon optimizasyonunda daha hassas ve veri temelli yaklaşımların geliştirilmesini mümkün hale getirmiştir. Yapay zekâ sistemleri, süt verimi, yem tüketimi, besin madde gereksinimleri ve ekonomik göstergeler gibi çok sayıda değişkeni birlikte değerlendirerek karar verme süreçlerini destekleyebilmektedir (Bach, 2026; Akintan et al., 2025).

Yem Tüketiminin Tahmini

Yem tüketimi, süt sığırlarında üretim performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Kuru madde tüketimi; canlı ağırlık, süt verimi, laktasyon dönemi, sağlık durumu, çevresel koşullar ve rasyon bileşimi gibi çok sayıda değişkenden etkilenmektedir. Bu nedenle yem tüketiminin doğru tahmin edilmesi, rasyon optimizasyonunun temel aşamalarından biri olarak kabul edilmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmaları, geçmiş üretim kayıtları ile gerçek zamanlı sensör verilerini birlikte kullanarak yem tüketiminin tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Grzesiak et al. (2025), süt

sığırcılığında yapay sinir ağları, rastgele ormanlar, destek vektör makineleri ve karar ağaçları gibi algoritmaların farklı üretim ve yönetim verilerinin analizinde kullanılabildiğini bildirmiştir. Yapay zekâ sistemleri, bireysel hayvanlara ait verileri değerlendirerek yem tüketimindeki değişimleri belirleyebilmekte ve besleme kararlarının daha hassas şekilde alınmasına katkı sağlayabilmektedir. Yem tüketiminin doğru tahmin edilmesi, gereksiz yem kullanımının azaltılmasına ve besin maddelerinin daha etkin kullanılmasına yardımcı olabilmektedir (Bach, 2026).

Süt Veriminin Tahmini

Süt verimi, genetik yapı, besleme düzeyi, çevresel koşullar, sağlık durumu ve laktasyon dönemi gibi çok sayıda faktörün etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle süt veriminin tahmin edilmesinde çok değişkenli analiz yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Makine öğrenmesi yöntemleri, süt kayıtları, yem tüketimi verileri, çevresel faktörler ve hayvan performans kayıtlarını birlikte değerlendirerek gelecekteki süt veriminin tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir. Grzesiak et al. (2025), makine öğrenmesi modellerinin süt verimi ve süt bileşenlerinin tahmininde başarılı sonuçlar verdiğini bildirmiştir. Bach (2026) ise farklı veri kaynaklarının bir araya getirilmesinin süt sığırcılığı işletmelerinde besleme ve yönetim kararlarının geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini belirtmiştir.

Süt veriminin doğru tahmin edilmesi, işletmelerin üretim planlaması yapmasına ve besleme stratejilerini daha etkin şekilde düzenlemesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca süt verimindeki olası değişimlerin önceden belirlenmesi, sağlık veya besleme kaynaklı problemlerin erken dönemde tespit edilmesine yardımcı olabilmektedir.

Besin Madde Gereksinimlerinin Tahmini

Besin madde gereksinimlerinin doğru belirlenmesi, rasyon optimizasyonunun temelini oluşturmaktadır. Geleneksel besleme sistemlerinde enerji, protein ve diğer besin maddelerine ilişkin gereksinimler belirli modeller yardımıyla tahmin edilmektedir.

Ancak aynı sürü içerisinde bulunan hayvanlar arasında önemli farklılıklar bulunabilmektedir.

Van Amburgh et al. (2015), CNCPS modelinin enerji, protein ve amino asit gereksinimlerinin daha doğru tahmin edilmesine yönelik olarak geliştirildiğini bildirmiştir. Yapay zekâ uygulamaları ise bu modellerden elde edilen bilgileri süt verimi, yem tüketimi, sağlık durumu ve çevresel koşullara ilişkin verilerle birleştirerek daha hassas tahminler yapılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bach (2026), yapay zekâ sistemlerinin farklı veri kaynaklarını bütünleştirerek hayvanların belirli besleme uygulamalarına vereceği yanıtların tahmin edilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir.

Bu yaklaşım, grup ortalamalarına dayalı besleme yerine bireysel hayvan gereksinimlerinin dikkate alındığı hassas besleme uygulamalarının geliştirilmesine olanak sağlayabilmektedir.

Rasyon Maliyetinin Optimize Edilmesi

Yem giderleri süt sığırcılığı işletmelerinde toplam üretim maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle rasyon optimizasyonunda yalnızca besin madde gereksinimlerinin karşılanması değil, aynı zamanda maliyetlerin kontrol altında tutulması da önemlidir.

Geleneksel yem formülasyonu yöntemlerinde doğrusal programlama teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler çoğunlukla maliyet minimizasyonuna odaklanmaktadır. Usigbe et al. (2025), çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının maliyet, besin madde gereksinimleri ve üretim performansı gibi farklı hedefleri aynı anda değerlendirebildiğini bildirmiştir. Akintan et al. (2024; 2025) ise veri temelli karar destek sistemlerinin yem formülasyonunda daha esnek ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini belirtmiştir.

Yapay zekâ sistemleri, farklı yem hammaddelerinin besinsel ve ekonomik özelliklerini birlikte değerlendirerek alternatif rasyon senaryoları oluşturabilmekte ve karar vericilere çeşitli seçenekler sunabilmektedir.

Rumen Fermantasyonunun Modellenmesi

Rumen fermantasyonu, ruminant hayvanların beslenmesinde merkezi bir role sahiptir. Rumen içerisinde gerçekleşen mikrobiyal faaliyetler, yemlerin sindirilebilirliğini ve besin maddelerinin kullanılabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Ancak rumen ortamı; yem bileşimi, mikrobiyal popülasyonlar, sindirim kinetiği ve hayvana ait özellikler arasındaki karmaşık etkileşimlerden etkilendiği için modellenmesi güç bir sistemdir.

Van Amburgh et al. (2015), CNCPS modelinde protein ve karbonhidrat fraksiyonlarının parçalanma özellikleri ile sindirim süreçlerinin tahmin edilmesine yönelik güncellemeler yapıldığını bildirmiştir. Benzer şekilde Tedeschi ve Fox (2018), ruminant besleme sistemlerinde besin madde gereksinimleri, besin madde akışları ve yem kullanımının matematiksel modeller yardımıyla tahmin edilebildiğini belirtmiştir.

Son yıllarda yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemlerinin karmaşık biyolojik sistemlerin analizinde kullanımına yönelik ilgi artmıştır. Morota et al. (2018), büyük veri ve makine öğrenmesi tekniklerinin karmaşık biyolojik sistemlerin analizinde ve tahmin modellerinin geliştirilmesinde önemli fırsatlar sunduğunu bildirmiştir. Bu yaklaşımlar, rumen fermentasyonunu etkileyen çok sayıda değişken arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesinde tamamlayıcı araçlar olarak kullanılabilmektedir. Böylece farklı yem hammaddelerinin veya besleme stratejilerinin rumen fonksiyonları üzerindeki olası etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Metan Emisyonlarının Tahmini

Enterik metan üretimi, rumen fermantasyonunun doğal bir sonucu olup ruminantların tükettiği enerjinin bir bölümünün kaybedilmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda sera gazı emisyonları açısından da önemli bir çevresel etkiye sahiptir. Bu nedenle metan emisyonlarının tahmin edilmesi ve azaltılmasına yönelik çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır.

Metan üretimi; yem tüketimi, rasyon bileşimi, lif düzeyi, sindirilebilirlik ve hayvan performansı gibi çok sayıda faktörden

etkilenmektedir. Negussie et al. (2017), metan emisyonlarının doğrudan ölçümünün maliyetli ve zaman alıcı olması nedeniyle tahmin modellerinin önem kazandığını bildirmiştir. Hristov et al. (2013) ise besleme stratejilerinin enterik metan emisyonlarının azaltılmasında önemli rol oynayabileceğini belirtmiştir. Ayrıca Moraes et al. (2014), yem tüketimi ve rasyon özelliklerinden yararlanılarak enterik metan emisyonlarının tahmin edilebildiğini bildirmiştir.

Son yıllarda büyük veri ve makine öğrenmesi yaklaşımlarının metan emisyonlarının tahmin edilmesinde kullanılmasına yönelik çalışmalar artış göstermektedir. Yem tüketimi, rasyon özellikleri ve üretim verilerinden yararlanılarak geliştirilen modellerin metan üretiminin öngörülmesine katkı sağlayabileceği bildirilmektedir. Bu nedenle veri temelli tahmin sistemleri, çevresel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesinde ve metan azaltım stratejilerinin geliştirilmesinde yararlı araçlar olarak değerlendirilmektedir.

Yapay Zekâ Destekli Rasyon Optimizasyonunun Avantajları

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerinin süt sığırcılığı işletmelerinde kullanılmaya başlanması, rasyon optimizasyonuna yeni bir boyut kazandırmıştır. Geleneksel besleme sistemlerinde kararlar çoğunlukla belirli standartlara ve geçmiş deneyimlere dayanırken, yapay zekâ sistemleri çok sayıda veriyi aynı anda analiz ederek daha hassas ve dinamik kararların alınmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle yem bileşimi, yem tüketimi, süt verimi, hayvan sağlığı ve çevresel koşullara ilişkin verilerin birlikte değerlendirilmesi, rasyonların hayvan gereksinimlerine daha uygun şekilde düzenlenmesini mümkün hale getirmektedir (Akintan et al., 2025; Bach, 2026).

Yemden Yararlanmanın Artırılması

Yemden yararlanma etkinliği, süt sığırcılığı işletmelerinde üretim performansını belirleyen temel göstergelerden biridir. Yapay zekâ destekli sistemler, hayvanların yem tüketimi, süt verimi ve performans kayıtlarını analiz ederek besleme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bach (2026), yapay zekâ

uygulamalarının farklı besleme uygulamalarına verilen yanıtların tahmin edilmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Akintan et al. (2025), veri temelli yem formülasyonu yaklaşımlarının besleme kararlarının geliştirilmesine katkı sağlayabileceğini bildirmiştir. Bu sayede besin maddelerinin daha etkin kullanılması ve yemden yararlanma düzeyinin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.

Yem Maliyetlerinin Azaltılması

Yem giderleri, süt sığırcılığı işletmelerinde toplam üretim maliyetlerinin en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle yem maliyetlerinin azaltılması işletme kârlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Yapay zekâ destekli optimizasyon sistemleri, farklı yem hammaddelerinin besinsel ve ekonomik özelliklerini birlikte değerlendirerek alternatif rasyonların oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Usigbe et al. (2025), çok amaçlı optimizasyon modellerinin maliyet ile üretim hedefleri arasındaki dengenin kurulmasına katkı sağlayabildiğini bildirmiştir. Akintan et al. (2024) ise teknolojik araçların yem formülasyonunda daha dayanıklı ve sürdürülebilir sistemlerin oluşturulmasına destek sağlayabileceğini belirtmiştir.

Verimliliğin Artırılması

Yapay zekâ sistemleri, süt verimi, yem tüketimi, sağlık durumu ve çevresel koşullar gibi çok sayıda değişkeni aynı anda değerlendirebilmektedir. Bu durum, üretim performansını etkileyen faktörlerin daha iyi anlaşılmasına ve yönetim kararlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Grzesiak et al. (2025), makine öğrenmesi yöntemlerinin süt verimi ve süt bileşenlerinin tahmininde kullanılabildiğini bildirmiştir. Bach (2026) ise farklı veri kaynaklarının bütünleştirilmesinin besleme ve yönetim kararlarının iyileştirilmesine katkı sağlayabileceğini belirtmiştir. Böylece üretim süreçlerinin daha etkin yönetilmesi mümkün olabilmektedir.

Çevresel Sürdürülebilirlik

Hayvansal üretimde çevresel etkilerin azaltılması, sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir hedef olarak kabul edilmektedir. Rasyonların hayvan gereksinimlerine

daha uygun şekilde düzenlenmesi, besin maddelerinin daha etkin kullanılmasına ve besin madde kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Pomar et al. (2019), hassas besleme uygulamalarının protein tüketimini yaklaşık %25, azot atılımını ise yaklaşık %40 oranında azaltabildiğini bildirmiştir. Ayrıca Hristov et al. (2013), uygun besleme stratejilerinin enterik metan emisyonlarının azaltılmasında önemli rol oynayabileceğini belirtmiştir. Yapay zekâ sistemleri, üretim ve çevresel göstergeleri birlikte değerlendirerek sürdürülebilir besleme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Yapay zekâ destekli rasyon optimizasyonu; yemden yararlanmanın artırılması, yem maliyetlerinin azaltılması, üretim verimliliğinin geliştirilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu nedenle yapay zekâ destekli rasyon optimizasyonu, süt sığırcılığı işletmelerinde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin geliştirilmesine katkı sağlayabilecek önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç

Süt sığırcılığı işletmelerinde rasyon optimizasyonu, hayvanların besin madde gereksinimlerinin karşılanması, üretim performansının artırılması ve işletme kârlılığının sürdürülebilmesi açısından temel bir öneme sahiptir. Geleneksel yem formülasyonu yöntemleri önemli katkılar sağlamış olmakla birlikte, yem kaynaklarındaki değişkenlik, hayvanlar arasındaki bireysel farklılıklar ve üretim sistemlerinin karmaşıklığı daha hassas yaklaşımlara olan gereksinimi artırmıştır. Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve büyük veri teknolojileri, süt sığırı beslemesinde veri temelli karar verme süreçlerini destekleyerek rasyon optimizasyonuna yeni olanaklar sunmaktadır. Bu teknolojiler; yem tüketimi, süt verimi, besin madde gereksinimleri ve yem maliyetlerinin daha doğru değerlendirilmesine katkı sağlarken, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesini de desteklemektedir.

Sonuç olarak yapay zekâ destekli rasyon optimizasyonu, süt sığırcılığı işletmelerinde besleme etkinliğinin artırılması, ekonomik

verimliliğin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Gelecekte veri toplama teknolojileri ve yapay zekâ uygulamalarındaki gelişmelerin, hassas besleme sistemlerinin yaygınlaşmasına ve rasyon optimizasyonunun daha etkin şekilde uygulanmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Kaynakça

Akintan, O. A., Gebremedhin, K. G., & Uyeh, D. D. (2024). Animal feed formulation—Connecting technologies to build a resilient and sustainable system. *Animals, 14*(10), 1497. https://doi.org/10.3390/ani14101497

Akintan, O. A., Gebremedhin, K. G., & Uyeh, D. D. (2025). Linking animal feed formulation to milk quantity, quality, and animal health through data-driven decision-making. *Animals, 15*(2), 162. https://doi.org/10.3390/ani15020162

Bach, A. (2026). Using artificial intelligence to make feeding and management decisions in dairy herds. *Animal Frontiers, 16*(2), 78–85. https://doi.org/10.1093/af/vfaf059

Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers, 7*(1), 6–11. https://doi.org/10.2527/af.2017.0102

Cardoso, F. C., LeBlanc, S. J., Murphy, M. R., & Drackley, J. K. (2020). Prepartum nutritional strategies to improve dairy cow health. *Journal of Dairy Science, 103*(5), 4208–4221. https://doi.org/10.3168/jds.2019-17271

Grzesiak, W., Zaborski, D., Pluciński, M., Jędrzejczak-Silicka, M., Pilarczyk, R., & Sablik, P. (2025). The use of selected machine learning methods in dairy cattle farming: A review. *Animals, 15*(14), 2033. https://doi.org/10.3390/ani15142033

Halachmi, I., & Guarino, M. (2016). Editorial: Precision livestock farming: A 'per animal' approach using advanced monitoring technologies. *Animal, 10*(9), 1482–1483. https://doi.org/10.1017/S1751731116001142

Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H. P. S., Adesogan, A. T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P. J., Henderson, B., & Tricarico, J. M. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science, 91*(11), 5045–5069. https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). A review of machine learning in agriculture: Applications, challenges, and perspectives. *Sensors, 18*(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674

Mertens, D. R. (1997). Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. *Journal of Dairy Science, 80*(7), 1463–1481. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2

Moraes, L. E., Strathe, A. B., Fadel, J. G., Casper, D. P., & Kebreab, E. (2014). Prediction of enteric methane emissions from cattle. Global *Change Biology, 20*(7), 2140–2148. https://doi.org/10.1111/gcb.12471

Morota, G., Ventura, R. V., Silva, F. F., Koyama, M., & Fernando, S. C. (2018). Big data analytics and precision animal agriculture symposium: Machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture. *Journal of Animal Science, 96*(4), 1540–1550. https://doi.org/10.1093/jas/sky014

Negussie, E., de Haas, Y., Dehareng, F., Dewhurst, R. J., Dijkstra, J., Gengler, N., Morgavi, D. P., Soyeurt, H., van Gastelen, S., Yan, T., & Biscarini, F. (2017). Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management

and breeding decisions. *Journal of Dairy Science, 100*(4), 2433–2453. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12030

Pomar, C., van Milgen, J., & Remus, A. (2019). *Precision livestock feeding, principle and practice.* In W. H. Hendriks, M. W. A. Verstegen, & L. Babinszky (Eds.), Poultry and pig nutrition: Challenges of the 21st century (pp. 397–418). Wageningen Academic Publishers. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1_18

Rutten, C. J., Velthuis, A. G. J., Steeneveld, W., & Hogeveen, H. (2013). Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. *Journal of Dairy Science, 96*(4), 1928–1952. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6107

Tedeschi, L. O., & Fox, D. G. (2018). *The ruminant nutrition system: An applied model for predicting nutrient requirements and feed utilization in ruminants* (2nd ed.). XanEdu Publishing.

Usigbe, M. J., Uyeh, D. D., Park, T., Ha, Y., & Mallipeddi, R. (2025). Many objective optimization and decision support for dairy cattle feed formulation. *Scientific Reports, 15*, 13451. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96633

Weiss, W. P. (1998). Estimating the available energy content of feeds for dairy cattle. *Journal of Dairy Science, 81*(3), 830–839. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75641-3

Van Amburgh, M. E., Collao-Saenz, E. A., Higgs, R. J., Ross, D. A., Recktenwald, E. B., Raffrenato, E., Chase, L. E., Overton, T. R., Mills, J. K., & Foskolos, A. (2015). The Cornell Net Carbohydrate and Protein System: Updates to the model and evaluation of version 6.5. *Journal of Dairy Science, 98*(9), 6361–6380. https://doi.org/10.3168/jds.2015-9378

Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press.

BÖLÜM 6

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN RUMİNANT BESLEME ÜZERİNE ETKİLERİ

ESRA KAYA[1] HÜSEYİN DENK[2]

Giriş

Küresel İklim Değişikliğinin Genel Tanımı

Küresel iklim değişikliği, uzun dönemli sıcaklık, yağış, nem ve atmosferik koşullardaki değişimleri ifade eden küresel bir çevre sorunudur. Özellikle sanayi devriminden sonra fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma, tarımsal faaliyetler ve diğer antropojenik uygulamalar sonucunda atmosferde sera gazı konsantrasyonlarının artması, iklim sisteminde önemli değişimlere neden olmuştur. Bu değişimler; sıcaklık artışı, düzensiz yağış rejimleri, buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesi gibi sonuçlarla kendini göstermektedir (Abbass et al., 2022).

İklim değişikliği, yalnızca çevresel bir sorun olmayıp aynı zamanda tarım, hayvancılık, biyolojik çeşitlilik, insan sağlığı ve

[1]Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Celal Oruç Hayvansal Üretim Yüksekokulu, ORCID:0000-0002-4697-7365
[2]Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/Celal Oruç Hayvansal Üretim Yüksekokulu, ORCID:0000-0003-2591-0361

ekonomi üzerinde etkili olan küresel bir tehdit olarak değerlendirilmektedir. Özellikle sıcaklık artışları ve ekstrem iklim olaylarının sıklığındaki artış, doğal ekosistemlerin yapısını değiştirmekte ve canlı türlerinin yaşam alanlarını olumsuz yönde etkilemektedir (Abbass et al., 2022).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarına göre insan faaliyetleri, küresel sıcaklık artışının temel nedeni olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda sera gazı emisyonlarının tarihi seviyelere ulaşması, yeryüzü enerji dengesizliğini artırmış ve küresel ısınma hızını daha önce görülmemiş seviyelere taşımıştır. 2015–2024 döneminde gözlenen küresel sıcaklık artışının yaklaşık 1,24 °C olduğu ve bunun büyük ölçüde insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklandığı bildirilmektedir (Forster et al., 2025). Bununla birlikte iklim değişikliği; kuraklık, sel, sıcak hava dalgaları ve tropikal fırtınalar gibi ekstrem hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırmaktadır. Bu olaylar, ekosistemler üzerinde ciddi baskılar oluşturarak bitki örtüsü, su kaynakları ve tarımsal üretim sistemlerinde önemli kayıplara neden olmaktadır (Kropf et al., 2025).

Ayrıca iklim değişikliğine bağlı ekstrem hava olaylarının ekonomik kayıpları da giderek artmaktadır. Son yirmi yılda meydana gelen aşırı hava olaylarının yıllık yaklaşık 143 milyar dolarlık ekonomik zararının iklim değişikliği ile ilişkili olduğu bildirilmektedir (Newman & Noy, 2023).

İklim Değişikliğinin Hayvancılık Sektörü Üzerine Etkileri

İklim değişikliği, hayvancılık sektörünü doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyen önemli küresel sorunlardan biridir. Artan sıcaklıklar, düzensiz yağış rejimleri, kuraklık, ekstrem hava olayları ve su kaynaklarındaki azalma; hayvansal üretim sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Özellikle sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan ısı stresi, ruminantlarda yem tüketiminin azalmasına, süt ve et veriminde düşüşe, üreme performansının bozulmasına ve

bağışıklık sisteminin baskılanmasına neden olmaktadır (Thornton et al., 2022).

Hayvancılık sektörü, küresel gıda güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Dünya genelinde hayvansal ürünler, toplam protein tüketiminin yaklaşık %33'ünü ve kalori tüketiminin %17'sini karşılamaktadır. Bununla birlikte iklim değişikliği; yem üretimi, mera verimliliği, su kaynakları ve hayvan sağlığı üzerinde oluşturduğu baskılar nedeniyle hayvansal üretim sistemlerini ciddi biçimde etkilemektedir (Cheng et al., 2022). İklim değişikliğinin en önemli etkilerinden biri ısı stresidir. Yüksek çevre sıcaklığı hayvanların kuru madde tüketimini azaltmakta ve buna bağlı olarak süt, et ve yumurta üretiminde düşüşler meydana gelmektedir. Ayrıca sıcaklık artışı; fertilite problemleri, bağışıklık fonksiyonlarında zayıflama ve mortalite oranlarında artış gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır (Cheng et al., 2022). Kuraklık ve su kıtlığı da hayvancılık sektörünü olumsuz etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde mera alanlarının azalması, yem kaynaklarının yetersizliği ve su teminindeki sorunlar hayvansal üretimde ciddi kayıplara neden olmaktadır. Etiyopya'da yapılan çalışmalarda, şiddetli kuraklık dönemlerinde büyükbaş hayvan varlığının önemli ölçüde azaldığı ve hayvancılıkla geçimini sağlayan toplulukların ekonomik açıdan ciddi zarar gördüğü bildirilmektedir (Bogale ve Erena, 2022). Bunun yanında artan hayvansal ürün talebi nedeniyle üretim sistemlerinin yoğunlaşması, çevresel baskıları daha da artırmaktadır. Hayvancılık sektörü; enterik fermantasyon, gübre yönetimi, yem üretimi ve arazi kullanım değişiklikleri yoluyla sera gazı emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Küresel ölçekte hayvancılık sektörünün toplam antropojenik sera gazı emisyonlarının yaklaşık %14,5'inden sorumlu olduğu bildirilmektedir (Hur et al., 2024; Papakonstantinou et al., 2024). Bu nedenle iklim değişikliğinin hayvancılık sektörü üzerindeki etkilerinin azaltılması amacıyla; ısıya dayanıklı hayvan

ırklarının kullanılması, hassas hayvancılık teknolojilerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir mera yönetimi uygulamaları, alternatif yem kaynaklarının kullanımı ve sera gazı emisyonlarını azaltıcı besleme stratejilerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır (Thornton et al., 2022; Papakonstantinou et al., 2024).

Ruminantların İklim Stresine Duyarlılığı

Ruminantlar, çevresel koşullardaki değişimlerden doğrudan etkilenen hayvanlardır. Özellikle küresel iklim değişikliği ile birlikte sıcaklıkların artması, yağış rejimlerinin düzensizleşmesi, kuraklık ve sıcak hava dalgalarının daha sık görülmesi, ruminant yetiştiriciliğinde önemli sorunlara neden olmaktadır. İklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan bu çevresel faktörler, hayvanların fizyolojik dengelerini bozmakta ve "iklim stresi" olarak ifade edilen olumsuz durumun oluşmasına yol açmaktadır. Ruminantlarda iklim stresinin en önemli formu ise ısı stresidir (Shirley et al., 2024). Isı stresi, hayvanın vücudunda oluşan toplam ısının çevreye yeterince uzaklaştırılamaması sonucu ortaya çıkan fizyolojik bir durumdur. Normal şartlarda ruminantlar, metabolik faaliyetler sırasında oluşan vücut ısısını solunum, terleme ve deri yüzeyinden ısı kaybı yoluyla dengeleyebilmektedir. Ancak çevre sıcaklığının ve nemin aşırı yükseldiği durumlarda bu mekanizmalar yetersiz kalmakta ve hayvanın vücut sıcaklığı artmaktadır. Bu durumda hayvan, vücut sıcaklığını düşürebilmek için çeşitli fizyolojik ve davranışsal tepkiler göstermektedir. Solunum hızının artması, daha fazla su tüketimi, gölge alanlara yönelme, yem tüketiminin azalması ve hareketlerin yavaşlaması bu tepkilerin başlıcalarıdır (Habeeb et al., 2023).

Ruminantlarda iklim stresine karşı duyarlılık; tür, ırk, yaş, cinsiyet ve verim düzeyine göre değişiklik göstermektedir. Özellikle yüksek verimli süt sığırları ısı stresine karşı daha hassastır. Bunun temel nedeni, yüksek süt verimine sahip hayvanlarda metabolik

faaliyetlerin daha yoğun olması ve buna bağlı olarak daha fazla metabolik ısı üretilmesidir. Yüksek sıcaklık koşullarında hayvanın bu fazla ısıyı dışarı atması zorlaşmakta ve vücut sıcaklığı yükselmektedir. Isı stresine maruz kalan süt sığırlarında kuru madde tüketimi azalmakta, buna bağlı olarak süt veriminde düşüş meydana gelmektedir. Ayrıca süt yağ oranı ve süt protein oranı gibi kalite kriterleri de olumsuz etkilenmektedir. Bunun yanında fertilite problemleri, embriyonik ölümler ve mastitis gibi sağlık sorunlarında artış görülmektedir (Mićić et al., 2025). Isı stresinin hayvanlar üzerindeki etkileri yalnızca üretim kayıplarıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda hayvanların fizyolojik sistemlerinde de önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Isı stresi altında kortizol gibi stres hormonlarının düzeyi yükselmekte, bağışıklık sistemi baskılanmakta ve oksidatif stres oluşmaktadır. Özellikle hipertermi durumunda reaktif oksijen türlerinin (ROS) artışı hücrelerde hasara neden olmakta, bu durum dokuların normal işlevlerini bozabilmektedir. Bağışıklık sisteminin zayıflaması sonucu hayvanların hastalıklara karşı direnci azalmakta ve enfeksiyonlara yatkınlık artmaktadır (Ahmadi et al., 2025).

İklim değişikliği yalnızca hayvanı doğrudan etkilemez; aynı zamanda yem kaynakları üzerinde de önemli değişiklikler oluşturur. Artan sıcaklık ve kuraklık koşulları yem bitkilerinin verim ve kalite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle kaba yemlerde ham protein oranı azalırken lif oranı artmakta ve sindirilebilirlik düşmektedir. Bu durum rumen fermentasyonunu olumsuz etkileyerek yemden yararlanma oranının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca mera alanlarında bitki örtüsünün değişmesi, kaliteli yem kaynaklarının azalmasına ve mera verimliliğinin düşmesine yol açmaktadır (Hart et al., 2022).

Ruminantların iklim stresine karşı gösterdiği tepkiler yalnızca fizyolojik düzeyde değil, hücresel düzeyde de ortaya çıkmaktadır. Yüksek çevre sıcaklıkları sonucu bazı organlarda

yapısal bozukluklar oluşabilmektedir. Özellikle karaciğer, böbrek, akciğer ve gastrointestinal sistem gibi hayati organlarda dejenerasyon ve inflamasyon görülebilmektedir. Bu süreçte "ısı şok proteinleri" olarak adlandırılan bazı proteinlerin üretimi artmaktadır. Özellikle HSP70 proteini, hücrelerin stres koşullarına karşı korunmasında önemli görev üstlenmektedir ve ısı stresinin önemli biyolojik göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Rebez et al., 2023). Tüm ruminant türleri iklim stresinden aynı düzeyde etkilenmemektedir. Küçük ruminantlar, özellikle koyun ve keçiler, büyükbaş hayvanlara göre sıcak ve kurak koşullara daha dayanıklı kabul edilmektedir. Bunun nedeni; daha düşük metabolik ısı üretmeleri, suyu daha etkin kullanabilmeleri ve düşük kaliteli yemlerden daha iyi yararlanabilmeleridir. Ayrıca yerli ırklar, uzun yıllar boyunca bulundukları bölgenin iklim koşullarına adapte oldukları için çevresel stres faktörlerine karşı daha dirençli olabilmektedir (Maldonado-Jáquez et al., 2025).

Günümüzde iklim stresinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli adaptasyon stratejileri uygulanmaktadır. Gölgelik alanların oluşturulması, havalandırma sistemlerinin kullanılması, su tüketiminin artırılması, uygun rasyon düzenlemeleri ve antioksidan yem katkılarının kullanılması bu uygulamaların başında gelmektedir. Ayrıca son yıllarda yapay zekâ destekli sensör teknolojileri sayesinde hayvanların vücut sıcaklığı, solunum hızı ve davranışları gerçek zamanlı olarak takip edilebilmekte ve ısı stresi erken dönemde tespit edilebilmektedir (Rebez et al., 2024).

Yem Üretimi ve Yem Arz Güvenliği İlişkisi

İklim değişikliği, yem üretim sistemleri üzerinde önemli etkiler oluşturarak hayvancılık sektöründe yem arz güvenliğini tehdit eden temel faktörlerden biri haline gelmiştir. Artan sıcaklıklar, yağış rejimindeki düzensizlikler, kuraklık ve aşırı iklim olayları özellikle çayır, mera ve yem bitkileri üretiminde verim kayıplarına

neden olmaktadır. Bu durum, ruminantların ihtiyaç duyduğu kaliteli kaba yem kaynaklarının sürdürülebilir şekilde temin edilmesini zorlaştırmaktadır (Thornton et al., 2015). Ruminant yetiştiriciliğinde sürdürülebilir üretimin temel koşullarından biri yeterli ve kaliteli yem teminidir. Ancak iklim değişikliği nedeniyle yem bitkilerinin büyüme süresi, biyokütle üretimi ve besin madde içerikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ve su yetersizliği koşullarında bitkilerde ham protein oranı azalırken lif oranı artabilmekte, bu da yemlerin sindirilebilirlik düzeyinin düşmesine yol açmaktadır. Sonuç olarak hayvanların performansı, süt verimi ve canlı ağırlık artışı olumsuz etkilenmektedir (Godde et al., 2021).

Mera ekosistemleri iklim değişikliğine karşı oldukça hassas yapılardır. Yağış miktarındaki azalma ve uzun süren kuraklık dönemleri mera bitki örtüsünü zayıflatmakta, ot verimini düşürmekte ve otlatma kapasitesini sınırlandırmaktadır. Ayrıca erken ve aşırı otlatma uygulamalarıyla birlikte mera alanlarında bozulma riski daha da artmaktadır. Bu durum kaba yem açığını büyütmekte ve işletmelerin dışarıdan yem teminine bağımlılığını artırmaktadır (FAO, 2017). Yem arz güvenliği yalnızca yem miktarının yeterli olması anlamına gelmemekte; aynı zamanda kaliteli, ekonomik ve sürekli erişilebilir yem kaynaklarının bulunmasını da kapsamaktadır. İklim değişikliğine bağlı olarak yem hammaddesi üretiminde meydana gelen dalgalanmalar, yem fiyatlarında artışlara ve piyasa istikrarsızlıklarına neden olabilmektedir. Özellikle mısır, arpa ve soya gibi yem hammaddelerinde görülen üretim azalışları, hayvancılık işletmelerinin yem maliyetlerini yükseltmektedir. Bu durum üretim maliyetlerini artırırken sektörün ekonomik sürdürülebilirliğini de zorlaştırmaktadır (Place & Mitloehner, 2024). İklim değişikliğinin yem arzı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltabilmek amacıyla alternatif yem kaynaklarının değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Tarımsal yan ürünlerin yem olarak kullanılması, kuraklığa dayanıklı yem bitkilerinin

geliştirilmesi, silaj teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve mera ıslah çalışmalarının artırılması bu konuda önerilen temel uygulamalar arasında yer almaktadır. Ayrıca yem üretiminde yerel kaynakların etkin kullanılması ve sürdürülebilir yem üretim sistemlerinin geliştirilmesi gelecekte yem arz güvenliğinin korunmasına katkı sağlayacaktır (Pexas et al., 2023). Gelecekte iklim değişikliğinin etkilerinin daha da belirgin hale geleceği öngörülmektedir. Bu nedenle ruminant yetiştiriciliğinde iklime dayanıklı üretim modellerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle yem bitkisi çeşitliliğinin artırılması, mera yönetim uygulamalarının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir yem üretim stratejilerinin uygulanması, yem arz güvenliğinin sağlanmasında etkili olacaktır. Bunun yanında çevre dostu üretim sistemleri ve iklim akıllı hayvancılık uygulamaları da uzun vadede hayvancılık sektörünün sürdürülebilirliğine katkıda bulunacaktır (Kazemi et al., 2025).

Isı Stresinin Ruminant Besleme Fizyolojisine Etkileri

Yem Tüketimi

Kuru Madde Tüketiminde Azalma

Isı stresi, ruminantlarda besleme fizyolojisini etkileyen en önemli çevresel stres faktörlerinden biri olup özellikle kuru madde tüketimi üzerinde belirgin olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Yüksek çevre sıcaklığı ve nem koşullarında hayvanların homeostatik dengeyi koruyabilmek amacıyla metabolik ısı üretimini azaltmaya yönelik çeşitli fizyolojik ve davranışsal mekanizmaları devreye soktuğu bildirilmektedir. Bu mekanizmaların başında ise kuru madde tüketiminin azaltılması gelmektedir. Çünkü yemlerin özellikle rumende fermentasyona uğraması sırasında önemli miktarda metabolik ısı açığa çıkmakta ve bu durum hayvanın toplam ısı yükünü artırmaktadır. Bu nedenle ruminantlar, sıcaklık stresine karşı adaptif bir yanıt olarak yem tüketimini gönüllü şekilde azaltmaktadır (Saeed et al., 2023; Thornton et al., 2022).

Yem tüketimindeki azalma, ruminantlarda enerji ve besin madde alımını sınırlandırarak süt verimi, canlı ağırlık artışı, yemden yararlanma oranı ve genel üretim performansında düşüşlere neden olmaktadır. Özellikle yüksek verimli süt sığırlarında metabolik faaliyetlerin yoğun olması nedeniyle daha fazla metabolik ısı oluşmakta ve bu hayvanlar ısı stresine karşı daha duyarlı hale gelmektedir. Isı stresi altında kuru madde tüketimindeki azalmanın süt verimindeki düşüşün temel nedenlerinden biri olduğu bildirilmektedir. Hauser et al. (2023), sıcaklık ve güneş radyasyonuna maruz kalan Holstein ineklerinde kuru madde tüketiminin önemli düzeyde azaldığını ve buna paralel olarak süt verimi ile süt kalitesinin olumsuz etkilendiğini belirtirken; Cabrita et al. (2025) yüksek sıcaklık koşullarında süt sığırlarında kuru madde tüketimi ile süt üretim etkinliğinin belirgin şekilde düştüğünü bildirmiştir. Isı stresinin yem tüketimi üzerindeki etkileri yalnızca enerji alımının azalmasıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda rumen fonksiyonları ve sindirim fizyolojisi de önemli ölçüde etkilenmektedir. Kuru madde tüketiminin azalması ruminal tamponlama kapasitesini düşürmekte, geviş getirme süresini azaltmakta ve rumen fermentasyonunda değişikliklere yol açmaktadır. Özellikle lifli yem tüketiminin azalması nedeniyle tükürük salgısı düşmekte ve rumen pH'sında dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda ruminal mikrobiyal aktivite olumsuz etkilenmekte, sindirilebilirlik azalmakta ve uçucu yağ asitleri üretiminde değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Hart et al. (2022), gelecekteki iklim senaryolarında yetiştirilen yem bitkilerindeki kalite değişimlerinin rumen fermentasyonunu ve ruminant verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini bildirirken, Neves et al. (2025) ısı stresinin sindirim sistemi fonksiyonlarını bozarak besin madde sindirilebilirliğini düşürdüğünü belirtmiştir.

Isı stresine maruz kalan hayvanlarda yem tüketiminin azalmasına paralel olarak çeşitli davranışsal değişiklikler de

görülmektedir. Hayvanlar yem tüketimini genellikle günün daha serin saatlerine kaydırmakta, gündüz saatlerinde ise fiziksel aktivitelerini azaltarak gölgelik alanlarda dinlenmeyi tercih etmektedir. Bunun yanında solunum hızı, panting davranışı ve su tüketimi artmaktadır. Artan su tüketimi, terleme ve solunum yoluyla kaybedilen sıvının yerine konulmasına yardımcı olurken aynı zamanda termoregülasyonda önemli rol oynamaktadır. Neves et al. (2025), ısı stresine maruz kalan buzağılarda su tüketiminin yaklaşık %60 oranında arttığını bildirirken, Slayi & Jaja (2025) sıcaklık-nem indeksinin yükseldiği koşullarda yem tüketiminin azaldığını, buna karşılık solunum hızı ve deri sıcaklığının arttığını belirtmiştir. Ruminantların ısı stresine karşı gösterdiği tepkiler hayvanın türü, ırkı, yaşı ve çevresel adaptasyon kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle Bos taurus genotiplerinin sıcak iklim koşullarına Bos indicus genotiplerine göre daha duyarlı olduğu bildirilmektedir. Bunun temel nedeni Bos indicus genotiplerinin daha düşük metabolik ısı üretimine sahip olması ve termoregülasyon yeteneklerinin daha gelişmiş olmasıdır. Ayrıca küçük ruminantların, özellikle keçilerin, su kullanım etkinliği ve düşük kaliteli yemlerden yararlanabilme yetenekleri sayesinde sıcak ve kurak koşullara daha dayanıklı oldukları belirtilmektedir (Saeed et al., 2023).

Son yıllarda ısı stresinin kuru madde tüketimi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla çeşitli besleme ve çevresel yönetim stratejileri geliştirilmektedir. Gölgelik sistemlerin kullanılması, fan ve sprinkler uygulamaları, yemlemenin serin saatlerde yapılması, rasyon enerji yoğunluğunun artırılması ve maya kültürü gibi yem katkılarının kullanılması bu stratejiler arasında yer almaktadır. Özellikle canlı maya katkılarının rumen mikrobiyal aktivitesini destekleyerek yem tüketimini ve süt verimini artırabileceği bildirilmektedir (Cabrita et al., 2025). Bunun yanında gölgelik alanların hayvan konforunu artırdığı, solunum hızını ve vücut sıcaklığını düşürdüğü, buna bağlı olarak yem tüketimi ve canlı

ağırlık artışını iyileştirdiği belirtilmektedir (DeBord, 2023; Slayi & Jaja, 2025).

Rumen Fermentasyonu (Ph Değişimleri, Mikrobiyal Aktivite, Uçucu Yağ Asitleri)

İklim değişikliği, ruminantlarda rumen fermentasyon süreçlerini doğrudan ve dolaylı yollarla etkileyerek hayvanların besin madde kullanım etkinliği, enerji metabolizması ve üretim performansı üzerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Özellikle küresel sıcaklık artışı, kuraklık, mera kompozisyonundaki değişimler ve yem kalitesindeki bozulmalar rumen ekosisteminin yapısını etkileyerek ruminal pH, mikrobiyal aktivite ve uçucu yağ asitleri üretiminde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Rumen fermentasyonu, ruminantların fibroz yemleri değerlendirebilmesini sağlayan temel sindirim mekanizması olup, bu süreç büyük ölçüde rumen mikroorganizmalarının faaliyetlerine bağlıdır. Ancak iklim değişikliğine bağlı çevresel stres faktörleri, rumen mikrobiyotasının yapısını ve fermentasyon dengesini bozarak sindirim etkinliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Hart et al., 2022; Bokharaeian et al., 2024).

Yüksek çevre sıcaklığı ve ısı stresi koşullarında ruminantlarda kuru madde tüketiminin azalması, rumen fermentasyonunun normal seyrini önemli ölçüde değiştirmektedir. Özellikle yem tüketimindeki azalma ruminal tamponlama kapasitesini düşürmekte ve rumen pH'sında değişikliklere neden olmaktadır. Normal koşullarda geviş getirme sırasında salgılanan tükürük, içerdiği bikarbonat sayesinde rumen pH'sının dengelenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ancak ısı stresi altında yem tüketimi ve geviş getirme süresi azaldığından tükürük üretimi de düşmekte ve rumen ortamı daha asidik hale gelebilmektedir. Bokharaeian et al. (2024), ısı stresine maruz kalan kuzularda ruminal pH düzeylerinde azalma meydana geldiğini ve bunun rumen

fermentasyonunu olumsuz etkilediğini bildirmiştir. Benzer şekilde Alabi et al. (2023), ruminal pH'daki değişimlerin uçucu yağ asitleri üretimini ve mikrobiyal aktiviteyi doğrudan etkilediğini belirtmiştir.

İklim değişikliğinin rumen fermentasyonu üzerindeki en önemli etkilerinden biri de rumen mikrobiyal popülasyonunda meydana gelen değişikliklerdir. Rumen mikroorganizmaları; bakteriler, protozoalar, mantarlar et alelerden oluşan oldukça karmaşık bir ekosistemdir ve bu mikroorganizmalar selüloz, hemiselüloz ve nişasta gibi besin maddelerinin parçalanmasında temel görev üstlenmektedir. Ancak sıcaklık artışı, yem kalitesindeki değişimler ve çevresel stres faktörleri rumen mikrobiyotasının kompozisyonunu değiştirebilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında selülolitik ve amilolitik mikroorganizma sayılarında azalma meydana geldiği bildirilmektedir. Bokharaeian et al. (2024), ısı stresinin ruminal mikrobiyal aktiviteyi baskıladığını ve özellikle mikrobiyal protein sentezinde azalmaya neden olduğunu belirtmiştir. Bunun yanında mevsimsel değişimlerin mera kompozisyonunu değiştirmesi de rumen mikrobiyotasında önemli farklılıklara yol açmaktadır. He et al. (2024), yüksek rakımlı bölgelerde otlayan yaklarda mevsimsel mera değişimlerinin rumen bakteri ve mantar topluluklarını önemli ölçüde etkilediğini, özellikle Bacteroidetes ve Firmicutes popülasyonlarında değişiklikler meydana geldiğini bildirmiştir.

İklim değişikliğine bağlı olarak yem bitkilerinin kimyasal bileşiminde meydana gelen değişiklikler de rumen fermentasyonunu doğrudan etkilemektedir. Artan sıcaklık ve kuraklık koşullarında yem bitkilerinde lignifikasyon artmakta, ham protein oranı azalmakta ve sindirilebilirlik düşmektedir. Bu durum rumen mikroorganizmalarının substrat kullanım etkinliğini azaltarak fermentasyon profilinde değişikliklere yol açmaktadır. Hart et al. (2022), gelecekteki iklim senaryolarında yetiştirilen yem bitkilerinin

rumen fermentasyon özelliklerinin değiştiğini ve özellikle kuraklık koşullarında sindirilebilirliğin azaldığını bildirmiştir.

Rumen fermentasyonu sonucunda oluşan uçucu yağ asitleri (asetat, propiyonat ve bütirat), ruminantların temel enerji kaynağını oluşturmaktadır. Ancak iklim değişikliğine bağlı stres koşulları uçucu yağ asitleri üretiminde ve oranlarında önemli değişikliklere neden olabilmektedir. Özellikle yem kalitesindeki değişimler ve mikrobiyal popülasyondaki farklılıklar asetat/propiyonat oranını etkileyerek enerji metabolizmasını değiştirmektedir. He et al. (2024), soğuk ve sıcak mevsimlerde otlayan yaklarda uçucu yağ asidi profillerinin önemli ölçüde değiştiğini, özellikle asetik asit oranı ile asetat/propiyonat oranının mevsimsel farklılıklardan etkilendiğini bildirmiştir. Ayrıca Alabi et al. (2023), ruminal fermentasyon koşullarındaki değişimlerin toplam uçucu yağ asidi üretimi üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu belirtmiştir.

Su Tüketimi

İklim değişikliği, ruminantlarda su tüketimi ve su gereksinimi üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Özellikle yüksek çevre sıcaklığı ve ısı stresi koşullarında hayvanlar, vücut sıcaklığını dengeleyebilmek amacıyla daha fazla su tüketmektedir. Solunum hızının artması, terleme ve evaporatif ısı kaybının yükselmesi nedeniyle oluşan sıvı kaybı, su gereksinimini artırmaktadır. Habeeb et al. (2023), sıcaklık-nem indeksinin yükseldiği dönemlerde ruminantlarda su tüketiminin önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. İklim değişikliği yalnızca su tüketimini değil, su kalitesini de etkilemektedir. Kuraklık, azalan yağışlar ve artan buharlaşma nedeniyle özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su kaynaklarında tuzluluk artmaktadır. Tulu et al. (2023), su kaynaklarındaki tuzluluk artışının küçük ruminantlarda yem tüketimi ve performansı olumsuz etkileyebileceğini belirtmiştir. Ayrıca yüksek tuzluluk düzeyleri, aşırı su tüketimi, mineral

dengesizlikleri ve canlı ağırlık kayıplarına neden olabilmektedir. Koyun ve keçiler, su kısıtlılığına karşı büyükbaş hayvanlara göre daha dayanıklı kabul edilmektedir. Özellikle yerli ve adapte olmuş keçi ırklarının kurak koşullarda suyu daha etkin kullanabildiği bildirilmektedir (Tulu et al., 2023).

Verim Üzerine Etkiler

İklim değişikliği ve buna bağlı oluşan ısı stresi, ruminantlarda süt verimi, canlı ağırlık artışı ve döl verimi üzerinde önemli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Yüksek çevre sıcaklığına bağlı olarak yem tüketiminin azalması, enerji yetersizliği ve fizyolojik stres oluşmakta; bu durum hayvanların üretim performansını düşürmektedir. Özellikle süt sığırlarında sıcaklık-nem indeksinin yükselmesiyle birlikte süt veriminde azalma meydana geldiği bildirilmektedir (Habeeb et al., 2023; Jawhar et al., 2024).

Isı stresi altında kuru madde tüketiminin azalması, canlı ağırlık artışını da olumsuz etkilemektedir. Hayvanlar metabolik ısı üretimini azaltabilmek için daha az yem tüketmekte ve bu durum büyüme performansının gerilemesine neden olmaktadır. Özellikle sıcak ve kurak bölgelerde yem kalitesinin düşmesi, büyüme hızını daha da sınırlandırmaktadır (Harun et al., 2022; Jawhar et al., 2024).

İklim değişikliği, ruminantların döl verimi üzerinde de önemli etkiler oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklıklar estrus belirtilerinin zayıflamasına, ovaryum fonksiyonlarının bozulmasına ve gebelik oranlarının düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca embriyonik ölümler ve infertilite problemleri sıcaklık stresinin arttığı dönemlerde daha sık görülmektedir. Özellikle süt sığırlarında yaz aylarında döl tutma oranlarının önemli ölçüde düştüğü bildirilmektedir (Habeeb, 2025; Habeeb et al., 2023).

Metan Emisyonu ve Çevresel Sürdürülebilirlik

İklim değişikliği ile birlikte artan sera gazı emisyonları, ruminant yetiştiriciliğinde enterik metan oluşumunu önemli bir çevresel sorun haline getirmiştir. Ruminantlarda metan gazı, rumende gerçekleşen mikrobiyal fermentasyon sonucu oluşmakta ve özellikle yüksek lifli yemlerin sindirimi sırasında artmaktadır. Hayvancılık kaynaklı metan emisyonlarının küresel ısınmaya önemli düzeyde katkı sağladığı bildirilmektedir (Bačeninaitė et al., 2022; Vaghar Seyedin et al., 2022).

İklim değişikliği aynı zamanda yem kaynakları ve rumen fermentasyonu arasındaki ilişkiyi de etkilemektedir. Kuraklık, sıcaklık artışı ve yem kalitesindeki değişimler rumen fermentasyon profilini değiştirerek metan oluşumunu etkileyebilmektedir. Özellikle düşük kaliteli kaba yemlerin kullanımının artması, asetat üretimini yükselterek metan oluşumunu artırabilmektedir. Buna karşılık yoğun yem oranının artırılması ve bazı yem katkılarının kullanılması propiyonat oluşumunu destekleyerek metan emisyonunu azaltabilmektedir (Bačeninaitė et al., 2022).

İklim değişikliğiyle mücadelede düşük metanlı rasyon stratejileri önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Sindirilebilirliği yüksek yemlerin kullanılması, rasyona yağ ilavesi yapılması, tanenler, esansiyel yağlar ve bitki ekstraktları gibi yem katkılarının kullanılması metan oluşumunu azaltabilmektedir. Ayrıca sürdürülebilir hayvancılık sistemlerinde çevresel etkilerin azaltılması ile hayvan verimliliğinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği bildirilmektedir (Vaghar Seyedin et al., 2022; Scoones, 2022).

İklim Değişikliğine Karşı Besleme Stratejileri

Kuraklığa Dayanıklı Yem Bitkileri

İklim değişikliğiyle birlikte artan kuraklık ve su yetersizliği, yem üretimini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle kuraklığa dayanıklı yem bitkilerinin kullanımı sürdürülebilir ruminant yetiştiriciliği açısından önem taşımaktadır. Özellikle sorgum, sudan otu, korunga ve bazı baklagil yem bitkilerinin düşük su koşullarına daha dayanıklı olduğu bildirilmektedir (Omotoso & Omotayo, 2024; Nwobodo et al., 2022).

Alternatif Yem Kaynakları

Tarımsal yan ürünler, agro-endüstriyel atıklar ve alternatif yem kaynakları, iklim değişikliğine bağlı yem açığının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu yem kaynakları hem yem maliyetlerini azaltmakta hem de sürdürülebilir yem arzına katkı sağlamaktadır (Nwobodo et al., 2022; Omotoso ve Omotayo, 2024).

Silaj Kullanımı

Silaj kullanımı, yemlerin uzun süre muhafaza edilmesini sağlayarak özellikle kurak dönemlerde kaliteli kaba yem ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olmaktadır. Silaj uygulamaları yem kayıplarını azaltmakta ve yem arz güvenliğini desteklemektedir (Omotoso & Omotayo, 2024; Scoones, 2022).

Hassas Besleme

Hassas besleme uygulamaları, hayvanın gereksinimine uygun besleme yapılarak yemden yararlanma etkinliğinin artırılmasını amaçlamaktadır. Böylece hem üretim maliyetleri hem de çevresel emisyonlar azaltılabilmektedir. Özellikle enerji ve protein dengesinin optimize edilmesi metan emisyonunun düşürülmesinde etkili olmaktadır (Bačeninaitė et al., 2022; Vaghar Seyedin et al., 2022).

Mera Yönetimi

Sürdürülebilir mera yönetimi; aşırı otlatmanın önlenmesi, rotasyonlu otlatma sistemlerinin uygulanması ve mera ıslah çalışmalarıyla yem kaynaklarının korunmasını sağlamaktadır. Uygun mera yönetimi hem hayvan besleme açısından hem de çevresel sürdürülebilirlik bakımından önemli görülmektedir (Scoones, 2022; Nwobodo et al., 2022).

Yem Katkı Maddeleri

Esansiyel yağlar, tanenler, probiyotikler ve yağ katkıları gibi yem katkı maddeleri rumen fermentasyonunu düzenleyerek yemden yararlanmayı artırmakta ve metan oluşumunu azaltabilmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğiyle mücadelede önemli besleme stratejileri arasında yer almaktadır (Vaghar Seyedin et al., 2022; Bačeninaitė et al., 2022).

Su Yönetimi

İklim değişikliğiyle birlikte su kaynaklarının azalması, hayvancılıkta etkin su yönetimini zorunlu hale getirmiştir. Temiz ve yeterli su temini, su kayıplarının azaltılması ve kuraklığa dayanıklı üretim sistemlerinin geliştirilmesi sürdürülebilir hayvancılık açısından büyük önem taşımaktadır (Tulu et al., 2023; Habeeb et al., 2023).

Kaynakça

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research, 29*(28), 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Ahmadi, F., Suleria, H. A. R., & Dunshea, F. R. (2025). Role of plant bioactive compounds in improving ruminant resilience to heat stress challenge. *Animal Production Science, 65*, AN23386. https://doi.org/10.1071/AN23386

Alabi, J. O., Okedoyin, D. O., Anotaenwere, C. C., Wuaku, M., Gray, D., Adelusi, O. O., Ike, K. A., Olagunju, L. K., Dele, P. A., & Anele, U. Y. (2023). Essential oil blends with or without fumaric acid influenced in vitro rumen fermentation, greenhouse gas emission, and volatile fatty acids production of a total mixed ration. *Ruminants, 3*(4), 373–384. https://doi.org/10.3390/ruminants3040031

Bačeninaitė, D., Džermeikaitė, K., & Antanaitis, R. (2022). Global warming and dairy cattle: How to control and reduce methane emission. *Animals, 12*(19), 2687. https://doi.org/10.3390/ani12192687

Bogale, G. A., & Erena, Z. B. (2022). Drought vulnerability and impacts of climate change on livestock production and productivity in different agro-ecological zones of Ethiopia. *Journal of Applied Animal Research, 50*(1), 471–489. https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2103563

Bokharaeian, M., Toghdory, A., & Ghoorchi, T. (2024). Evaluating the dose-dependent effects of curcumin nano-micelles on rumen fermentation, nitrogen metabolism, and nutrient digestibility in heat-stressed fattening lambs: Implications for climate change and sustainable animal production. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 108*(5), 1231–1242. https://doi.org/10.1111/jpn.13971

Cabrita, A. R. J., Carvalheira, J., & Fonseca, A. J. M. (2025). Live yeast supplementation attenuates the effects of heat stress in dairy cows. *Veterinary Sciences, 12*(9), 791. https://doi.org/10.3390/vetsci12090791

Cheng, M., McCarl, B., & Fei, C. (2022). Climate change and livestock production: A literature review. *Atmosphere, 13*(1), 140. https://doi.org/10.3390/atmos13010140

DeBord, Z. L. (2023). *Effect of shade and limit feeding on growing cattle during heat stress* (Master's thesis, Kansas State University). Kansas State University Research Repository.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Livestock solutions for climate change*. Rome: FAO.

Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M. D., von Schuckmann, K., Szopa, S., et al. (2025). *Indicators of global climate change 2024: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence*. *Earth System Science Data*. https://doi.org/10.5194/essd-2025-250

Godde, C. M., Mason-D'Croz, D., Mayberry, D. E., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2021). Impacts of climate change on the livestock food supply chain: A review of the evidence. *Global Food Security, 28*, 100488. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488

Habeeb, A. A. M. (2025). Global climate change effects on the reproductive efficiency, milk output, and composition in dairy cattle. *Indiana Journal of Agriculture and Life Sciences, 5*(4), 44–65. https://doi.org/10.5281/zenodo.17015842

Habeeb, A. A., Osman, S. F., Teama, F. E. I., & Gad, A. E. (2023). The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. *Tropical Animal Health and Production, 55*, 388. https://doi.org/10.1007/s11250-023-03805-y

Hart, E. H., Christofides, S. R., Davies, T. E., Stevens, P. R., Creevey, C. J., Müller, C. T., Rogers, H. J., & Kingston-Smith, A. H. (2022). Forage grass growth under future climate change scenarios affects fermentation and ruminant efficiency. *Scientific Reports, 12*, 4454. https://doi.org/10.1038/s41598-022-08309-7

Harun, M. H., Shafi, K. M., Dey, S. C., Hossen, M. M., Rahman, M., Ahmad, T., Bekere, H. Y., Hussen, D. H., & Yusuf, M. A. (2022). Consequence of environmental change on the animal's

health and productivity: A brief review. *International Journal of Agriculture and Veterinary Sciences, 4*(4), 75–85. https://doi.org/10.34104/ijavs.022.075085

Hauser, A., França, M., Hauser, R., Scheid, A. L., Perazzoli, B., Mendes, B. P. B., Telles, I. P., Miletti, L. C., & Thaler Neto, A. (2023). Effect of heat stress and solar radiation on dry matter intake, biochemical indicators, production, and quality of Holstein and Jersey cows' milk. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, 75*(4), 721–734. https://doi.org/10.1590/1678-4162-12967

He, S., Zhao, S., Wang, Z., Dai, S., Mao, H., & Wu, D. (2024). Impact of seasonal variation in pasture on rumen microbial community and volatile fatty acids in grazing yaks: Insights from high-altitude environments. *Microorganisms, 12*(8), 1701. https://doi.org/10.3390/microorganisms12081701

Hur, S. J., Kim, J. M., Yim, D. G., Yoon, Y., Lee, S. S., & Jo, C. (2024). Impact of livestock industry on climate change: Case study in South Korea—A review. *Animal Bioscience, 37*(3), 405–418. https://doi.org/10.5713/ab.23.0256

Jawhar, S. A., Çam, M. A., Habibi, E., & Yılmaz, Ö. F. (2024). Effects of climate change on animal production. *Journal of Natural Science Review, 2*(2), 1–14. https://doi.org/10.62810/jnsr.v2i2.30

Kazemi, M., Elghandour, M. M. M. Y., & Salem, A. Z. M. (2025). *Toward climate-smart ruminant production: Best practices and future directions. In Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 3205–3239). Singapore: Springer.

Kropf, C. M., Vaterlaus, L., Bresch, D. N., & Pellissier, L. (2025). Tropical cyclone risk for global ecosystems in a changing climate. *Nature Climate Change, 15*, 92–100. https://doi.org/10.1038/s41558-024-02194-w

Maldonado-Jáquez, J. A., Torres-Hernández, G., Castillo-Hernández, G., Cruz-Colín, L. D. L., Jiménez-Penago, G., González-Luna, S., Aguilar Marcelino, L., Arenas-Báez, P., & Granados-Rivera, L. D. (2025). *Adaptation to stressful environments in sheep and goats:* Key strategies to provide

food security to vulnerable communities. *Ruminants, 5*(4), 63. https://doi.org/10.3390/ruminants5040063

Mićić, N., Bogdanović, V., Stanojević, D., Gavran, M., Samardžija, M., Kostelić, A., & Gantner, V. (2025). Comprehensive review of heat stress effects on dairy cattle: The implications for production, reproduction, and adaptation in the context of climate change. *Veterinarski Arhiv, 95*(4), 365–380. https://doi.org/10.24099/vet.arhiv.2788

Neves, L. F. M., Gomes, M. B., Campolina, J. P., Campos, M. M., Souza, E. M. B., Diavão, J., Silva, A. S., Tomich, T. R., Carvalho, W. A., Lage, H. F., & Coelho, S. G. (2025). Impact of heat stress on intake, performance, digestibility, and health of neonatal dairy calves. *Animals, 15*(13), 1876. https://doi.org/10.3390/ani15131876

Newman, R., & Noy, I. (2023). The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. *Nature Communications, 14*, 6103. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41888-1

Nwobodo, C. E., Nwokolo, B., Iwuchukwu, J. C., Ohagwu, V. A., & Ozioko, R. I. (2022). Determinants of ruminant farmers' use of sustainable production practices for climate change adaptation and mitigation in Enugu State, Nigeria. *Frontiers in Veterinary Science, 9*, 735139. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.735139

Omotoso, A. B., & Omotayo, A. O. (2024). The interplay between agriculture, greenhouse gases, and climate change in Sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change, 24*, 1. https://doi.org/10.1007/s10113-023-02159-3

Papakonstantinou, G. I., Voulgarakis, N., Terzidou, G., Fotos, L., Giamouri, E., & Papatsiros, V. G. (2024). Precision livestock farming technology: Applications and challenges of animal welfare and climate change. *Agriculture, 14*(4), 620. https://doi.org/10.3390/agriculture14040620

Pexas, G., Kyriazakis, I., & Doherty, B. (2023). *The future of animal feed: Future protein sources in livestock feeds: Implications for sustainability and food safety*. London: Food Standards Agency.

Place, S. E., & Mitloehner, F. M. (2024). Examining the role of ruminants in sustainable food systems. *Global Food Security, 40*, 100730.

Rebez, E. B., Sejian, V., Silpa, M. V., & Dunshea, F. R. (2023). Heat stress and histopathological changes of vital organs: A novel approach to assess climate resilience in farm animals. *Sustainability, 15*(2), 1242. https://doi.org/10.3390/su15021242

Rebez, E. B., Sejian, V., Silpa, M. V., Kalaignazhal, G., Thirunavukkarasu, D., Devaraj, C., Nikhil, K. T., Ninan, J., Sahoo, A., Lacetera, N., & Dunshea, F. R. (2024). Applications of artificial intelligence for heat stress management in ruminant livestock. *Sensors, 24*(18), 5890. https://doi.org/10.3390/s24185890

Saeed, O. A., Ahmed, N. K., Alnori, H. M., & Ali, F. M. (2023). Effects of heat stress on ruminant physiological changes in dry arid regions: A review. *Large Animal Review, 29*(6), 271–278.

Scoones, I. (2022). Livestock, methane, and climate change: The politics of global assessments. *WIREs Climate Change, 14*(1), e790. https://doi.org/10.1002/wcc.790

Shirley, A. K., Thomson, P. C., Chlingaryan, A., & Clark, C. E. F. (2024). Review: Ruminant heat-stress terminology. *Animal, 18*, 101267. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101267

Slayi, M., & Jaja, I. F. (2025). Strategies for mitigating heat stress and their effects on behavior, physiological indicators, and growth performance in communally managed feedlot cattle. *Frontiers in Veterinary Science, 12*, 1513368. https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1513368

Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2022). Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: A modelling study. *The Lancet Planetary Health, 6*(3), e192–e201. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00002-X

Thornton, P. K., Boone, R. B., & Ramirez-Villegas, J. (2015). *Climate change impacts on livestock. CGIAR Research Program on Climate Change,* Agriculture and Food Security (CCAFS) Working Paper No. 120. Copenhagen, Denmark: CGIAR.

Tulu, D., Gadissa, S., & Hundessa, F. (2023). Impact of water stress on adaptation and performance of sheep and goat in dryland regions under climate change scenarios: A systematic review. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology, 11*, e2023012. https://doi.org/10.31893/jabb.23012

Vaghar Seyedin, S. M., Zeidi, A., Chamanehpour, E., Nasri, M. H. F., & Vargas-Bello-Pérez, E. (2022). Methane emission: Strategies to reduce global warming in relation to animal husbandry units with emphasis on ruminants. *Sustainability, 14*(24), 16897. https://doi.org/10.3390/su142416897

BÖLÜM 7

NUTRIENT COMPOSITION OF MICROALGAE AND THEIR USE IN ANIMAL NUTRITION

YAVUZ GÜRBÜZ[1]

Abstract

Microalgal biomass can provide high-quality protein and essential amino acids, carbohydrates and bioactive polysaccharides, long-chain polyunsaturated fatty acids—particularly eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid—vitamins, minerals, carotenoids, phenolic compounds, and other antioxidant or immunomodulatory metabolites. Evidence from poultry, ruminant, aquaculture, rabbit, dog, and cat nutrition indicates that the biological response depends strongly on microalgal species, chemical composition, processing method, basal diet, animal species, and inclusion level. Across

[1] Yozgat Bozok University, Faculty of Agriculture, Department of Animal Nutrition, Campus of Erdoğan Akdağ, Yozgat Türkiye. Email adress:yavuz.gurbuz@yobu.edu.tr, Orcid Number:0000-0002-6592-8315

laying-hen studies, the most consistent outcomes are enrichment of egg yolk with n-3 fatty acids, a lower n-6:n-3 ratio, and pigment-related changes in yolk color, generally without impaired production at low or moderate doses. In broilers, appropriate supplementation may improve antioxidant status, intestinal morphology and microbiota, nutrient utilization, and the fatty-acid and pigment profiles of meat; however, high inclusion levels can increase digesta viscosity, reduce feed intake, and depress growth. In ruminants, Spirulina, Chlorella, Schizochytrium, and related products can partly replace conventional protein sources and modify rumen fermentation and milk composition, with more consistent improvements in milk fatty-acid quality than in milk yield. Microalgae can also complement or replace fishmeal and fish oil in aquaculture, provide standardized DHA and functional ingredients for companion animals, and enhance the nutritional and oxidative characteristics of rabbit meat. Their polysaccharides and fibers further support potential prebiotic effects. Despite these advantages, commercialization remains constrained by cultivation, harvesting, drying, and processing costs; variable palatability and digestibility; resistant cell walls; oxidative instability of PUFA-enriched products; inconsistent dose responses; and insufficient standardization and regulatory clarity. Open ponds and photobioreactors offer different productivity, control, water-use, and cost trade-offs, while biorefinery approaches and recovery of high-value compounds may improve economic viability. Overall, microalgae are most

immediately promising as targeted, low- to moderate-dose functional feed ingredients rather than universal bulk-feed replacements. Future research should integrate strain selection, cell-wall disruption, formulation, life-cycle assessment, safety, product quality, and farm-scale economics to establish species-specific inclusion recommendations and scalable production models. This review comprehensively examines the nutrient composition, functional properties, animal-feeding applications, production systems, economic feasibility, and Türkiye-specific potential of microalgae.

Keywords: microalgae; animal nutrition; functional feed; sustainability; quality of animal-derived products

1. INTRODUCTION

Animal feed and livestock production are costly; therefore, economical, high-quality alternative resources are needed to complement conventional feeds and meet growing demand. Microalgae may constitute one such resource. Owing to their diverse nutritional profiles, which include carbohydrates, essential fatty acids and amino acids, carotenoids, and vitamins, microalgae have long been used as sustainable resources in livestock, poultry, and aquaculture production. The inclusion of small amounts of microalgae such as Chlorella, Scenedesmus, or Arthrospira in animal feeds may improve growth, health, general physiology, and the

quantity and quality of animal-derived products (Safafar et al., 2015).

Microalgae-supplemented feeds have been reported to lower cholesterol, strengthen immune responses, improve milk quality and yield in cows, enhance growth and meat and egg quality, increase disease resistance through antiviral and antibacterial effects, support intestinal function, promote probiotic colonization, and improve feed conversion. Consequently, algae-based feeds have also been shown to enhance reproductive performance and assist with weight control (Raja & Hemaiswarya, 2010).

Microalgae are used in many Asian countries, particularly Japan, the Philippines, China, and Korea, and their use in animal nutrition is also expanding in the United States and the United Kingdom. Although global microalgal biomass production remains limited, approximately 30% is used in animal-feed applications. More than 30,000–40,000 microalgal strains have been isolated and classified to date. Nevertheless, substantial barriers remain to the sustainable and economical production of microalgae-based feeds. This review addresses the nutritional and health benefits of microalgae in animal nutrition, limitations to their efficient use, economic feasibility, and production potential in Türkiye (Camacho et al., 2019).

2. MICROALGAL COMPOUNDS

Microalgae are photosynthetic microorganisms that use atmospheric CO_2 and light energy to produce proteins, carbohydrates, and lipids, as well as minerals, vitamins, polyphenols, flavonoids, and carotenoids (Figure 1). The profiles of Arthrospira platensis, Dunaliella salina, Haematococcus pluvialis, Chlorella sp., Nannochloropsis granulata, and Tetraselmis chui, which are commonly used in feed production, are presented in Table 1. These profiles vary with cultivation conditions such as temperature, geographic location, and sunlight. Microalgae also contain underexplored compounds such as lipoproteins, sterols, and alkaloids. These immune-supporting molecules may reduce antibiotic use in livestock production and serve as feed additives (Tibbetts et al., 2015).

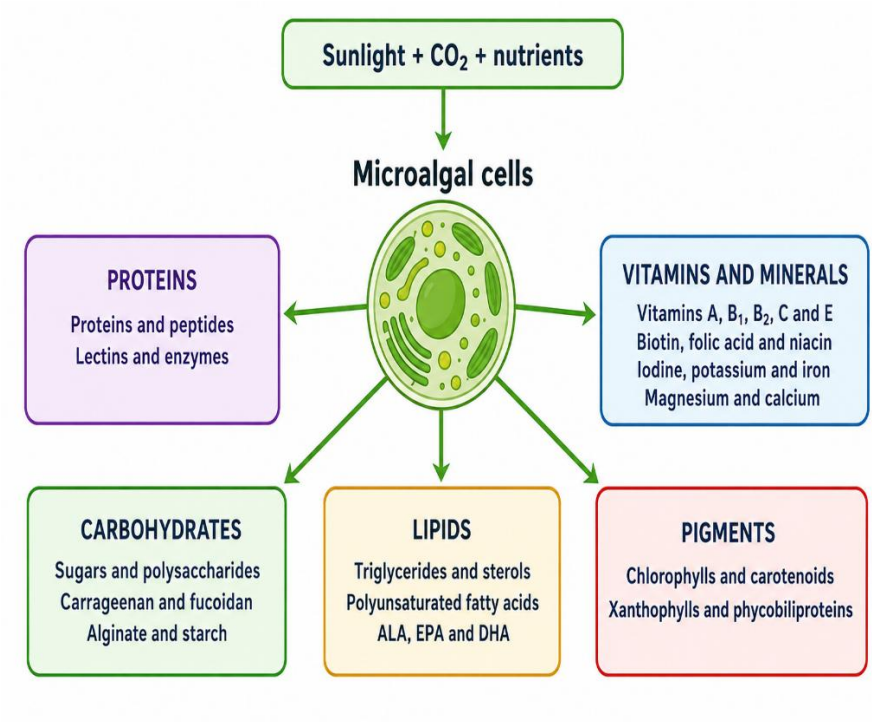


Figure 1. Microalgal metabolites produced during photosynthesis.

2.1.Protein

Identifying new protein sources in microalgae is important for food security. Some strains produce large amounts of protein; the protein content of Arthrospira may reach 70%. The essential amino acid profile of microalgae resembles that of high-quality plant proteins such as soybean.

Table 1. Nutritional characteristics of common microalgae used in feeds*

Characteristic	**A.platensis**	**D. salina**	**H.pluvialis**	**Chlorella**	**N.granulata**	**T. chui**
Crude protein, DM %	51.4-67	10-30	29-45	20-60	26-33.5	46.5
Crude fat, DM %	1.8-7.3	10-20	20-25	13.3-20.9	15.3-23.6	12.3
Carbohydrates, DM %	12.5	25-80*	15-17	18.1-27.5	32-36.2	25
Fiber, DM %	1.0	9-11	34-58	16-35	17.67	-
Threonine, %	2.9-4.9	7.3	5.47	2.5	5.4	4.0
Valine, %	4.2-4.6	6.3	2.45	3.0	7.1	4.8
Methionine, %	1.2-1.6	2.1	0.65	1.2	3.5	2.4
Isoleucine, %	4.2-4.4	5.7	4.32	2.0	5.6	3.4
Leucine, %	5.5-8.0	7.3	3.64	4.7	11	7.3
Phenylalanine, %	3.0-5.8	11.5	1.4	2.7	6.2	4.7
Histidine, %	1.5-2.7	2.6	0.31	2.2	2.3	1.6
Lysine, %	2.9-3.0	2.1	2.68	4.0	8.5	5.6
Arginine, %	4.0-4.9	2.6	10.26	3.1	7.4	9.4
Tryptophan, %	0.1-2.5	2.6	-	1.0	2.8	2.3
Aspartic acid, %	2.4-9.2	18.2	5.01	4.7	11.4	14.1
Glutamic acid, %	5.7-10.7	10.4	10.41	5.8	5.6	4.2
Serine, %	2.8-4.3	0.5	3.43	1.0	14.1	12
Proline, %	2.0-4.0	1.0	1.24	2.5	11.2	3.6

Characteristic	**A.platensis**	**D. salina**	**H.pluvialis**	**Chlorella**	**N.granulata**	**T. chui**
Glycine, %	1.8-5.2	9.4	6.61	3.4	7.5	6.5
Alanine, %	5.4-6.5	7.3	5.6	4.6	7.1	6
Cysteine, %	0.4-0.5	2.1	0.25	0.7	1.6	2.8
Tyrosine, %	3.2-3.3	1.0	2.22	2.4	4.2	3
EPA, g/kg	<2.5	-	0.6	<4.0	34	-
DHA, g/kg	<3.0	-	12.8	<26.0	-	-
Calcium, %	1.3-14.0	2.10	0.25	0.1-5.9	0.09	2.99
Phosphorus, %	1.2-9.6	1.58	1.31	9.6-17.6	0.73	1.46
Magnesium, %	2.0-3.2	1.37	0.22	3.6-8.0	0.26	0.43
Ash, %	5.8-9.4	48	4-29	6.2-7.3	8	16.2
Reference	(Madeira et al., 2017)	(Borowitzka, 2010)	(Borowitzka, 2010)	(Madeira et al., 2017)	(Tibbetts et al., 2015)	(Tibbetts etal2015)

According to FAO/WHO, Chlorella and Arthrospira are sustainable protein sources. Methionine and lysine from microalgae may increase breast and thigh muscle mass in chickens, thereby improving meat quantity and quality. Microalgae also produce bioactive peptides with antioxidant, antihypertensive, anticoagulant, antitumor, and immunostimulatory properties. Protein-rich genera include Chlorella, Arthrospira, Dunaliella, Tetraselmis, Phaeodactylum, Skeletonema, and Scenedesmus (Becker, 2007).

2.2.Carbohydrates

Carbohydrates are important microalgal constituents because of their nutritional and pharmaceutical value. The soluble fiber beta-1,3-glucan, particularly abundant in Chlorella, has antioxidant properties and may help reduce blood cholesterol. Porphyridium cruentum produces a sulfated galactan exopolysaccharide that may replace carrageenan in the meat and dairy industries. Xylose, mannose, glucose, galactose, and rhamnose can be obtained from microalgal polysaccharides. Glucose may account for 47–85% of total carbohydrates in some green microalgae, whereas mannose may reach 45.9% in diatoms such as Phaeodactylum tricornutum (Spolaore et al., 2006).

2.3.Lipids

Depending on the strain and culture conditions, microalgae may produce lipids equivalent to 50% or more of their dry weight. They can be rich in polyunsaturated fatty acids such as EPA, ALA, AA, DHA, and LA. Humans and animals cannot synthesize these essential fatty acids, although they are highly important in human nutrition. Through their antioxidant and anti-inflammatory effects, DHA and EPA play important roles in reducing the risks of mental-health disorders, arrhythmia, stroke, rheumatoid arthritis, and hypertension. Isochrysis, Nannochloropsis, Tetraselmis, and Arthrospira are considered good sources (Mata et al., 2010).

2.4.Carotenoids

In animal nutrition, carotenoids provide nutritional, therapeutic, and antioxidant benefits. Approximately 200 carotenoids can be obtained from microalgae, with β-carotene and astaxanthin predominating in commercial production. β-Carotene-rich feeds can impart a deep yellow color to egg yolk. Among microalgae, Dunaliella salina can accumulate β-carotene up to 14% of its weight under stressful conditions, whereas Haematococcus pluvialis can accumulate 4–5% astaxanthin (Stahl & Sies, 2005).

Table 2. Carotenoid sources depending on microalgae species.

Carotenoid	Microalgal species	Reference
β-carotene	Dunaliella salina, D. bardawil	(Prieto et al., 2011)
Astaxanthin	Haematococcus pluvialis, Chlorella zofingiensis	(Shah et al., 2016)
Lutein	Scenedesmus almeriensis	(Prieto et al., 2011)
Canthaxanthin	Chlorella zofingiensis	(Rauytanapanit et al., 2019)
Lycopene	Chlorella marina	(Renju et al., 2013)
Fucoxanthin	Phaeodactylum tricornutum	(Kim et al., 2012)

Carotenoid	Microalgal species	Reference
Zeaxanthin	Microcystis aeruginosa	(Chen et al., 2005)
Alloxanthin	Cryptomonas ovata	(Bermúdez et al., 2004)
Antheraxanthin	Chrysophaera magna	(Osterrothová et al., 2019)
Violaxanthin/neoxanthin	Chlorella vulgaris, Scenedesmus quadricauda, Neochloris oleoabundans, C. protothecoides	(Chue et al., 2012)
Peridinin	Dinophyta	(Takaichi, 2013)

2.5. Vitamins And Minerals

Microalgal biomass is a valuable source of vitamin A and retinoids, B-complex vitamins, vitamins C and E, and minerals such as sodium, potassium, calcium, magnesium, iron, and zinc. Because these nutrients accumulate in natural forms, they may be assimilated more readily than synthetic forms. Vitamin and mineral concentrations vary with the strain, light regime, growth medium, and growth stage. Tetraselmis is rich in thiamine and pyridoxine; Dunaliella in β-carotene, riboflavin, and cobalamin; and some Chlorella isolates in tocopherol and biotin (Madeira et al., 2017).

3. NUTRITIONAL POTENTIAL OF MICROALGAE-BASED FEEDS

Microalgae can be produced at large scale in photobioreactors or open ponds and used as alternative feed ingredients and additives for

poultry, cattle, sheep, and other farm animals. By modifying culture conditions, biomass enriched in omega fatty acids, carotenoids, and essential amino acids can be obtained.

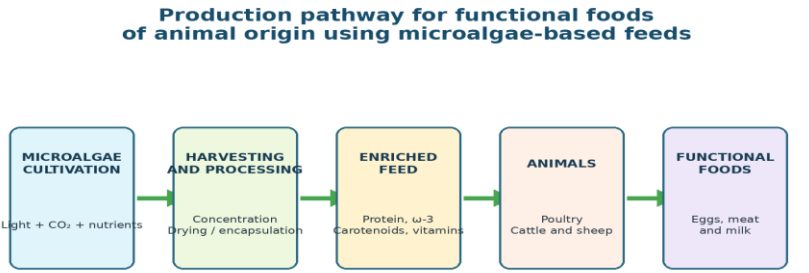


Figure 2. Technological pathway for producing functional foods of animal origin using algae-based feeds.

Additives produced from this biomass may improve meat, egg, and milk quality while providing consumers with antioxidant, antiviral, and other benefits (Dineshbabu et al., 2019).

Table 3. Energy values for some microalgae species

Alga	Animal	ME, MJ/kg DM	Net energy, MJ/kg	Essential amino acid digestibility	Reference
Schizochytrium spp.	Cow	3.48	-	-	(Hostens et al., 2011)
A. platensis (Spirulina)	Broiler	13.48	18.4	0.80 ± 0.04	(Tavernari et al., 2018)

Alga	Animal	ME, MJ/kg DM	Net energy, MJ/kg	Essential amino acid digestibility	Reference
A. platensis	Poultry	3.48	-	-	(Niccolai et al., 2019)

3.1.Egg Production

Microalgae are alternative sources of ω-3 fatty acids that enhance the nutritional value of eggs. In one study, EPA, DPA, and DHA accumulated in the yolks of laying hens fed Nannochloropsis gaditana; the amounts varied with age, breed, and digestibility. With a diet containing 2.4% algae, DHA transfer efficiency was 42.6%, and egg DHA content increased sixfold relative to the control. Laying hens fed Porphyridium-supplemented diets consumed 10% less feed and had lower yolk cholesterol and ω-6:ω-3 ratios. In another study, adding a 2.5% Schizochytrium–flaxseed mixture to layer diets supplied 150 mg ω-3 per egg. However, high ω-3 levels may reduce the tocopherols needed for yolk formation and oxidative stability. Although adding 1.5–10% microalgae to broiler diets can be beneficial, higher levels may adversely affect performance (Figure 3) (Woods & Fearon, 2009).

After four weeks, adding 20% Nannochloropsis oculata to laying-hen diets increased egg lutein and zeaxanthin to approximately 1.3 mg/egg. As dietary carotenoid concentration increased, the yolk became dark orange-red. Natural lutein from Chlorella was

efficiently transferred to yolk and improved the oxidative stability of yolk lipids; carotenoid-rich diets have also been reported to improve shell thickness (Fredriksson et al., 2006).

3.2.Meat Quality

In ruminants, most PUFAs undergo ruminal biohydrogenation, and 70–95% of LA and 85–100% of ALA are transformed before leaving the rumen. Consequently, algal supplementation is effective for enriching meat with EPA and DHA. In addition, flaxseed and fish oils have been reported to double ALA and EPA and quadruple DHA concentrations in lambs (Wachira et al., 2002).

Adding 4–8% Arthrospira to poultry diets did not alter growth but increased yellowness in muscle, skin, fat, and liver, which may improve the commercial appearance of meat depending on consumer demand. Adding 1% fresh liquid algae to broiler diets improved body-weight gain, immune traits, and intestinal Lactobacillus populations. Positive effects on broiler meat quality have also been reported for defatted Chlorella and Arthrospira residues from biofuel production (Figure 3) (Toyomizu et al., 2001).

3.3.Milk Production And Quality

The effects of microalgae depend on the ruminant digestive system and biosynthetic capacity. Rumen microorganisms can convert

unsaturated fatty acids into shorter-chain saturated fatty acids. Coating microalgal biomass to protect it in the rumen may allow more ω-3 to be absorbed in the small intestine and transferred to the mammary gland. Cows fed microalgae-supplemented diets showed increased LA, DHA, and vaccenic acid in milk fat, with DHA rising up to fourfold. Schizochytrium and Nannochloropsis are among the genera most frequently used to improve milk yield and quality (Altomonte et al., 2018). The oxidative stability of ω-3-enriched milk may remain unchanged. During lactation, ω-3 can reduce prostaglandin secretion and may improve fertility and embryo viability. Adding 5–10% microalgae to dairy-cow diets may increase iron, iodine, potassium, and zinc, whereas rumen-protected microalgae may reduce total milk solids, milk fat, and urea (Figure 3) (Glover et al., 2012).

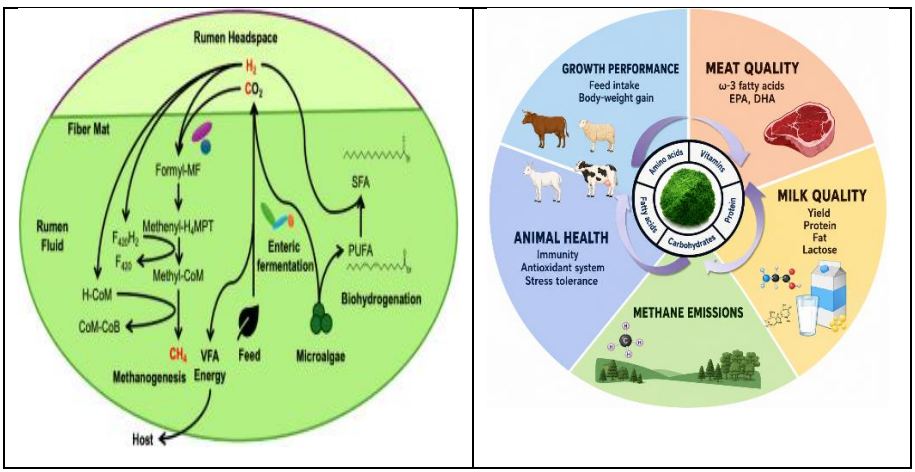


Figure 3. Effects of microalgae on rumen fermentation and animal-derived products.

3.4. Microalgae As Prebiotics

In animal nutrition, probiotics help prevent pathogen invasion by strengthening immunity. The principal prebiotic components are polysaccharides and dietary fibers. Chlorella produces immunostimulatory acidic polysaccharides containing rhamnose, arabinose, and galactose. The cell wall of Tetraselmis contains abundant acidic polysaccharides that support the intestinal microbiota. Extracellular polysaccharides from Dunaliella salina have immunostimulatory, antiviral, and antitumor properties. Thus, microalgae provide nutrients directly and also contribute indirectly to digestion by improving the intestinal microbiota (Pourabedin & Zhao, 2015).

4. APPLICATIONS BY ANIMAL SPECIES

4.1.Effects Of Microalgae On Laying Hens

Dietary supplementation with Phaeodactylum tricornutum, Nannochloropsis oculata, Isochrysis galbana, and Chlorella fusca increased the omega-3 content of egg yolk. The greatest enrichment was achieved with Phaeodactylum and Isochrysis, whereas Chlorella produced the smallest increase because of limited conversion of alpha-linolenic acid to DHA. Adding 2% or 10% Chlorella to laying-hen diets increased linolenic acid and DHA, and the 10% level reduced docosatetraenoic acid. Nannochloropsis can improve egg n-

3 and DHA content and yolk color and can replace part of soybean meal as a crude-protein source. Spirulina and other carotenoid sources intensify yolk color; however, because excessive pigmentation may adversely affect consumer acceptance, the dose should be selected carefully (Lemahieu et al., 2013).

Bruneel et al. (2013) fed laying hens for 28 days with a control diet or diets containing 5% or 10% Nannochloropsis gaditana. By day 14, yolk DHA had increased markedly relative to the control, reaching approximately 42.9 and 48.7 mg/egg in the 5% and 10% groups, respectively. EPA deposition was more limited, and doubling the microalgal dose did not produce a proportional increase in egg omega-3 content. Yolk redness increased and lightness decreased, while most fatty-acid enrichment occurred within the first 14 days.

Park et al. (2015) fed 216 40-week-old ISA Brown laying hens for six weeks with a control diet or diets containing 0.5% or 1% Schizochytrium powder. Supplementation increased yolk DHA and total n-3 fatty acids and reduced the n-6:n-3 ratio without adversely affecting egg production or basic egg-quality traits. The higher yolk color score also demonstrated transfer of microalgal pigments to the egg. The findings indicated that inclusion levels of 0.5–1% can be used to produce DHA-enriched eggs.

Manor et al. (2019) fed 50 Shaver White Leghorn hens for six weeks with 0%, 2.86%, 5.75%, 11.5%, or 23% defatted Nannochloropsis oceanica biomass. As the dose increased, EPA, DHA, and total n-3

fatty acids in yolk increased linearly. At 11.5% and 23%, substantial omega-3 deposition occurred in eggs and in liver, breast, and thigh tissues. Changes in hepatic genes associated with fatty-acid elongation and desaturation showed that the microalga not only supplied fatty acids directly but also regulated fatty-acid metabolism.

Wu et al. (2019) added EPA-rich Nannochloropsis to diets at 1%, 2%, 4%, and 8% to investigate both omega-3 enrichment of eggs and partial replacement of soybean meal. Supplementation dose-dependently increased yolk EPA, DHA, and total n-3 fatty acids and raised the yolk color score within approximately seven days. Production performance was maintained at moderate levels, and the microalga could replace part of soybean meal as a protein and energy source; however, diet balance and feed intake require careful monitoring at high inclusion levels.

Omri et al. (2019) fed 45 44-week-old Lohmann White hens for six weeks with diets containing 0%, 1.5%, or 2.5% Arthrospira platensis. Spirulina made yolks darker and redder while reducing yellowness. The 1.5% group showed improvements in internal-quality traits such as Haugh units and albumen height, whereas total yolk cholesterol was unchanged. The study indicated that the principal effects of Spirulina concern pigmentation and selected internal-quality traits rather than increased production.

Liu et al. (2020) fed 360 Hy-Line Brown laying hens for 70 days with 0–1% DHA-rich Aurantiochytrium-derived microalgae. At the end of the experiment, yolk DHA in hens receiving 1% microalgae was approximately twice that of controls, and the n-6:n-3 ratio and atherogenic and thrombogenic lipid indices improved. Yolk color darkened within consumer-acceptable limits, while changes in the physical and functional properties of yolk and its oxidative stability during cold storage were limited.

Feng et al. (2020) fed 630 30-week-old Hy-Line Brown hens for ten weeks with control diets or diets providing 1.25, 2.50, or 5.00 mg DHA/g feed from microalgal oil or fish oil. Both sources increased yolk DHA, but enrichment efficiency declined as the DHA dose increased. Eggs from the microalgal-oil groups received higher flavor and overall-acceptability scores and had less fishy odor and taste than those from fish-oil groups. Thus, microalgal oil may be a more suitable alternative to fish oil with respect to sensory quality.

Mens et al. (2022) fed 192 Super Nick laying hens for 28 days with diets containing 0%, 1%, 2%, or 3% Nannochloropsis limnetica. As inclusion increased, yolk EPA and DHA rose dose-dependently, laying rate increased by approximately 2–3%, and feed intake increased slightly. Egg weight, basic quality traits, and nutrient retention remained largely unchanged; lower plasma haptoglobin suggested a possible anti-inflammatory effect.

Abbas et al. (2022) fed 250 40-week-old Hy-Line W-36 hens for ten weeks with diets in which 0%, 3%, 6%, 9%, or 12% Spirulina platensis partially replaced soybean meal. Spirulina produced linear and quadratic improvements in laying performance, egg-quality traits, blood metabolites, and hematological variables, with the best results for most measures at 9%. The researchers reported that each 1% Spirulina could replace approximately 4.7% of the soybean meal in the diet and that the microalga could serve as an alternative protein ingredient.

Panaite et al. (2023) fed 120 38-week-old Lohmann Brown hens for eight weeks with a control diet or diets containing 2% Chlorella vulgaris or 2% Spirulina platensis. Both microalgae replaced part of the soybean meal while maintaining production performance and, owing to their high chlorophyll and antioxidant contents, improved yolk color, β-carotene concentration, and antioxidant capacity. Favorable changes in serum antioxidant enzymes and protein digestibility indicated that 2% inclusion may function both as an alternative feed protein and as a functional additive.

Taken together, these ten original studies show that the most consistent effects of microalgae in laying hens are increased yolk DHA, EPA, and total n-3 fatty acids and a lower n-6:n-3 ratio (Abbas et al., 2022; Bruneel et al., 2013; Feng et al., 2020; Liu et al., 2020; Manor et al., 2019; Mens et al., 2022; Omri et al., 2019; Panaite et al., 2023; Park et al., 2015; Wu et al., 2019). Spirulina and pigment-

rich species can markedly alter yolk color, whereas Nannochloropsis, Schizochytrium, and Aurantiochytrium are particularly effective for omega-3 enrichment. Laying performance was maintained or modestly improved at most low and moderate doses, although the efficiency of fatty-acid deposition generally declined as dose increased. At very high inclusion levels, feed intake, dietary balance, cost, and sensory properties must be considered, and the optimum dose should be selected according to the microalgal species and the desired product trait.

4.2.Effects Of Microalgae On Broilers

Adding Schizochytrium to broiler diets can increase DHA deposition in carcass and neural tissues and may support body weight without adversely affecting growth and development. DHA-rich Aurantiochytrium limacinum also increases DHA and total omega-3 concentrations in breast and thigh meat and reduces the n-6:n-3 ratio. Amphora coffeaeformis can improve growth, antioxidant status, and meat quality, whereas inclusion of Parachlorella at 0.5–1.5% may have beneficial immune effects (Petrolli et al., 2019).

Fermented Chlorella products may alter skin and meat color but do not consistently improve growth. Nevertheless, favorable intestinal effects have been reported, including increased Lactobacillus, reduced Escherichia coli, and an approximately 7% reduction in excreta ammonia. The digestion-resistant structure of Spirulina

proteins and increased digesta viscosity may limit high dietary inclusion, although appropriate enzymes may alleviate these problems (An et al., 2016).

Park et al. (2018) supplemented diets for 800 male Ross 308 broilers with 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, or 1.0% Spirulina platensis and monitored the birds for five weeks. Increasing Spirulina linearly improved body-weight gain, feed efficiency, and the European production efficiency index; increased serum superoxide dismutase and glutathione peroxidase activities, dry-matter and nitrogen digestibility, and cecal Lactobacillus counts; and reduced excreta ammonia emissions and drip loss from breast meat after seven days of storage. The researchers considered 1% a practicable dose.

El-Bahr et al. (2020) divided 96 broilers into a control group and three groups receiving 1 g/kg Chlorella vulgaris, Spirulina platensis, or Amphora coffeaeformis. A. coffeaeformis and C. vulgaris in particular increased final body weight and weight gain. All three microalgae reduced meat malondialdehyde, protein carbonyls, cooking loss, and total aerobic bacterial counts while increasing antioxidant-enzyme activity. Essential fatty-acid and amino-acid profiles and microbiological quality improved most clearly in the A. coffeaeformis group.

Pestana et al. (2020) compared a control diet with diets containing 15% Spirulina, alone or with Rovabio or lysozyme, in 120 male Ross 308 broilers from days 21 to 35. Fifteen percent Spirulina increased

digesta viscosity and adversely affected body-weight gain and feed efficiency. Meat yellowness and carotenoid content increased, whereas n-3 PUFAs and α-tocopherol decreased. Although enzyme treatments partially disrupted the cell wall, they did not fully restore performance.

Alfaia et al. (2021) examined 10% Chlorella vulgaris, alone or with carbohydrate-active enzymes, in 120 male Ross 308 broilers. This high inclusion level did not impair growth and produced modest favorable changes in meat quality and lipid nutritional value. Deposition of n-3 fatty acids, EPA, and DHA increased in breast and thigh meat, and the n-6:n-3 ratio improved. The tested enzyme mixtures provided no clear additional benefit in releasing nutrients from the microalgal cell wall.

Šefcová et al. (2021) supplemented diets for 72 male Ross 308 broilers for 30 days with 0.2% Tisochrysis lutea, Tetraselmis chuii, or Porphyridium cruentum. T. chuii and P. cruentum increased body weight, and improvements in villus height and the villus-to-crypt ratio indicated greater absorptive surface. T. chuii also reduced thawing loss from breast fillets. Because this was a pilot study, the findings require confirmation in larger flocks.

Bošković Cabrol et al. (2022) replaced soybean meal with 10%, 15%, or 20% Chlorella vulgaris in diets for 240 male Ross 308 broilers. Performance was maintained at 10%, whereas 15% and 20% reduced feed intake and weight gain. The microalga increased

pigmentation and yellowness, n-3 fatty acids, and EPA+DHA in breast meat and reduced the n-6:n-3 ratio and bacterial load. The 10% level, which had the highest sensory acceptance, was recommended as the more balanced option for partial soybean-meal replacement.

Mishra et al. (2023) fed 162 Cobb 500 chicks for 35 days with a control diet, 3% microalgae, or 3% microalgae plus xylanase. Microalgae supported growth, and combination with xylanase tended to provide additional improvements in nutrient utilization and intestinal-health indicators. Favorable changes in villus architecture and expression of selected gut-related genes suggested that enzymes targeting cell-wall components may improve microalgal availability. Results should nevertheless be interpreted according to the composition of the microalgal ingredient and the activity of the enzyme used.

Alghamdi et al. (2024) fed 200 seven-day-old broilers with five diets containing 0, 0.5, 1.0, 1.5, or 2.0 g/kg of a Dunaliella salina–Spirulina mixture. The mixture improved growth, digestive-enzyme activities, immune responses, and beneficial intestinal microorganisms. Serum IgM and IgG responses were especially enhanced at 0.5 and 1.0 g/kg, indicating that low doses may be sufficient as functional additives.

Bošković Cabrol et al. (2024) investigated replacement of soybean meal with 0%, 3%, or 6% Chlorella vulgaris for 42 days in 576 Ross

308 broilers reared at standard or high ambient temperatures. The 3% level was used without adverse effects on performance, whereas 6% reduced feed intake and body weight. The microalga increased breast-meat redness, yellowness, and the proportion of n-3 fatty acids but did not fully alleviate the adverse effects of chronic heat stress on growth and meat quality. The study therefore identified 3% as a safe replacement level.

Spínola et al. (2024) evaluated diets containing 15% Spirulina, alone or with commercial protease and pancreatin, in 120 male broilers from days 7 to 35. Prolonged high-level inclusion reduced body weight and gain and increased digesta viscosity; enzymes did not fully compensate for these losses. Conversely, yellowness, pigments, and n-3 fatty acids increased in breast and thigh meat, the n-6:n-3 ratio decreased, and breast-meat cholesterol declined. The findings demonstrate a clear trade-off between production performance and the nutritional quality of meat at high doses.

Collectively, these ten studies indicate that low and moderate levels of Spirulina, Chlorella, and other microalgae can benefit growth, antioxidant defenses, intestinal morphology, and microbiota in broilers (Alfaia et al., 2021; Alghamdi et al., 2024; Bošković Cabrol et al., 2024; Bošković Cabrol et al., 2022; El-Bahr et al., 2020; Mishra et al., 2023; Park et al., 2018; Pestana et al., 2020; Šefcová et al., 2021; Spínola et al., 2024). The most consistent meat-quality outcomes are carotenoid-related color changes, n-3 fatty-acid

enrichment, lower n-6:n-3 ratios, and, in some applications, reduced storage losses and microbial load. In contrast, inclusion levels of 15–20% may increase intestinal viscosity, reduce feed intake, and impair performance. Because enzyme benefits are not consistent across studies, microalgal species, cell-wall structure, processing method, and optimum dose should be determined together.

4.3.Effects Of Microalgae On Ruminants

Microalgae are used in ruminant diets to enrich meat and milk with omega-3 fatty acids, reduce saturated fatty acids, and increase conjugated linoleic acid (CLA) and polyunsaturated fatty acids. The ability of rumen microorganisms to disrupt cell walls is an important advantage. Fatty-acid profiles of milk and cheese improved in dairy ewes fed Schizochytrium and goats fed Chlorella. In dairy cattle, Schizochytrium increased DHA and CLA and reduced saturated fatty acids; Crypthecodinium similarly modified rumen and milk-fat profiles (Figure 3) (Altomonte et al., 2018).

Comparisons among dietary microalgae studies must account for dose, basal diet, and experimental duration. High inclusion levels may reduce dry-matter intake by 7–45%, although silage-based diets can partly limit this adverse effect. Reported application rates range from approximately 4 to 79 g/kg dietary dry matter. When Prototheca moriformis meal replaced part of the corn, ether-extract digestibility increased, and an algal meal–soy hull mixture used at up to 45% of

dietary dry matter supported feed intake and daily weight gain (Moate et al., 2013).

Manzocchi et al. (2020) completely replaced soybean meal in the experimental diet of 12 dairy cows with approximately 850 g Spirulina/day. The treatment did not adversely affect dry-matter intake, milk yield, or milk fat, protein, and lactose concentrations, but increased β-carotene, γ-linolenic acid, and selected trans-C18:1 fatty acids in milk. Consumers detected no adverse sensory change. Thus, Spirulina may be regarded less as a yield-enhancing additive than as an alternative protein ingredient to soybean meal that can improve milk composition.

Lamminen et al. (2019) used a balanced 4 × 4 Latin-square design with four lactating Finnish Ayrshire cows to replace soybean meal with Spirulina platensis or a Nannochloropsis gaditana–Chlorella vulgaris mixture. Microalgae did not significantly alter milk or energy-corrected milk yield, although milk and milk-fat yields were numerically higher with Spirulina. Reduced urinary nitrogen and urea-nitrogen excretion indicated that environmental losses of feed nitrogen could be limited. The Nannochloropsis–Chlorella mixture increased milk EPA approximately fourfold. However, palatability and intake problems with microalgae-containing concentrates increased variability, demonstrating the need to improve processing and palatability.

Kholif et al. (2017) assigned 15 lactating Damascus goats to a control group or to groups receiving 5 or 10 g Chlorella vulgaris/goat/day for 12 weeks. Chlorella increased feed intake and nutrient digestibility. Rumen pH and ammonia nitrogen were unchanged, whereas total volatile fatty acids and propionate increased. Milk and energy-corrected milk yield increased moderately, and total unsaturated fatty acids and CLA in milk rose. The clearest responses at 10 g/goat/day showed that small quantities of Chlorella can improve rumen fermentation, feed utilization, and the nutritional value of milk simultaneously.

Christodoulou et al. (2023) divided 48 dairy ewes into a control group and groups receiving 5, 10, or 15 g Spirulina/day to examine rumen microorganisms. The highest dose, 15 g/ewe/day, increased the relative abundance of selected cellulolytic bacteria and reduced selected amylolytic microorganisms in solid rumen contents. Overall animal performance did not change markedly, indicating that 15 g/day Spirulina may function primarily as a modulator of the rumen microbiota rather than as a direct yield enhancer.

Wang et al. (2023) assigned 54 male Hu lambs to a normal diet, a high-fat diet, or a high-fat diet containing 3% Spirulina for 74 days, including 14 days of adaptation. The high-fat diet inhibited rumen papilla development and reduced total volatile fatty acids, acetate, propionate, and butyrate. Adding 3% Spirulina alleviated many of these effects, increasing papilla length and fermentation products

and upregulating Claudin-1, Claudin-4, and Occludin genes associated with rumen epithelial integrity. It also partly corrected high-fat-diet-induced changes in the rumen microbiota. Because this study used a specific high-fat model, caution is needed when generalizing the results to normal production conditions.

Taken together, these studies show that Spirulina and Chlorella can partially or completely replace conventional protein sources and can positively affect rumen fermentation, digestibility, and microbial balance (Christodoulou et al., 2023; Kholif et al., 2017; Lamminen et al., 2019; Manzocchi et al., 2020; Wang et al., 2023). Effects on milk yield vary among studies, whereas improvements in milk omega-3, EPA, γ-linolenic acid, CLA, and antioxidant composition are more consistent. Responses depend on microalgal species and dose, the extent of cell-wall disruption, basal-diet composition, and product palatability. High cost, reduced intake with some products, and the risk of suppressed rumen fermentation at high lipid levels are major commercial limitations. Microalgae therefore currently appear more practicable as low- or moderate-dose functional additives than as principal ingredients in ruminant diets.

Reduced palatability after microalgal supplementation may be related to the characteristic taste and odor of algae, the physical properties of dry powder, fiber digestibility, effects of rapidly fermentable carbohydrates on rumen pH, or toxic effects of high unsaturated-fatty-acid concentrations on rumen microbiota.

Processing methods such as pelleting and extrusion can alleviate these problems and reduce feed selection. Although milk yield did not change markedly in most studies, Chlorella supplementation strengthened antioxidant defenses in goats by increasing superoxide dismutase and catalase activities and reducing milk protein carbonyls (Tsiplakou et al., 2018).

Table 4. Principal purposes of microalgae use in ruminant nutrition.

Nutrient/trait	Purpose of use	References
Energy	Partial replacement of corn or concentrate feed	Boeckaert et al. (2008); Silva et al. (2016)
Energy	Addition as a lipid supplement	Toral et al. (2012)
Protein	Partial replacement of soybean or rapeseed meal	Póti et al. (2015); Lamminen et al. (2017); Stamey et al. (2012)
Other nutritional properties	Improvement of antioxidant defenses and the oxidative status of products	Tsiplakou et al. (2018)

Dietary fat can reduce enteric methane formation in ruminants. Although in vitro reductions of up to 80% have been observed with DHA-rich algae, reductions of comparable magnitude have not been confirmed at practical in vivo doses. Milk-fat depression is unlikely

to be attributable solely to the C18:2 cis-10, trans-12 isomer. Knowledge gaps persist regarding ruminal degradability of microalgal proteins, intestinal passage, and amino-acid availability (Beauchemin et al., 2008).

4.4.Effects Of Microalgae in Aquaculture Nutrition

Intensive use of fishmeal and fish oil in animal feeds places pressure on marine biodiversity, food security, costs, and sustainability. DHA- and EPA-producing microalgae, especially Isochrysis galbana and Diacronema vikianum, can replace or complement these resources. Because DHA is important for brain and retinal development, it also enhances the functional value of fish products in human nutrition (Pulz & Gross, 2004).

Using microalgae in larval-fish diets can reduce requirements for live feed (plankton, etc.) and production costs when suitable species combinations are selected. In growing sturgeon, Spirulina supplied up to 50% of dietary protein while supporting growth, feed conversion, and protein efficiency. Schizochytrium improved performance and survival in Nile tilapia, while Spirulina improved protein and essential-amino-acid digestibility. In Indian carp, Spirulina enhanced growth and carcass lipid profiles and could replace fishmeal at selected levels (Moate et al., 2013).

Microalgal carotenoids can be used for pigmentation in salmon, trout, shrimp, lobster, and ornamental fish. Chlorella vulgaris has

produced favorable results as a dietary pigment source in salmonids, sea bream, carp, and goldfish. Astaxanthin and other carotenoids improve the consumer appeal of fish flesh. Their transfer through the food chain increases the value of microalgae in aquaculture both as nutrients and as enhancers of product appearance (El-Bahr et al., 2020).

4.5.Dogs And Cats

Dogs and cats have a limited capacity to convert alpha-linolenic acid to DHA. Schizochytrium, which may contain approximately 20% DHA, therefore provides a direct source. In these animals, DHA may influence inflammation by regulating eicosanoid and cytokine formation and supports neurological and visual development in puppies. Because the composition of fish-oil sources is variable, standardized microalgal oils may offer an alternative (Wallace et al., 2003).

Microalgal oil inclusion levels of approximately 0.12–0.14% have been used in cat food during postoperative recovery, whereas products included at 0.4% in dog diets have been reported to be acceptable in terms of palatability, digestibility, and metabolizable energy. Microalgal oil may support phagocytic responses and oxidative status, and omega-3 supplementation may help reduce gingivitis and inflammatory processes. Antioxidant-enriched diets have improved cognitive performance in older dogs, while the antioxidant capacity of microalgal fractions varies by species and

extraction method. Schizochytrium oil has also been reported to improve learning associated with visual processing in aging dogs (Souza et al., 2020).

The amino acid and taurine contents of microalgae have been examined as alternative pet-food ingredients. A screening study of 18 algal species provided preliminary data on non-animal taurine and protein sources, although it did not include an animal trial. Lithothamnium calcareum meal has also been investigated as a mineral supplement for cortical autograft healing in dogs. These findings indicate potential for microalgae in vegetarian or vegan pet-food formulations, but the adequacy of essential nutrients must be verified (McCusker et al., 2014).

4.6.Effects Of Microalgae On Rabbits

Because marine microalgae are rich in vitamins, antioxidants, and essential fatty acids, they are being evaluated as natural additives and feed resources in rabbit-meat production. Spirulina may lower total cholesterol and raise HDL in hypercholesterolemic diets. In rabbits, it has been reported to improve crude-protein digestibility without impairing growth and to enrich meat with polyunsaturated fatty acids (Petracci et al., 2009).

The antioxidant effects of microalgae arise not only from PUFAs but also from phycocyanin and phenolic compounds. DHA and EPA participate in cell-membrane integrity, energy and oxygen

metabolism, muscle and cell growth, nervous-system function, and hormone synthesis. Appropriate dietary microalgal supplementation may therefore improve the nutritional value, oxidative stability, and shelf life of rabbit meat (Kholif et al., 2017).

5.LIMITATIONS OF MICROALGAE USE

The limitations of microalgae in animal feeding are biological, technological, safety-related, and economic. Nutrient composition varies substantially with species, strain, cultivation conditions, growth phase, and processing; consequently, a biomass characterized only by its crude-protein or lipid content cannot be assumed to have consistent feeding value. High inclusion levels may also reduce palatability or performance, while some species contain resistant cell walls, fiber, or antinutritional compounds that restrict access to intracellular protein and lipids (Lu et al., 2023; Saadaoui et al., 2021).

Cell disruption, fine milling, enzymatic treatment, extrusion, or fermentation can improve nutrient release, but each treatment adds cost and may accelerate oxidation of PUFAs or degrade heat-sensitive pigments and vitamins. Species-specific digestibility and dose-response trials are therefore required before large-scale substitution of soybean meal, fish meal, or cereal ingredients (Markou et al., 2018; Shivakumar et al., 2024). PUFA enrichment can additionally alter the flavor and oxidative stability of meat, milk,

and eggs; stabilization, antioxidant protection, suitable packaging, and storage control are needed to preserve product quality (Shingfield et al., 2008).

Feed safety is a further constraint. Biomass cultivated in wastewater or exposed ponds can accumulate heavy metals, persistent organic contaminants, pathogens, unwanted microorganisms, or algal toxins. Cyanobacterial contamination and strain misidentification are particularly important because toxin production can change with environmental stress. Feed-grade production therefore requires authenticated strains, traceable culture media, hazard analysis, contaminant limits, and batch testing for microbiological quality, metals, and relevant toxins (Markou et al., 2018; Withana et al., 2025). These requirements mean that low-cost wastewater cultivation cannot automatically be transferred to the feed sector without validated treatment and monitoring.

6.MICROALGAE CULTIVATION AND BIOMASS PRODUCTION

Microalgae may be cultivated photoautotrophically, heterotrophically, or mixotrophically. Open raceway ponds are comparatively inexpensive and simple to operate, but they provide limited control of temperature and light, are vulnerable to contamination and evaporation, and generally produce dilute

cultures. Closed tubular, flat-panel, and column photobioreactors provide improved control, higher areal productivity, and better culture purity, but require greater capital investment and energy for pumping, gas transfer, cooling, and cleaning (Brennan & Owende, 2010; Chisti, 2007; Ugwu et al., 2008). System selection must therefore reflect the organism, target product, climate, water source, land availability, contamination tolerance, and intended feed-quality standard.

Productivity depends on light-path length, cell density, mixing, temperature, pH, salinity, and the supply of carbon, nitrogen, phosphorus, and trace elements. At high cell densities, self-shading limits photosynthesis; in tubular systems, oxygen accumulation and excessive shear may also constrain growth. Robust operation therefore requires continuous monitoring and, where justified, control of irradiance, gas exchange, temperature, and nutrient delivery (Razzak et al., 2013; Ugwu et al., 2008). Strain selection should consider not only maximum growth rate but also resistance to local temperature fluctuations, stable biochemical composition, ease of harvesting, and susceptibility to predators or competing microorganisms.

Harvesting and downstream processing are decisive because cultures often contain less than 1% dry matter. A practical process commonly combines low-energy bulk concentration by flocculation, sedimentation, flotation, or membrane filtration with final

dewatering by centrifugation. Drying by spray-, drum-, freeze-, or solar-assisted methods must be selected according to scale and the stability requirements of proteins, pigments, and PUFAs. Recycling water and nutrients, using waste CO_2 or suitable process water, and integrating cultivation with livestock, aquaculture, or food-processing facilities can reduce resource demand, but feed safety and salt or contaminant accumulation must be controlled (Brennan & Owende, 2010; Molina Grima et al., 1999).

7.ECONOMIC FEASIBILITY OF MICROALGAE

Economic feasibility depends on the value of the final product rather than biomass yield alone. Feed is a bulk, price-sensitive market, whereas pigments, omega-3 oils, antioxidants, and specialty additives can tolerate higher production and purification costs.

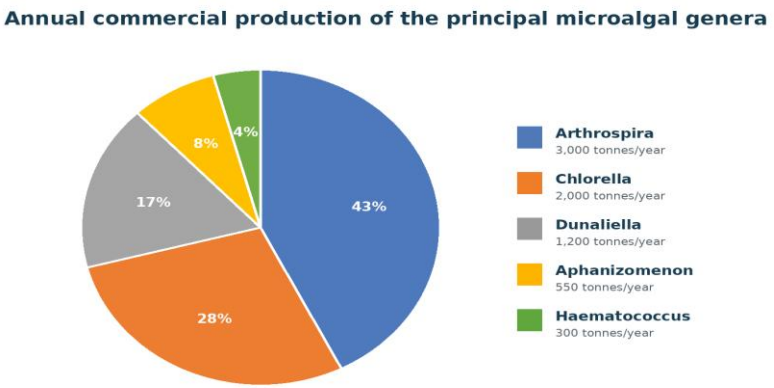


Figure 4. Annual global commercial production of the principal microalgal genera.

Comparative modelling of ponds, tubular reactors, and flat-panel reactors shows that irradiation, photosynthetic efficiency, mixing, nutrients, carbon dioxide, dewatering, labour, and capital utilization are the dominant cost drivers (Norsker et al., 2011).

Consequently, whole biomass is most competitive when it provides several functions simultaneously, for example protein together with pigments or omega-3 fatty acidsCommercial-scale evidence confirms the importance of scale and capacity utilization. A real tubular-photobioreactor facility reported much higher unit costs at modest scale, while modelling showed that larger reactors, improved photosynthetic efficiency, reduced mixing demand, lower-cost nutrients, and year-round operation could markedly reduce the cost per kilogram (Acién et al., 2012). Harvesting remains a major burden because small cells and dilute cultures require large volumes of water to be processed; a staged recovery train is generally more economical than using centrifugation as the sole concentration method.

Location strongly changes the outcome. High annual solar irradiance, moderate temperatures, access to non-arable land and saline or recycled water, proximity to carbon dioxide and nutrient sources, and short transport distances to feed mills improve feasibility. Conversely, artificial lighting, active cooling, freshwater demand, and energy-intensive drying can offset the environmental and financial advantages of cultivation. Life-cycle and techno-

economic assessments should therefore be conducted together and should report functional units relevant to feed, such as digestible protein, metabolizable energy, or delivered DHA, rather than dry biomass alone (Slade & Bauen, 2013; Vázquez-Romero et al., 2022).

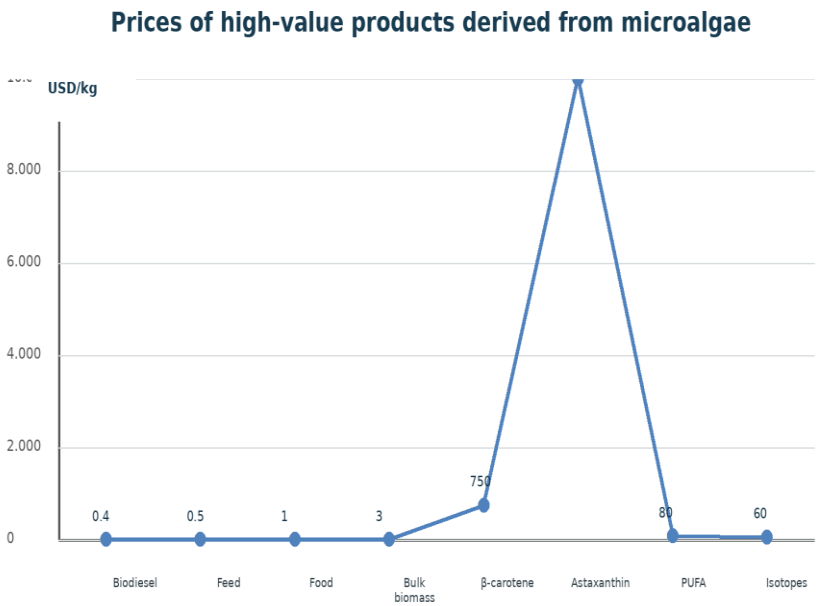


Figure 5. Prices of high-value microalgal products for various commercial applications (USD/kg).

A cascading biorefinery can improve revenue by first recovering high-value oils, pigments, or bioactive compounds and then using the protein- and carbohydrate-rich residue as feed, provided that extraction solvents and processing conditions are feed-safe. Industrial projections indicate that high-value products can already

support profitable operations, whereas commodity feed ingredients require further reductions in cultivation and downstream costs (Ruiz et al., 2016). Long-term contracts for waste CO_2 or nutrients, co-location with feed users, water recycling, automation, and verified environmental credits may improve the business case, but subsidies or carbon pricing should be treated transparently in sensitivity analyses.

8. INDUSTRIAL PRODUCTION OF MICROALGAE AS FEED

Industrial feed production requires an integrated chain comprising strain banking and inoculum preparation, cultivation, harvesting, dewatering, optional cell disruption or fractionation, stabilization, drying, storage, formulation, and distribution. Open ponds remain appropriate for robust organisms such as Arthrospira and Dunaliella, whereas closed photobioreactors or heterotrophic fermenters are favored when culture purity, high cell density, or a standardized lipid profile is essential (Benemann, 2013; Lum et al., 2013). Scaling must preserve light and mass transfer, avoid biofilm formation and contamination, and maintain consistent biochemical composition across seasons and batches.

A feed manufacturer must define specifications for identity, moisture, protein, lipid and fatty-acid profile, ash, digestibility, particle size, oxidative stability, microbial counts, heavy metals,

pesticide or solvent residues, and relevant algal toxins. Good manufacturing practice, HACCP-based control, authenticated production strains, and complete traceability from culture medium to finished feed are central to regulatory acceptance and buyer confidence (Draaisma et al., 2013; Enzing et al., 2014). Wastewater, digestate, or flue gas may reduce input costs, but their use requires validated control of contaminants and must comply with the legislation applicable to feed materials and additives.

Commercialization can follow several routes: whole dried biomass as a protein or pigment source; mechanically or enzymatically disrupted biomass with improved nutrient availability; extracted algal oil standardized for DHA or EPA; or defatted residues incorporated into compound feed. Co-location with aquaculture, food-processing, or livestock operations can create circular flows of carbon dioxide, water, heat, and nutrients and reduce transport. However, industrial sustainability claims should be supported by measured mass and energy balances, life-cycle assessment, animal-performance data, and proof that the selected inclusion level is safe and nutritionally effective (Khan et al., 2018; Lum et al., 2013).

For broad adoption, industrial producers must move from selling an undifferentiated biomass to delivering a reproducible feed ingredient with a defined nutritional function and price per unit of digestible nutrient. Long-term success will therefore depend on strain improvement, robust low-energy harvesting, mild stabilization, co-

product valorization, quality assurance, and close collaboration among microalgae producers, feed mills, animal nutritionists, regulators, and livestock or aquaculture enterprises (Benemann, 2013; Enzing et al., 2014; Khan et al., 2018).

9. MICROALGAE STUDIES IN TÜRKIYE

Türkiye has considerable research and application potential for feed-oriented microalgae production owing to its marine and inland-water resources, developed aquaculture sector, diverse climatic regions, and university-based microalgal culture infrastructure. The FAO country profile shows that marine and inland-water aquaculture are established production sectors in Türkiye. National collections such as the Ege University Microalgae Culture Collection provide scientific infrastructure for preserving and identifying local strains and investigating their production characteristics (Food and Agriculture Organization of the United Nations, n.d.).

Pressure on water resources in Türkiye requires microalgal production systems to be designed regionally. The national food-systems roadmap of the Ministry of Agriculture and Forestry emphasizes that the quantity and quality of water resources vary over time and space and must be managed efficiently. Rather than open ponds that increase freshwater consumption, closed or semi-closed photobioreactors using saline- or brackish-water-tolerant species in coastal regions and treated process water or suitable wastewater in inland regions may therefore be more appropriate. Where

wastewater is used, heavy-metal, pathogen, and toxin safety must be verified in accordance with feed legislation (Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry, 2021).

A feasible model for Türkiye would establish pilot-scale microalgae facilities near aquaculture operations, food-processing plants, and regions of intensive livestock production and compare Chlorella, Arthrospira, and Nannochloropsis under local conditions in terms of yield, nutrient composition, and harvesting cost. The biomass could initially be tested in poultry, ruminant, and aquaculture feeds as a source of protein, omega-3, pigments, or functional additives. Before commercial scale-up, water and energy use, seasonal productivity, drying cost, digestibility, oxidative stability, and species-specific safe inclusion levels should be evaluated together, and relevant projects and research should be supported.

One organization producing microalgae for animal feed in Türkiye is MarinBio, located in the Ata Organized Industrial Zone in Efeler, Aydın. According to the company's 2025 statement, the facility produces approximately 15 tonnes of dry microalgae per month, theoretically equivalent to 180 tonnes per year. The biomass is processed, particularly under the "Algome" brand, into omega-3- and DHA-rich functional feed additives for aquaculture species, poultry, cattle, sheep, and goats. These products are intended to increase dietary omega-3 content, support animal health and productivity, and provide a sustainable alternative to fish oil. However, the entire reported output is not allocated to animal feed;

the company also supplies microalgae-derived products to the food, cosmetics, agriculture, and pharmaceutical sectors. The exact quantity used in animal feeds is therefore unknown.

Another feed-oriented initiative is the project “Microalgae: A Green Resource as an Innovative Food and Feed Additive,” conducted at Burdur Mehmet Akif Ersoy University. At the university’s Microalgal Biomass Production Laboratory, feed additives—particularly for poultry—are being developed from native strains in the MAKU Microalgae Culture Collection, principally Spirulina. Production is conducted under controlled laboratory conditions in closed photobioreactors, but no production quantity in kilograms or tonnes has been disclosed publicly.

10. CONCLUSION

Because they contain amino acids, PUFAs, carotenoids, and vitamins, microalgae have considerable potential as feeds for ruminant and monogastric animals. Their nutrient content can improve the nutritional quality of animal-derived products and provide a sustainable resource. However, challenges concerning digestibility, selection of appropriate inclusion levels, high production costs, technological processing, and storage must be resolved. Further research should focus on sustainable and economical cultivation strategies that can make microalgal feeds cheaper than existing agricultural commodities, while laws and regulations should be made clearer and more practicable.

11. ABBREVIATIONS

A. platensis: Arthrospira platensis;

AA: amino acids;

ARA: arachidonic acid;

ALA: alpha-linolenic acid;

C. cohnii: Crypthecodinium cohnii;

C. vulgaris: Chlorella vulgaris;

CAGR: compound annual growth rate;

D. salina: Dunaliella salina;

DHA: docosahexaenoic acid;

DPA: docosapentaenoic acid;

DW/DM: dry weight/dry matter;

EPA: eicosapentaenoic acid;

FA: fatty acid;

FAO: Food and Agriculture Organization;

LA: linoleic acid;

ME: metabolizable energy;

NE: net energy;

PBR: photobioreactor;

PUFA: polyunsaturated fatty acid;

PVC: polyvinyl chloride; Vit: vitamin;

WHO: World Health Organization;

ω-3 FA: omega-3 fatty acid.

12. REFERENCES

Abbas, A. O., Alaqil, A. A., Mehaisen, G. M. K., & Kamel, N. N. (2022). Effect of dietary blue-green microalgae inclusion as a replacement to soybean meal on laying hens' performance, egg quality, plasma metabolites, and hematology. *Animals*, *12*(20), 2816. https://doi.org/10.3390/ani12202816

Acién, F. G., Fernández, J. M., Magán, J. J., & Molina, E. (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances*, *30*(6), 1344–1353. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005

Alfaia, C. M., Pestana, J. M., Rodrigues, M., Coelho, D., Aires, M. J., Ribeiro, D. M., et al. (2021). Influence of dietary Chlorella vulgaris and carbohydrate-active enzymes on growth performance, meat quality and lipid composition of broiler chickens. *Poultry Science*, *100*(2), 926–937. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.11.034

Alghamdi, M. A., Elbaz, M. I., Ismail, I. E., Reda, F. M., Alagawany, M., El-Tarabily, K. A., et al. (2024). Dietary supplementation with a mixture of Dunaliella salina and Spirulina enhances broiler performance by improving growth, immunity, digestive enzymes and gut microbiota. *Poultry Science*, *103*(1), 103337. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103337

Altomonte, I., Salari, F., Licitra, R., & Martini, M. (2018). Use of microalgae in ruminant nutrition and implications on milk quality – a review. *Livestock Science*, *214*, 25–35. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.05.006

An, B. K., Kim, K. E., Jeon, J. Y., & Lee, K. W. (2016). Effect of dried CLV vulgaris and CLV growth factor on growth performance, meat qualities and humoral immune responses in broiler chickens. *SpringerPlus*, *5*(1), 718. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2373-4

Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., & McAllister, T. A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *48*(2), 21–27. https://doi.org/10.1071/EA07199

Becker, W. (2007). Microalgae in human and animal nutrition. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of microalgal culture* (pp. 312–351). Wiley.

Benemann, J. R. (2013). Microalgae for biofuels and animal feeds. *Energies*, *6*(11), 5869–5886. https://doi.org/10.3390/en6115869

Bermúdez, J., Rosales, N., Loreto, C., Briceño, B., & Morales, E. (2004). Exopolysaccharide, pigment and protein production by the marine microalga Chroomonas sp. in semicontinuous cultures. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *20*(2), 179–183. https://doi.org/10.1023/ B:WIBI. 0000021754. 59894.4a

Boeckaert, C., Vlaeminck, B., Dijkstra, J., Issa-Zacharia, A., Van Nespen, T., Van Straalen, W., et al. (2008). Effect of dietary starch or micro algae supplementation on rumen fermentation and milk fatty acid composition of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *91*(12), 4714–4727. https://doi.org/10.3168/jds.2008-1178

Borowitzka, M. A. (2010). Carotenoid production using microorganisms. In Z. Cohen & C. Ratledge (Eds.), *Single cell oils: Microbial and algal oils* (2nd ed., pp. 225–240). AOCS Press.

Bošković Cabrol, M., Huerta, A., Bordignon, F., Pravato, M., Birolo, M., Petracci, M., et al. (2024). Dietary supplementation with Chlorella vulgaris in broiler chickens submitted to heat-stress: effects on growth performance and meat quality. *Poultry Science*, *103*(7), 103828. https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103828

Bošković Cabrol, M., Martins, J. C., Malhão, L. P., Alves, S. P., Bessa, R. J. B., Almeida, A. M., et al. (2022). Partial replacement of soybean meal with Chlorella vulgaris in broiler diets influences performance and improves breast meat quality and fatty acid composition. *Poultry Science*, *101*(8), 101955. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101955

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(2), 557–577. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009

Bruneel, C., Lemahieu, C., Fraeye, I., Ryckebosch, E., Muylaert, K., Buyse, J., & Foubert, I. (2013). Impact of microalgal feed supplementation on omega-3 fatty acid enrichment of hen eggs. *Journal of Functional Foods*, *5*(2), 897–904. https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.01.039

Camacho, F., Macedo, A., & Malcata, F. (2019). Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: a short review. *Marine Drugs*, *17*(6), 312. https://doi.org/10.3390/md17060312

Chen, F., Li, H. B., Wong, R. N. S., Ji, B., & Jiang, Y. (2005). Isolation and purification of the bioactive carotenoid zeaxanthin from the microalga Microcystis aeruginosa by high-speed

counter-current chromatography. *Journal of Chromatography A*, *1064*(2), 183–186. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.12.065

Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, *25*(3), 294–306. https://doi.org/10.1016/ j.biotechadv. 2007.02.001

Christodoulou, C., Mavrommatis, A., Loukovitis, D., Symeon, G., Dotas, V., Kotsampasi, B., et al. (2023). Effect of Spirulina dietary supplementation in modifying the rumen microbiota of ewes. *Animals*, *13*(4), 740. https://doi.org/10.3390/ani13040740

Chue, K. T., Ten, L. N., Oh, Y. K., Woo, S. G., Lee, M., & Yoo, S. A. (2012). Carotinoid compositions of five microalga species. *Chemistry of Natural Compounds*, *48*(1), 141–142. https://doi.org/10.1007/s10600-012-0183-7

Dineshbabu, G., Goswami, G., Kumar, R., Sinha, A., & Das, D. (2019). Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source. *Journal of Functional Foods*, *62*, 103545.

Draaisma, R. B., Wijffels, R. H., Slegers, P. M. E., Brentner, L. B., Roy, A., & Barbosa, M. J. (2013). Food commodities from microalgae. *Current Opinion in Biotechnology*, *24*(2), 169–177. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.09.012

El-Bahr, S., Shousha, S., Shehab, A., Khattab, W., Ahmed-Farid, O., Sabike, I., et al. (2020). Effect of dietary microalgae on growth performance, profiles of amino and fatty acids, antioxidant

status, and meat quality of broiler chickens. *Animals*, *10*(5), 761. https://doi.org/10.3390/ani10050761

Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M., & Sijtsma, L. (2014). *Microalgae-based products for the food and feed sector: An outlook for Europe*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2791/3339

Feng, J., Long, S., Zhang, H. J., Wu, S. G., Qi, G. H., & Wang, J. (2020). Comparative effects of dietary microalgae oil and fish oil on fatty acid composition and sensory quality of table eggs. *Poultry Science*, *99*(3), 1734–1743. https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.005

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Türkiye: Fisheries and aquaculture country profile*. Retrieved August 15, 2026, from https://www.fao.org/fishery/countrysector/TR/en

Fredriksson, S., Elwinger, K., & Pickova, J. (2006). Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens. *Food Chemistry*, *99*(3), 530–537. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.08.018

Glover, K. E., Budge, S., Rose, M., Rupasinghe, H. P. V., MacLaren, L., Green-Johnson, J., et al. (2012). Effect of feeding fresh forage and marine algae on the fatty acid composition and oxidation of

milk and butter. *Journal of Dairy Science*, *95*(6), 2797–2809. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4736

Gouveia, L., Choubert, G., Gomes, E., Rema, P., & Empis, J. (1998). Use of Chlorella vulgaris as a carotenoid source for salmonids: effect of dietary lipid content on color, digestibility and muscle retention. *Aquaculture International*, *6*, 269–279. https://doi.org/ 10.1023/ A:1009251714573

Hostens, M., Fievez, V., Vlaeminck, B., Buyse, J., Leroy, J., Piepers, S., et al. (2011). The effect of marine algae in the ration of high-yielding dairy cows during transition on metabolic parameters in serum and follicular fluid around parturition. *Journal of Dairy Science*, *94*(9), 4603–4615. https://doi.org/10.3168/jds.2010-3899

Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, *17*, 36. https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x

Kholif, A. E., Morsy, T. A., Matloup, O. H., Anele, U. Y., Mohamed, A. G., & El-Sayed, A. B. (2017). Dietary Chlorella vulgaris microalgae improves feed utilization, milk production and concentrations of conjugated linoleic acids in the milk of Damascus goats. *The Journal of Agricultural Science*, *155*(3), 508–518. https://doi.org/10.1017/S0021859616000824

Kim, S. M., Jung, Y. J., Kwon, O. N., Cha, K. H., Um, B. H., Chung, D., et al. (2012). A potential commercial source of fucoxanthin extracted from the microalga Phaeodactylum tricornutum. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *166*(7), 1843–1855. https://doi.org/10.1007/s12010-012-9602-2

Lamminen, M., Halmemies-Beauchet-Filleau, A., Kokkonen, T., Jaakkola, S., & Vanhatalo, A. (2019). Different microalgae species as a substitutive protein feed for soya bean meal in grass silage based dairy cow diets. *Animal Feed Science and Technology*, *247*, 112–126. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.11.005

Lamminen, M., Halmemies-Beauchet-Filleau, A., Kokkonen, T., Simpura, I., Jaakkola, S., & Vanhatalo, A. (2017). Comparison of microalgae and rapeseed meal as supplementary protein in the grass silage based nutrition of dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, *234*, 295–311. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.10.002

Lemahieu, C., Bruneel, C., Verhalle, R. T., Muyhaert, K., Buyse, J., & Foubert, I. (2013). Impact of feed supplementation with different omega-3 rich microalgae species on enrichment of eggs of laying hens. *Food Chemistry*, *141*(4), 4051–4059. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.078

Liu, B., Zhou, Q., Zhu, J., Lin, G., Yu, D., Ao, T., et al. (2020). Time course of nutritional and functional property changes in egg yolk

from laying hens fed docosahexaenoic acid-rich microalgae. *Poultry Science*, *99*(9), 4616–4625. https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.007

Lu, Q., Li, Y., & Lu, Y. (2023). Challenging problems of applying microalgae for aquaculture environment protection and nutrition supplementation: a long way to go. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *11*, 1151440. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1151440

Lum, K. K., Kim, J., & Lei, X. G. (2013). Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *4*, 53. https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-53

Madeira, M. S., Cardoso, C., Lopes, P. A., Coelho, D., Afonso, C., Bandarra, N. M., et al. (2017). Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review. *Livestock Science*, *215*, 111–121.

Manor, M. L., Derksen, T. J., Magnuson, A. D., Raza, F., & Lei, X. G. (2019). Inclusion of dietary defatted microalgae dose-dependently enriches omega-3 fatty acids in egg yolk and tissues of laying hens. *The Journal of Nutrition*, *149*(6), 942–950. https://doi.org/10.1093/jn/nxz032

Manzocchi, E., Guggenbühl, B., Kreuzer, M., & Giller, K. (2020). Effects of the substitution of soybean meal by spirulina in a hay-

based diet for dairy cows on milk composition and sensory perception. *Journal of Dairy Science*, *103*(12), 11349–11362. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18602

Markou, G., Wang, L., Ye, J., & Unc, A. (2018). Using agro-industrial wastes for the cultivation of microalgae and duckweeds: contamination risks and biomass safety concerns. *Biotechnology Advances*, *36*(4), 1238–1254. https://doi.org/ 10.1016/ j.biotechadv.2018.04.003

Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *10*, 217–232.

McCusker, S., Buff, P. R., Yu, Z., & Fascetti, A. J. (2014). Amino acid content of selected plant, algal and insect species: a search for alternative protein sources for use in pet foods. *Journal of Nutritional Science*, *3*, 1–5. https://doi.org/10.1017/jns.2014.33

Mens, A. J. W., van Krimpen, M. M., Kar, S. K., Guiscafre, F. J., & Sijtsma, L. (2022). Enriching table eggs with n-3 polyunsaturated fatty acids through dietary supplementation with the phototrophically grown green algae Nannochloropsis limnetica: effects of microalgae on nutrient retention, performance, egg characteristics and health parameters. *Poultry Science*, *101*, 101869. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101869

Mishra, P., Das, R., Chaudhary, A., Mishra, B., & Jha, R. (2023). Effects of microalgae, with or without xylanase supplementation, on growth performance, organs development, and gut health parameters of broiler chickens. *Poultry Science*, *102*, 103056. https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103056

Moate, P. J., Williams, S. R. O., Hannah, M. C., Eckard, R. J., Auldist, M. J., Ribaux, B. E., et al. (2013). Effects of feeding algal meal high in docosahexaenoic acid on feed intake, milk production, and methane emissions in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *96*(5), 3177–3188. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6168

Molina Grima, E., Fernández, J., Acién Fernández, F. G., & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology*, *70*(1–3), 231–247. https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00078-4

Niccolai, A., Venturi, M., Galli, V., Pini, N., Rodolfi, L., Biondi, N., et al. (2019). Development of new microalgae-based sourdough "crostini": functional effects of Arthrospira platensis (spirulina) addition. *Scientific Reports*, *9*(1), 19433. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55840-1

Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology Advances*, *29*(1), 24–27. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005

Omri, B., Amraoui, M., Tarek, A., Lucarini, M., Durazzo, A., Cicero, N., et al. (2019). Arthrospira platensis (Spirulina) supplementation on laying hens' performance: eggs physical, chemical, and sensorial qualities. *Foods*, *8*(9), 386. https://doi.org/10.3390/foods8090386

Osterrothová, K., Culka, A., Němečková, K., Kaftan, D., Nedbalová, L., Procházková, L., et al. (2019). Analyzing carotenoids of snow algae by Raman microspectroscopy and high-performance liquid chromatography. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *212*, 262–271. https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.01.013

Panaite, T. D., Cornescu, G. M., Predescu, N. C., Cismileanu, A., Turcu, R. P., Saracila, M., et al. (2023). Microalgae (Chlorella vulgaris and Spirulina platensis) as a protein alternative and their effects on productive performances, blood parameters, protein digestibility, and nutritional value of laying hens' egg. *Applied Sciences*, *13*(18), 10451. https://doi.org/10.3390/app131810451

Park, J. H., Lee, S. I., & Kim, I. H. (2018). Effect of dietary Spirulina (Arthrospira) platensis on the growth performance, antioxidant enzyme activity, nutrient digestibility, cecal microflora, excreta noxious gas emission, and breast meat quality of broiler chickens. *Poultry Science*, *97*(7), 2451–2459. https://doi.org/10.3382/ps/pey093

Park, J. H., Upadhaya, S. D., & Kim, I. H. (2015). Effect of dietary marine microalgae (Schizochytrium) powder on egg production, blood lipid profiles, egg quality, and fatty acid composition of egg yolk in layers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *28*(3), 391–397. https://doi.org/10.5713/ajas.14.0463

Pestana, J. M., Puerta, B., Santos, H., Madeira, M. S., Alfaia, C. M., Lopes, P. A., et al. (2020). Impact of dietary incorporation of Spirulina (Arthrospira platensis) and exogenous enzymes on broiler performance, carcass traits, and meat quality. *Poultry Science*, *99*(5), 2519–2532. https://doi.org/ 10.1016/ j.psj.2019.11.069

Petracci, M., Bianchi, C., & Cavani, C. (2009). Development of rabbit meat products fortified with n-3 polyunsaturated fatty acids. *Nutrients*, *1*(2), 111–118. https://doi.org/ 10.3390/nu1020111

Petrolli, T. G., Petrolli, O. J., Pereira, A. S. C., Zotti, C. A., Romani, J., Villani, R., & Zanandréa, F. M. (2019). Effects of the dietary supplementation with a microalga extract on broiler performance and fatty-acid meat profile. *Brazilian Journal of Poultry Science*, *21*(3), 1–7. https://doi.org/10.1590/1806-9061-2018-0958

Póti, P., Pajor, F., Bodnár, Á., Penksza, K., & Köles, P. (2015). Effect of micro-alga supplementation on goat and cow milk fatty acid composition. *Jornal Chileno de Pesquisa Agrícola*, *75*(2), 259–263. https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000200017

Pourabedin, M., & Zhao, X. (2015). Prebiotics and gut microbiota in chickens. *FEMS Microbiology Letters*, *362*, 122.

Prieto, A., Pedro Cañavate, J., & García-González, M. (2011). Assessment of carotenoid production by Dunaliella salina in different culture systems and operation regimes. *Journal of Biotechnology*, *151*(2), 180–185. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.11.011

Pulz, O., & Gross, W. (2004). Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *65*(6), 635–648. https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x

Raja, R., & Hemaiswarya, S. (2010). Microalgae and immune potential. In R. R. Watson, S. Zibadi, & V. R. Preedy (Eds.), *Diet components and immune function* (pp. 515–527). Springer.

Rauytanapanit, M., Janchot, K., Kusolkumbot, P., Sirisattha, S., Waditee-Sirisattha, R., & Praneenararat, T. (2019). Nutrient deprivation-associated changes in green microalga Coelastrum sp. TISTR 9501RE enhanced potent antioxidant carotenoids. *Marine Drugs*, *17*.

Razzak, S. A., Hossain, M. M., Lucky, R. A., Bassi, A. S., & de Lasa, H. (2013). Integrated CO2 capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *27*, 622–653. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.063

Renju, G. L., Kurup, G. M., & Kumari, C. H. S. (2013). Anti-inflammatory activity of lycopene isolated from Chlorella marina on type II collagen induced arthritis in Sprague Dawley rats. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, *35*, 282–291.

Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry. (2021). *Towards the transformation of food systems in Türkiye: National roadmap final report*.

Ruiz, J., Olivieri, G., de Vree, J., Bosma, R., Willems, P., Reith, J. H., et al. (2016). Towards industrial products from microalgae. *Energy & Environmental Science*, *9*(10), 3036–3043. https://doi.org/10.1039/C6EE01493C

Saadaoui, I., Rasheed, R., Aguilar, A., Cherif, M., Al Jabri, H., Sayadi, S., & Manning, S. R. (2021). Microalgal-based feed: promising alternative feedstocks for livestock and poultry production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, *12*, 76. https://doi.org/10.1186/s40104-021-00593-z

Safafar, H., Van Wagenen, J., Møller, P., & Jacobsen, C. (2015). Carotenoids, phenolic compounds and tocopherols contribute to the antioxidative properties of some microalgae species grown on industrial wastewater. *Marine Drugs*, *13*(12), 7339–7356. https://doi.org/10.3390/md13127069

Šefcová, M. A., Santacruz, F., Larrea-Álvarez, C. M., Vinueza-Burgos, C., Ortega-Paredes, D., Molina-Cuasapaz, G., et al.

(2021). Administration of dietary microalgae ameliorates intestinal parameters, improves body weight, and reduces thawing loss of fillets in broiler chickens: a pilot study. *Animals*, *11*(12), 3601. https://doi.org/10.3390/ani11123601

Shah, M. M. R., Liang, Y., Cheng, J. J., & Daroch, M. (2016). Astaxanthin-producing green microalga Haematococcus pluvialis: from single cell to high value commercial products. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 531.

Shingfield, K. J., Ahvenjärvi, S., Toivonen, V., Vanhatalo, A., Huhtanen, P., & Griinari, J. M. (2008). Effect of incremental levels of sunflower-seed oil in the diet on ruminal lipid metabolism in lactating cows. *British Journal of Nutrition*, *99*(5), 971–983. https://doi.org/10.1017/S0007114507853323

Shivakumar, S., Serlini, N., Esteves, S., Miros, S., & Halim, R. (2024). Cell walls of lipid-rich microalgae: a comprehensive review on characterisation, ultrastructure, and enzymatic disruption. *Fermentation*, *10*(12), 608. https://doi.org/10.3390/fermentation10120608

Silva, G. G., de Jesus, E. F., Takiya, C. S., Del Valle, T. A., da Silva, T. H., Vendramini, T. H. A., & Rennó, F. P. (2016). Partial replacement of ground corn with algae meal in a dairy cow diet: Milk yield and composition, nutrient digestibility, and metabolic profile. *Journal of Dairy Science*, *99*(11), 8880–8884. https://doi.org/10.3168/jds.2016-11542

Slade, R., & Bauen, A. (2013). Micro-algae cultivation for biofuels: cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*, *53*, 29–38. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.019

Souza, C. M. M., de Lima, D. C., Bastos, T. S., Komarcheuski, A. S., de Oliveira, S. G., & Félix, A. P. (2020). The effect of supplementation of microalgae Schizochytrium sp. as a source of docosahexaenoic acid (DHA) on dogs with naturally occurring gingivitis. *Archives of Veterinary Science*, *25*(1), 80–86. https://doi.org/10.5380/avs.v25i1.62680

Spínola, M. P., Costa, M. M., Tavares, B., Pestana, J. M., Tavares, J. C., Martins, C. F., et al. (2024). Impact of long-term feeding a high level of Spirulina combined with enzymes on growth performance, carcass traits and meat quality in broiler chickens. *Frontiers in Veterinary Science*, *11*, 1451516. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1451516

Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *101*(2), 87–96. https://doi.org/10.1263/jbb.101.87

Stahl, W., & Sies, H. (2005). Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Basis of Disease*, *1740*, 101–107.

Stamey, J. A., Shepherd, D. M., de Veth, M. J., & Corl, B. A. (2012). Use of algae or algal oil rich in n-3 fatty acids as a feed supplement for dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, *95*(9), 5269–5275. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5412

Svircev, Z. (2005). *Microalgae and cyanobacteria in biotechnology*. Faculty of Sciences.

Takaichi, S. (2013). Distributions, biosyntheses and functions of carotenoids in algae. *Agro Food Industry Hi Tech*, *24*, 1.

Tassinari, M., Mordenti, A. L., Testi, S., & Zotti, A. (2002). Experiences on the possibility of enriching rabbit meat with dietary n-3 LCPUFAs. *Progress in Nutrition*, *4*(2), 119–124.

Tavernari, F., Roza, L. F., Surek, D., Sordi, C., Da, S., Albino, L., et al. (2018). Apparent metabolisable energy and amino acid digestibility of microalgae Spirulina platensis as an ingredient in broiler chicken diets. *British Poultry Science*, *59*, 562–567.

Tibbetts, S. M., Milley, J. E., & Lall, S. P. (2015). Chemical composition and nutritional properties of freshwater and marine microalgal biomass cultured in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, *27*(3), 1109–1119. https://doi.org/10.1007/s10811-014-0428-x

Toral, P. G., Belenguer, A., Shingfield, K. J., Hervás, G., Toivonen, V., & Frutos, P. (2012). Fatty acid composition and bacterial community changes in the rumen fluid of lactating sheep fed sunflower oil plus incremental levels of marine algae. *Journal of Dairy Science*, *95*(2), 794–806. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4561

Toyomizu, M., Sato, K., Taroda, H., Kato, T., & Akiba, Y. (2001). Effects of dietary Spirulina on meat colour in muscle of broiler chickens. *British Poultry Science*, *42*(2), 197–202. https://doi.org/10.1080/00071660120048447

Tsiplakou, E., Abdullah, M. A. M., Mavrommatis, A., Chatzikonstantinou, M., Skliros, D., Sotirakoglou, K., & Zervas, G. (2018). The effect of dietary Chlorella vulgaris inclusion on goats milk chemical composition, fatty acids profile and enzymes activities related to oxidation. *Journal of Animal Physiology and*

Animal Nutrition, *102*(1), 142–150. https://doi.org/10.1111/jpn.12671

Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, *99*(10), 4021–4028. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046

Vázquez-Romero, B., Perales, J. A., Pereira, H., Barbosa, M. J., & Ruiz, J. (2022). Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture. *Science of the Total Environment*, *837*, 155742. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155742

Wachira, A. M., Sinclair, L. A., Wilkinson, R. G., Enser, M., Wood, J. D., & Fisher, A. V. (2002). Effects of dietary fat source and breed on the carcass composition, n −3 polyunsaturated fatty acid and conjugated linoleic acid content of sheep meat and adipose tissue. *British Journal of Nutrition*, *88*(6), 697–709. https://doi.org/10.1079/BJN2002727

Wallace, F. A., Miles, E. A., & Calder, P. C. (2003). Comparison of the effects of linseed oil and different doses of fish oil on mononuclear cell function in healthy human subjects. *British Journal of Nutrition*, *89*(5), 679–689. https://doi.org/10.1079/BJN2002821

Wang, Z., Liang, Y., Lu, J., Wei, Z., Bao, Y., Yao, X., et al. (2023). Dietary spirulina supplementation modifies rumen development, fermentation and bacteria composition in Hu sheep when consuming high-fat dietary. *Frontiers in Veterinary Science*, *10*, 1001621. https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1001621

Withana, W., Eranga, K., Sivapalan, K., et al. (2025). Microalgae toxins in food products and impact on human health. *Frontiers in Nutrition*, *12*, 1603843. https://doi.org/ 10.3389/fnut. 2025.1603843

Woods, V. B., & Fearon, A. M. (2009). Dietary sources of unsaturated fatty acids for animals and their transfer into meat, milk and eggs: a review. *Livestock Science*, *126*(1–3), 1–20. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.07.002

Wu, Y. B., Li, L., Wen, Z. G., Yan, H. J., Yang, P. L., Tang, J., et al. (2019). Dual functions of eicosapentaenoic acid-rich microalgae: enrichment of yolk with n-3 polyunsaturated fatty acids and partial replacement for soybean meal in diet of laying hens. *Poultry Science*, *98*(1), 350–357. https://doi.org/10.3382/ps/pey37


BİDGE