

Ruminant Hayvanların Beslenmesinde Yenilikçi Stratejiler

Editör
İSMAİL ÜLGER



BİDGE Yayınları

Ruminant Hayvanların Beslenmesinde Yenilikçi Stratejiler

Editör: İSMAİL ÜLGER

ISBN: 978-625-8673-04-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

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



ÖNSÖZ

Hayvan besleme bilimi, hayvansal üretimin niceliksel ve niteliksel başarısını belirleyen temel disiplinlerden biri olup; hayvanların fizyolojik gereksinimlerinin karşılanması, üretim performansının optimize edilmesi, ürün kalitesinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması gibi çok boyutlu hedefleri bünyesinde barındırmaktadır. Günümüzde artan dünya nüfusu, gıda güvenliği gereksinimleri ve sürdürülebilir tarım yaklaşımları, hayvan beslemenin bilimsel temellere dayalı olarak yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Hayvan besleme, yalnızca rasyon formülasyonu ve yem maddelerinin değerlendirilmesi ile sınırlı olmayıp; sindirim fizyolojisi, metabolizma, mikrobiyal ekosistemler, biyokimyasal süreçler ve besin–gen etkileşimlerini kapsayan disiplinler arası bir bilim alanıdır. Özellikle ruminant beslemede rumen mikrobiyotasının dinamik yapısı, besin maddelerinin etkin kullanımını ve çevresel çıktıları doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda modern hayvan besleme yaklaşımları; performans artışının yanı sıra hayvan sağlığı, refah ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte ele alan bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır.

Bilimsel bilginin üretimi ve paylaşımının süreklilik gerektiren kolektif bir süreç olduğu bilinciyle hazırlanan bu eserin; hayvan besleme alanında yürütülen akademik çalışmalara, eğitim faaliyetlerine ve saha uygulamalarına katkı sağlaması temennisiyle, emeği geçen tüm araştırmacılara teşekkür eder, kitabın bilim dünyasına ve uygulayıcılara yararlı olmasını dileriz.

Prof. Dr. İSMAİL ÜLGER

ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

SİĞİR YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KOLOSTRUMUN ÖNEMİ	1
--	---

Murat TURAN, İRFAN İNAN

HAYVAN BESLEMEDE YAPAY ZEKA ENTEGRASYONUNUN ÖNEMİ	19
--	----

MEHMET SALİH KAÇMAZ, İRFAN İNAN, MURAT TURAN

RUMİNANT BESLEMEDE KÜRESEL ISINMA VE METAN EMİSYONLARININ ROLÜ: KAPSAMLI BİR DEĞERLENDİRME	37
--	----

BİLAL SELÇUK

RUMİNANT BESLEMEDE İN VİTRO YEM DEĞERLENDİRME SİSTEMLERİ: METODOLOJİK DERİNLİK, BİYOKİMYASAL TEMELLER VE UYGULAMALI STRATEJİLER	56
--	----

BİLAL SELÇUK

SÜT SİĞİRLARINDA MİKOTOKSİN MADDELER	75
--	----

İSMAİL ÜLGER, HÜSEYİN MERT YÜKSEL

BÖLÜM 1

SIĞIR YETİŞTİRİCİLİĞİNDE KOLOSTRUMUN ÖNEMİ

1. MURAT TURAN¹

2. İRFAN İNAN²

Giriş

Kolostrum, memeli dişilerin doğumun hemen ardından ilk birkaç gün içerisinde salgıladığı ilk süttür ve bileşimi normal süttten farklıdır (El-Loly, 2022). Kolostrum, yeni doğan buzağının beslenme ve enerji gereksinimlerini karşılamak için gerekli makro ve mikro besinler, çeşitli fizyolojik süreçlerde rol oynayan biyolojik olarak aktif bileşenler ve buzağının bağışıklık sistemi ile bağırsak mikrobiyomunu düzenleyen hücreler ve mikroorganizmalar içerir (Silva ve ark., 2024). Kolostrum, yeni doğan buzağılarda pasif bağışıklık sağlamak açısından kritik bir rol oynar ve kolostrumun immünolojik etkinliği, onu üreten sığırın

¹ Arş. Gör. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Orcid: 0000-0001-9286-3046

² Doktora Öğrencisi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Orcid: 0009-0007-0084-1394

sağlık durumu ile yakından ilişkilidir (Sanioglu Golen, 2025). Pasif bağışıklığın aktarımı, yeni doğan buzağlarda güçlü bir bağışıklık sisteminin oluşması açısından kritik öneme sahiptir. (Fernandez-Novo ve ark., 2025).

Kolostrum, yeni doğan süt inek buzağları için hayati öneme sahiptir ve erken bağışıklığı destekleyen antikorları sağlar. Buzağların ishalden toparlanmasına yardımcı olma ve süttten kesim döneminde büyümeyi destekleme potansiyeline sahiptir. Kolostrumun benzersiz makrobesin ve biyolojik aktif bileşimi, özellikle yeni doğan buzağının gelişimsel ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır (Renaud & Steele, 2025). Doğumdan sonraki ilk 12 saat içinde dört litre kaliteli kolostrum verilmesi uzun süredir bir gereklilik olarak kabul edilmektedir; ilk öğünün ise mümkün olan en kısa sürede sağlanması önerilmektedir (Weary & von Keyserlingk, 2025).

Resim 1. Kolostrum ve kolostrum ölçer (Dansimetre).



(Anonim, 2025)

Kolostrum, besleyici ve besleyici olmayan bileşenler açısından zengin bir kaynaktır ve yeni doğan buzağılara pasif bağışıklığın aktarımı için hayati öneme sahiptir. Kolostrum verimi ve bileşimi bireysel ve mevsimsel olarak değişkenlik gösterdiğinden, ticari süt üreticileri için yıl boyunca yüksek kaliteli kolostrum teminini sürdürmek hâlâ bir zorluktur (Westhoff ve ark., 2024).

Sığır kolostrumu, büyüme faktörleri, oligosakkaritler, B grubu vitaminleri ve immünoglobulinler (IgG, SIgA, IgM, IgA, IgD ve IgE) içermektedir. Anti-inflamatuvar ve antioksidan özellikleri nedeniyle sığır kolostrumunda bulunan laktoferrin ve laktalbümin, kanser tedavisinde de özellikle önemlidir (Alnadari ve ark., 2025). Kolostrum, immünoglobülinler (Ig), büyüme hormonları, mikro RNA (miRNA), sitokinler, antimikrobiyal peptitler, oligosakkaritler ve maternal immün hücreler gibi çok çeşitli büyüme faktörleri ve biyolojik aktif moleküller içerir; bunlar bağırsak ve bağışıklık gelişimi üzerinde temel bir etki gösterir (Rostoll-Cangiano ve ark., 2025). Ayrıca yüksek kaliteli kolostrum, antimikrobiyal ve antiproteaz aktivitelerinde artışa yol açarak, buzağının bağırsaklarına emilmeden önce kolostrumun koruyucu özelliklerinin arttığını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda yüksek kolostrum IgG seviyelerinin beta ve alfa kazein ile oksidatif stresle ilişkili proteinleri azalttığını ortaya koymuştur (Castillo-Lopez ve ark., 2025). Yüksek kaliteli kolostrum için genel kriterler, IgG

konsantrasyonunun 50 g/L veya daha yüksek olması ve toplam bakteri sayısının 100.000 CFU/mL'den az olmasıdır (Kayasaki ve ark., 2025). Kolostrumun besin ve biyolojik aktif bileşimi, yeni doğan buzağların gelişimsel ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde benzersizdir. Normal süte kıyasla, kolostrum daha yüksek protein, yağ, vitamin ve mineral konsantrasyonlarına sahiptir ve ayrıca erken yaşamda temel etkiler gösteren çok sayıda büyüme faktörü ve biyolojik aktif molekül içerir (Rostoll-Cangiano ve ark., 2025).

Sıgır Yetiştiriciliğinde Kolostrumun Buzağı Gelişimine Genel Etkileri

Kolostrum, yenidoğan süt buzağılarda erken bağışıklığı destekleyen antikorları sağladığı için hayati öneme sahiptir. İlk beslemelerin ötesinde, kolostrum veya geçiş sütü takviyesinin uzatılması, buzağı sağlığı ve büyümesi üzerinde ek faydalar sunabilir. Araştırmalar, bu uygulamanın bağırsak gelişimini iyileştirebileceğini, ishal gibi hastalıkları azaltabileceğini ve kilo alımını destekleyebileceğini göstermektedir (Renaud & Steele, 2025).

Yenidoğan buzağlar için yaşamın erken evrelerinde bağışıklık desteği sağlayan memeli kolostrumu, besinsel makrobesinler (proteinler, yağlar, karbonhidratlar) ve mikro besinler (vitaminler, mineraller, antioksidanlar) açısından zengin benzersiz bileşenler ile antimikrobiyal faktörler (immünoglobulinler, laktoferrin, laktoperoksidaz, lizozim,

sitokinler) ve büyüme faktörleri gibi birçok biyolojik olarak aktif madde içerir (El-Loly, 2022).

Pasif bağışıklığın transferi, yenidoğan buzağılarda güçlü bir bağışıklık sisteminin oluşması açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel bilimsel yaklaşımlar genellikle pasif bağışıklık transferinin yetersiz olmasına neden olan risk faktörlerini ele alırken, mükemmel bir pasif bağışıklık transferinin sağladığı faydalar da iyi bilinmektedir. (Fernandez-Novo ve ark., 2025). Kolostrum metabolomu, yeni doğan memelinin büyüme ve gelişimi için faydalı olan dallı zincirli amino asitler ve kolin gibi birçok besin bileşeni içermektedir. Doğum sonrası günlerde, bu yararlı besin maddelerinin seviyeleri azalırken, süt bileşimi normal süte dönüşmekte ve laktoz içeriğinde belirgin bir artış görülmektedir (O'Callaghan ve ark., 2021).

Kolostrum, yenidoğan süt buzağılarda erken bağışıklığı destekleyen antikorları sağladığı için hayati öneme sahiptir. İlk beslemelerin ötesinde, kolostrum veya geçiş sütü takviyesinin uzatılması, buzağı sağlığı ve büyümesi üzerinde ek faydalar sunabilir. Araştırmalar, bu uygulamanın bağırsak gelişimini iyileştirebileceğini, ishal gibi hastalıkları azaltabileceğini ve kilo alımını destekleyebileceğini göstermektedir. Kolostrum ayrıca, buzağılarda ishalden iyileşmesine yardımcı olma ve süttan kesim döneminde büyümeyi destekleme potansiyeline sahiptir (Renaud & Steele, 2025).

Kolostrum kalitesi, toplama ve depolama koşullarının temizliğiyle belirlenen mikrobiyal yük dahil olmak üzere birden fazla faktörden etkilenmektedir. Ayrıca, annenin beslenme durumu ve bağışıklık sistemi, immünoglobulin G (IgG) konsantrasyonlarını etkileyerek kolostrum kalitesinin şekillenmesinde kritik bir rol oynar. Düşük kaliteli kolostrumun buzağı sağlığı ve büyümesi üzerinde olumsuz etkiler yarattığı, buna karşın iyi kaliteli kolostrumun daha iyi sonuçlar sağladığı iyi bilinmektedir (Flynn ve ark., 2025).

Doğum öncesi dönemde sağlanan metabolize olabilir enerji ve protein miktarının yanı sıra vitamin, mineral ve yem katkı maddelerinin dahil edilmesi ve kaynağı üzerine yapılan araştırmalar, prepartum beslenmenin kolostrum verimini, kalitesini ve bileşimini etkilediğini göstermektedir. Kolostrum verimi ve bileşimi bireysel, sürü düzeyinde ve mevsimsel değişkenlik göstermektedir (Westhoff ve ark., 2024). Bu bulgular, kolostrum üretiminde daha uzun kuru dönemlerin ve doğum aralıklarının faydalarını, yüksek verimli süt inekleri için kuruya çıkış uygulamalarının gözden geçirilmesi gerekliliğini ve özellikle yakınlaştırma bölmelerinde doluluk oranındaki yüksek varyasyonla ilişkili sıcak stresli sürülerde aşırı nüfus yönetiminin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, yüksek doğum sayısına sahip ineklerde kolostrumun katı madde içeriğinin artırılması için doğum ile kolostrum toplama arasındaki sürenin kısaltılmasının önemini pekiştirmektedir (Pereira & Bexiga, 2025).

Sıgır Kolostrumu ve Normal Sütün Besin, Vitamin ve Biyoaktif Bileşen İçeriklerinin Karşılaştırması

Kolostrumun besin ve biyolojik aktif bileşimi, yenidoğan buzağların gelişimsel ihtiyaçlarını karşılamak üzere benzersiz şekilde özelleştirilmiştir. Olgun süte kıyasla, kolostrum daha yüksek konsantrasyonlarda protein, yağ, vitamin ve mineral içerir; ayrıca, ekstrauterin yaşama adaptasyonda temel bir etki gösteren çeşitli büyüme faktörleri ve biyolojik aktif moleküller barındırır. Bu kolostrum biyolojik aktif bileşenlerinin buzağı sağlığı üzerindeki toplu etkisinin daha derinlemesine anlaşılması, kolostrum yönetiminin iyileştirilmesine katkı sağlayacak ve bu kritik gelişim döneminde buzağlara destek olacak daha rafine beslenme ve bakım stratejilerinin geliştirilmesinin önünü açacaktır (Rostoll-Cangiano ve ark., 2025).

Tablo 1. Sıgır kolostrumu ve normal sütte bulunan seçilmiş makro ve mikro besinler, vitaminler, immünoglobulin değerleri (Kehoe ve ark., 2007; Stelwagen ve ark., 2009; Pereira, 2014; Godden ve ark., 2019; Playford & Weiser, 2021).

Bileşen	Kolostrum	Normal Süt
Toplam kuru madde (%)	24–28	12,9
Yağ (%)	6–7	3,6–4,0
Protein (%)	14–16	3,1–3,2
Kazein (%)	4,8	2,5–2,6
Albümin (%)	6,0	0,4–0,5
Toplam	42–90	0,4–0,9

immünoglobulin (mg/mL)		
Laktoz (%)	2–3	4,7–5,0
Mineral	Kolostrum	Normal Süt
Kalsiyum (g/kg)	2,6–4,7	1,2–1,3
Fosfor (g/kg)	4,5	0,9–1,2
Potasyum (g/kg)	1,4–2,8	1,5–1,7
Sodyum (g/kg)	0,7–1,1	0,4
Magnezyum (g/kg)	0,4–0,7	0,1
Çinko (mg/kg)	11,6–38,1	3,0–6,0
Vitamin	Kolostrum	Normal Süt
Tiamin (B1) (µg/mL)	0,58–0,90	0,4–0,5
Riboflavin (B2) (µg/mL)	4,55–4,83	1,5–1,7
Niasin (B3) (µg/mL)	0,34–0,96	0,8–0,9
Kobalamin (B12) (µg/mL)	0,05–0,60	0,004–0,006
Vitamin A (µg/100 mL)	25	34
Vitamin D (IU/g yağ)	0,89–1,81	0,41
Tokoferol (E) (µg/g)	2,92–5,63	0,06
İmmünoglobulinler	Kolostrum	Normal Süt
IgG1 (g/L)	34,0–87,0	0,31–0,40
IgG2 (g/L)	1,6–6,0	0,03–0,08
IgA (g/L)	3,2–6,2	0,04–0,06
IgM (g/L)	3,7–6,1	0,03–0,06

Tablo 1’de sığır kolostrumu ile normal sütün besin öğeleri değerleri verilmiştir. Kolostrumun toplam kuru madde, protein ve özellikle immünoglobulin içeriği normal süte kıyasla çok daha yüksektir. Bu durum, kolostrumun yeni doğan buzağı için yalnızca bir besin kaynağı değil, aynı zamanda pasif bağışıklığın

kazanılmasında önemli bir besin maddesi olduğunu ortaya koymaktadır. Protein değerlerinde, kolostrumda kazein ve albümin oranlarının yüksek olduğu, buna karşın normal sütte laktoz oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu farklılık, kolostrumun sindirim fizyolojisi ve bağışıklık sistemi gelişimi üzerindeki temel rolünü ifade eder. Mineral içerik bakımından da kolostrumun kalsiyum, fosfor, magnezyum ve çinko açısından daha zengin olduğu, bu minerallerin kemik gelişimi, enzim aktivitesi ve bağışıklık fonksiyonları açısından önemli olduğu bilinmektedir. İmmünoglobulin sınıfları (IgG1, IgG2, IgA ve IgM) açısından ise kolostrum ile normal süt arasındaki fark çok belirgindir; kolostrumdaki yüksek IgG1 düzeyi, buzağların yaşamın ilk döneminde enfeksiyonlara karşı korunmasında açısından önemlidir.

Literatürde Süt Sığırı Yetiştiriciliğinde Kolostruma İlişkin Çalışmalar

Mann ve ark., (2025), Holstein ineklerinde yaptıkları çalışmada ilk sağımda kolostrum örnekleri (n = 640), Holstein ineklerinden doğumdan sonraki 18 saate kadar toplanmıştır. Kolostrum örnekleri alınmış ve örnekler immünoglobülin G (IgG) konsantrasyonu ile kuru madde (DM) açısından analiz edilmiştir. Her örnek için toplam IgG verimi, kolostrum verimi ve IgG konsantrasyonundan hesaplanmıştır. Doğumdan sağım arasındaki süre 9 saati aştığında, kolostrumdaki IgG konsantrasyonu ve

DM’de azalma gözlenmiştir. Toplam IgG verimi zamanla değişmemiştir. Yüksek kaliteli kolostrum uygun şekilde saklandığında, yeni doğan buzağıya doğumdan hemen sonra verilebilir ve kolostrumun ilk sağıımı IgG konsantrasyonunda anlamlı bir azalma olmadan 9 saate kadar geciktirilebilir. 9 saati aşan gecikmelerde ise bir sulandırma etkisi gözlenmiştir.

Fernandez-Novo ve ark., (2025), yapılan çalışmada buzağılarda pasif bağışıklığı incelemiştir. Çalışmanın amacı, pasif bağışıklık aktarımını (TPI) belirleyen faktörleri tespit etmektir. Nisan–Temmuz 2022 arasında, altı ülkeden 108 Avrupa çiftliğine ait 1.041 buzağı incelenmiş, kolostrum kalitesi ve buzağılarda pasif bağışıklık düzeyi refraktometri ile dolaylı olarak ölçülmüştür. Kolostrum yönetimi, anaç, buzağı ve çiftlik koşullarına ait veriler kaydedilmiştir. TPI için “düşük”, “orta” ve “mükemmel” kategorileri oluşturulmuştur. Hayvan düzeyinde, ülke ve sürü rastgele faktör olarak alınarak karma etkili multinominal regresyon modeli uygulanmıştır. Kolostrum değişkenlerinin medyan değerleri, 3 litre hacim, %24,4 Brix kalitesi ve doğum sonrası uygulama süresi 2 saat olarak bulunmuştur. Sadece bir ülkede, buzağılarda %40’ından fazlası mükemmel kategoriye girmiştir. Mükemmel TPI’yi etkileyen başlıca faktörlerin ise uygulanan kolostrumun hacmi ve kalitesi olarak belirlenmiştir.

Sanioglu Golen, (2025), yapılan çalışmada 20 sağlıklı inek ve 20 subklinik mastitisli inek ile onların yeni doğan

buzağlarından kolostrum ve serum örnekleri toplanmış, mastitis patojenlerini belirlemek için Haptoglobin (Hp), serum amiloid (SAA) ve toplam immünoglobulin (Ig) konsantrasyonları ELISA kitleri ile ölçülmüştür. Çalışmada kolostrum ve buzağı serumundaki biyobelirteç seviyeleri arasındaki korelasyonlar analiz edilmiştir. Buzağılar, doğumun ilk haftasında ishallik durumları açısından izlenmiş ve ishalleri buzağılardan alınan dışkı örnekleri yaygın enterik patojenler için test edilmiştir. Subklinik mastitis grubundaki tüm ineklerde en az bir mastitis patojeni bulunurken, subklinik mastitisli ineklerin kolostrumunda, sağlıklı ineklere kıyasla Hp ve SAA seviyeleri anlamlı şekilde yüksek, Ig konsantrasyonu ise düşük bulunmuştur ($p < 0,05$). Subklinik mastitis grubunun buzağılarında da serum Hp ve SAA seviyeleri yüksek, serum Ig seviyeleri ise düşük bulunmuştur ($p < 0,05$). Kolostrum ve buzağı serumundaki Hp ve SAA konsantrasyonları arasında pozitif korelasyonlar bulunurken, kolostrum Ig, her iki biyobelirteçle de negatif korelasyon göstermiştir. Bu bulgular, subklinik mastitisin kolostrum kalitesini ve buzağının erken dönem bağışıklığını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Flynn ve ark., (2025) yapılan çalışmada yeterli kaliteye sahip kolostrum ile yüksek kaliteli kolostrumun sütçü dişi buzağının büyüme, sağlık durumu ve dışkı mikrobiyomunun ilk 15 haftadaki gelişimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Ayrıca her iki grupta da IgG'nin görünür emilim etkinliği düzeyleri

ölçülmüştür. Yüksek IgG içeriğine sahip kolostrumla beslenen buzağılar, yeterli kaliteye sahip kolostrumla beslenenlere kıyasla daha yüksek pasif bağışıklık aktarım oranları göstermiştir. Her iki grupta da pasif bağışıklık aktarım oranları >23 mg/mL IgG olmuştur. Sağlık sonuçları iki grup arasında benzer bulunmuş, sütten kesim öncesi ortalama günlük canlı ağırlık artışı da benzer şekilde ortalama 0,62 kg/gün olmuştur. Dışkı mikrobiyomundaki alfa ve beta çeşitliliği ölçütleri her iki grupta benzer gelişim göstermiştir. Görünür IgG emilim etkinliği, yüksek kaliteli kolostrumla beslenen buzağılarda (%24,9), yeterli kaliteli kolostrumla beslenenlere kıyasla (%29,3) daha düşük bulunmuştur. Çalışmada daha yüksek kaliteli kolostrumla beslenmenin büyüme, sağlık veya mikrobiyom çeşitliliğinde önemli iyileşmelere yol açmadığı gösterilmiş olsa da yeterli kalitede kolostrumun en iyi uygulama yönetimiyle birleştirildiğinde aynı derecede etkili olabileceği ortaya konmuştur.

Kayasaki ve ark., (2025) yapılan çalışmada Japonya'nın doğu Hokkaido bölgesindeki süt çiftliklerinde kolostrumun IgG konsantrasyonlarını, bakteri kontaminasyonunu ve besin bileşenlerini araştırarak yüksek kaliteli kolostrum elde edilmesini etkileyen faktörleri incelemiştir. Çalışmada 266 Holstein inekten kolostrum örnekleri toplanmıştır. IgG kriterlerini karşılayan örneklerin oranı düşük (%48,9) iken, toplam bakteri sayısı kriterini karşılayan örneklerin oranı yüksektir (%86,5). Kolostrum Brix

değeri, kolostrum IgG konsantrasyonu ile anlamlı bir şekilde ilişkili olduğu tespit edilirken çalışmada IgG konsantrasyonu ile protein dışındaki süt bileşenleri arasında bir ilişki bulunmamıştır. Kolostrum sağım koşullarında ise, yüksek IgG içerikli kolostrum için doğumdan sağım zamanına kadar geçen sürenin düşük IgG içerikli kolostruma göre daha kısa olma eğiliminde olduğu gözlenmiştir ($p < 0,01$). Yüksek IgG içerikli kolostrum elde etme olasılığı, birinci doğumda 1,28 kat artarken, sağım hacminin 1 L artması ile 0,92 kat azalmaktadır ($p < 0,01$). Çalışmada sonuç olarak, kolostrum IgG düzeyinin Brix refraktometre ile tahmin edilebileceği ve yüksek kaliteli kolostrum elde etmek için ineklerin laktasyon sırası, sağım miktarı ve doğumdan sonra sağım zamanının dikkate alınması gerektiği ortaya konmuştur.

Bulgular, doğumdan sağımına kadar geçen sürenin uzamasının kolostrumdaki IgG konsantrasyonunu azalttığını, ancak toplam IgG veriminin büyük ölçüde değişmediğini göstermektedir. Ayrıca, kolostrum hacmi, IgG yoğunluğu ve uygulama zamanı pasif bağışıklık aktarımının en belirleyici unsurları olarak öne çıkmaktadır. Subklinik mastitisin, kolostrumun bağışıklık kalitesini olumsuz etkileyerek Ig düzeylerini düşürdüğü ve bu durumun buzağının erken dönem bağışıklık durumuna yansıdığı bildirilmektedir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli kolostrumun, yeterli kaliteli kolostruma kıyasla buzağının büyüme, sağlık ve bağırsak mikrobiyomu gelişimi üzerinde ek bir avantaj

sağlamadığı, uygun kolostrum yönetimi ile yeterli kalitenin benzer sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Genel olarak bu çalışmalar, kolostrum kalitesinin pratik olarak Brix ölçümüyle değerlendirilebileceğini ve yüksek kaliteli kolostrum elde edilmesi ile etkin pasif bağışıklık aktarımı için sağım zamanı, kolostrum hacmi, laktasyon sırası ve anaç sağlığının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç

Sığır kolostrumu yenidoğan buzağılarda hem beslenme, bağışıklık gelişim açısından hem de buzağının hastalıklara karşı sağlık koruma garantisi sağlamaktadır. Kolostrumun doğru zamanda verilmesi ve uygun saklama koşullarına göre korunması buzağılarda hastalıkların önlenmesi ve büyüme performansının direncinin artırılması açısından önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalarda erken ve yeterli miktarda yüksek kaliteli kolostrumun buzağılara verilmesinin; ishal riskini azaltabileceğini ve bağışıklık sistemini güçlendirebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, süt sığırcılığı açısından stratejik öneme sahip olan kolostrum, buzağıya yalnızca pasif bağışıklık sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda buzağının büyüme ve vücut gelişiminin desteklenmesi açısından da son derece önemlidir.

Kaynakça

Anonim. (2025). Five Colstrum Storage Tips. Dairy Herd Managemenet Erişim Tarihi: 17.12.2025
<https://www.dairyherd.com/news/dairy-production/five-colostrum-storage-tips>

Alnadari, F., Ibeogu, I. H., Shoura, H. E., Wang, R., Yar, M. S., Chen, C., & Nasiru, M. M. (2025). *Immunomodulatory potential of bovine colostrum: A holistic perspective on health, disease resistance, and aging. Animal Advances*, 2, e003.
<https://doi.org/10.48130/animadv-0025-0001>

Castillo-Lopez, E., Biber, P., Sener-Aydemir, A., Hummel, K., Razzazi-Fazeli, E., Reisinger, N., Zebeli, Q., Kreuzer-Redmer, S., & Hartinger, T. (2025). Characterization of the colostrum proteome of primiparous Holstein cows and its association with colostrum immunoglobulin G concentrations. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 16, 10.
<https://doi.org/10.1186/s40104-024-01144-y>

El-Loly, M. M. (2022). Colostrum ingredients, its nutritional and health benefits- An overview. *Clinical Nutrition Open Science*, 44(1), 126–143.
<https://doi.org/10.1016/j.nutos.2022.07.001>

Fernandez-Novio, A., Kolkman, I., Driesse, M., Yarnall, M., Cerviño, M., Dieguez, F. J., & Astiz, S. (2025). Factors associated with an excellent transfer of passive immunity: Multisite, cross-sectional study conducted in different European countries on dairy cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1515196. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.151519>

Flynn, A., Leech, J., McFadden, M., McAloon, C., Murphy, J. P., Crispie, F., Cotter, P. D., McAloon, C., & Kennedy, E.

(2025). *The effects of offering adequate-quality or high-quality colostrum on the passive immunity, health, growth, and fecal microbiome development of dairy heifer calves*. *Journal of Dairy Science*, 108(9), 6254–6272.
<https://doi.org/10.3168/jds.2024-26165>

Godden, S. M., Lombard, J. E., & Woolums, A. R. (2019). Colostrum management for dairy calves. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(3), 535–556.
<https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2019.05.004>

Kayasaki, S., Satoh, H., Oguchi, K., Chisato, K., Fukumori, R., & Oikawa, S. (2025). Evaluation of colostrum components and milking status affecting colostrum IgG concentration. *Animals*, 15, 718. <https://doi.org/10.3390/ani15050718>

Kehoe, S. I., Jayarao, B. M., & Heinrichs, A. J. (2007). A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 90(9), 4108–4116.
<https://doi.org/10.3168/jds.2006-783>

Mann, S., Spellman, M., Frederick, G., Bruckmaier, R., Somula, H., & Wieland, M. (2025). Lag time from calving to first colostrum harvest in Holstein dairy cows: Association with colostral immunoglobulin G, volume, and dry matter. *JDS Communications*, 6, 683–687.
<https://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0770>

O'Callaghan, T. F., O'Donovan, M., Murphy, J. P., Sugrue, K., Tobin, J. T., McNamara, A. E., Yin, X., Sundaramoorthy, G., & Brennan, L. (2021). *The bovine colostrum and milk metabolome at the onset of lactation as determined by 1H-NMR*. *International Dairy Journal*, 113, 104881.
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104881>

Pereira, G., & Bexiga, R. (2025). A retrospective cohort study investigating the association of environment, milk performance and udder health with the yield and solid content of first-milking colostrum in Holstein dairy cows. *BMC Veterinary Research*, 21, 456. <https://doi.org/10.1186/s12917-025-04909-3>

Pereira, P. C. (2014). Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*, 30(6), 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.10.010>

Playford, R. J., & Weiser, M. J. (2021). *Bovine colostrum: Its constituents and uses*. *Nutrients*, 13(1), 265. <https://doi.org/10.3390/nu13010265>

Renaud, D. L., & Steele, M. A. (2025). What can't colostrum do? Exploring the effects of supplementing colostrum after the first day of life: A narrative review. *JDS Communications*, 6, 469–473. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2024-0708>

Rostoll-Cangiano, L., Cid de la Paz, M., & Pierre, J. F. (2025). Beyond immunoglobulin G: Dissecting the role of colostrum in programming early immune function in calves. *JDS Communications*, 6, 474–478. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2024-0733>

Sanioglu Golen, G. (2025). Association between subclinical mastitis pathogens and passive transfer of immunity in calves. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1664685. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1664685>

Silva, F. G., Silva, S. R., Pereira, A. M. F., & Cerqueira, J. L. (2024). A comprehensive review of bovine colostrum components and selected aspects regarding their impact on

neonatal calf physiology. *Animals*, 14, 1130.
<https://doi.org/10.3390/ani14071130>

Stelwagen, K., Carpenter, E., Haigh, B., Hodgkinson, A., & Wheeler, T. T. (2009). Immune components of bovine colostrum and milk. *Journal of Animal Science*, 87(Suppl_13), 3–9. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>

Weary, D., & von Keyserlingk, M. N. (2025, April). *Feeding milk and colostrum to dairy calves: How Canadian dairy research supports the Code of Practice* [Technical sheet]. University of British Columbia.

Westhoff, T. A., Borchardt, S., & Mann, S. (2024). *Invited review: Nutritional and management factors that influence colostrum production and composition in dairy cows*. *Journal of Dairy Science*, 107(5), 4109–4128.
<https://doi.org/10.3168/jds.2023-24349>

BÖLÜM 2

HAYVAN BESLEMEDE YAPAY ZEKA ENTEGRASYONUNUN ÖNEMİ

MEHMET SALİH KAÇMAZ¹
İRFAN İNAN²
MURAT TURAN³

Giriş

Küresel hayvansal üretim sistemi, artan küresel nüfus ile birlikte sürdürülebilir kalkınma açısından yem kaynaklarının yetersizliği ve çevresel baskılar gibi önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Hayvancılık sektörüne insan beslenmesi için önemli talepler yüklemiş, hayvan verimliliğinin artırılmasını ve hayvan yemi üretiminde doğal kaynak kullanımının çoğalmasını gerektirmiştir.

¹Araştırma Görevlisi Doktor, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı, Van, Türkiye, Orcid: 0000-0003-3419-7342

²Yüksek Ziraat Mühendisi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Hayvan Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı, Van, Türkiye, Orcid: 0009-0007-0084-1394

³Araştırma Görevlisi Doktor, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Hayvan Yetiştirme ve Islahı Anabilim Dalı, Van, Türkiye, Orcid: 0000-0001-9286-3046

Hayvancılık sektörü hem artan gıda taleplerine uyum sağlamak hem de verimliliği hızlı bir şekilde akıllı tarım sistemlerine doğru daha etkin bir şekilde artırmak zorundadır (Akintan & ark., 2024; Arulmozhi & ark., 2024; Himu & Raihan, 2024; Zhang & ark., 2025). Hassas Hayvancılıkta Dijital Tarım Teknolojisi Çözümleri, sürdürülebilir, verimli ve üretken hayvancılık sistemlerinin geliştirilmesine; Yapay Zeka entegrasyonu ile hayvancılık yönetiminin iyileştirilmesine, hayvan sağlığı ve refahının artırılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Üretim verimliliğinin sürdürülebilirliği, ürün kalitesinin artırılması ve doğru, gerçek zamanlı verilerin sağlanması, büyük sürülerin çiftlik yönetimini dönüştürmesini ve artan işgücü ihtiyacı olmadan yönetilmesini mümkün kılmaktadır (Bernabucci & ark., 2025; Distanto & ark., 2025; Papadopoulos & ark., 2025).

Hayvancılık endüstrisi, yapay zekâ ve ileri düzey görsel izleme, bilgisayarla görme sistemleri, doğal dil işleme, Nesnelerin İnterneti (IoT), giyilebilir sensörler, Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) ve Üretici Çekişmeli Ağlar (GAN) gibi çok modlu ses-görüntü algılama yöntemlerinin keşfi ve makine öğrenmesi teknolojilerinin entegrasyonu ile büyük bir dönüşüm yaşamaktadır. Entegre derin öğrenme algoritmaları aracılığıyla platform, kulak küpesi, vücut tabanlı ve yüz tabanlı sığır tanımlama, vücut kondisyon skoru (Body Condition Score,), topallık tespiti, yemleme süresi tahmini ve gerçek zamanlı konumlandırma; yemlemeden hayvan sağlığı izlemesine kadar gerçek zamanlı veri analizi sağlayarak kaynakların optimize edilmesini, israfın azaltılmasını ve verimliliğin artırılmasını mümkün kılmaktadır (Distanto & ark., 2025; Moe & ark., 2025; Pavlova & ark., 2025; Rosati, 2024).

Büyük veri ve yapay zekâ ile desteklenen hayvan besleme modelleri, endüstride önemli değişiklikleri tetiklemektedir: Geleneksel ve basit lineer modeller, hassasiyet ve zekâ odaklı modellere dönüşerek yem bileşimlerini optimize edebilir, verilerle bireysel hayvanlara özgü rasyonlar düzenlenmekte ve yemden yararlanma oranı artmaktadır. Bilgisayarla görme sistemleri, hayvan davranışı, vücut kondisyonu ve yem tüketim modelleri gibi faktörleri doğru bir şekilde analiz ederek yem rasyonlama stratejilerini

optimize edebilir. Bu durum, yem kıtlığı ve iklim değışikliğı gibi küresel zorluklara çözüm sunmaktadır (Akintan & ark., 2024; DataM Intelligence, 2025; Zhang & ark., 2025).

Yapay zekâ teknolojisinin hayvan beslenmesi ve yem bilimi alanında entegrasyonu, üretim verimliliğini artırmış, yemleme ortamlarını optimize etmiş ve hayvan sağlığını iyileştirmiştir. Çiftçiler, kaynak tüketimini azaltabilir, yemleme uygulamalarının sürdürülebilirliğini artırabilir ve genel çiftlik verimliliğini yükseltebilir. Büyük veri analizi, makine öğrenimi, derin öğrenme, bilgisayarla görme Nesnelerin İnterneti (IoT) ve sensör teknolojileri sayesinde, yapay zekâ üretim ve yönetim süreçlerini geliştirmiş, maliyetleri düşürmüş ve yemleme ortamlarını iyileştirerek hayvan refahını artırmıştır (Can, 2024; Dutta & ark., 2025).

Yapay Zekâ genetik iyileştirme programlarını hızlandırmakta, beslenmeyi optimize etmekte, hastalıkları tespit etmekte ve hayvan refahı izlemeyi geliştirmektedir. Yapay Zeka'nın hayvancılık uygulamalarına entegrasyonu, yem israfını %75 azaltarak ve yemleme maliyetlerinde %33 tasarruf sağlarken yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir tarım uygulamalarına ve çevresel yönetim süreçlerine de katkı sağlamaktadır (Meena & ark., 2024; Papadopoulos & ark., 2025).

2. Dijital Hayvancılık Teknolojisine Geçişin Önemi

Geleneksel makine öğrenimi çözümlerinden alan özel temel modeller ve görsel-dil modellerine (Vision-Language Models, VLM) hızlı geçiş, dijital tarımı yeniden canlandırmıştır (Nawaz & ark., 2025). Dijital tarım teknolojisi çözümleri, sürdürülebilir, verimli ve üretken hayvancılık sistemlerinin geliştirilmesi için etkili bir yöntem sunmaktadır. Bu çözümler, işgücü gereksinimlerini azaltmakta, kaynakları korumakta ve hayvan refahını artırmaktadır (Papadopoulos & ark., 2025). Geleceğin ahırları, yalnızca fiziksel alanlar değil; veri, sensör ve akıllı algoritmalarla entegre dijital merkezlerdir (DataM Intelligence, 2025).

2025 Yılı İtibarıyla Hayvancılık Sektöründeki Dijital Sekiz Temel Dönüşüm Eğiliminin Gelişimi

1. **Yapay Zekâ Destekli İzleme Sistemleri:** Giyilebilir sensörler ve kamera sistemleriyle hayvan sağlığı, davranışı ve stres düzeyi anlık olarak izlenmekte, erken teşhis imkânı sağlanmaktadır.
2. **Tahmine Dayalı Sürü Sağlığı Yönetimi:** Büyük veri analizleriyle hastalık riski ve verim düşüşleri önceden tahmin edilmektedir.
3. **Hassas Besleme ve Beslenme Optimizasyonu:** Gerçek zamanlı verilerle bireysel hayvanlara özgü rasyon düzenlenmekte, yemden yararlanma oranı artmaktadır.
4. **Davranış Tanıma ve Refah Değerlendirmesi:** Görüntü işleme teknikleriyle agresyon, topallık veya anormal yatış davranışları otomatik olarak saptanmaktadır.
5. **Yapay Zeka ve Robotik Entegrasyonu:** Otomatik yemleme, sağım ve temizlik sistemleriyle iş gücü verimliliği artmaktadır.
6. **Çevresel İzleme ve Emisyon Azaltımı:** Yapay Zeka tabanlı sistemler sera gazı emisyonlarını izleyerek besleme ve havalandırmayı optimize etmektedir.
7. **Blok Zinciri ve İzlenebilirlik:** Üretim zincirinin her aşaması izlenebilir hâle gelmekte, gıda güvenliği ve sürdürülebilirlik artmaktadır.
8. **Akıllı Karar Destek Sistemleri:** Çoklu veri kaynaklarını birleştirerek çiftçilere gerçek zamanlı karar desteği sunmaktadır (DataM Intelligence, 2025).

Dijital Hayvancılık Teknolojisinin Etkilerinin Sonuçları

1. **Teknolojilerin Yakınsaması:** IoT, yapay zekâ ve blok zinciri gibi farklı teknolojilerin entegrasyonu, tarımsal uygulamalarda daha verimli ve etkili çözümler sağlar.

2. **Sürdürülebilir Gıda Üretimi Farkındalığı İçin Dijitalleşme:** Dijital araçlar, karbon ayak izi, su kullanımı ve diğer sürdürülebilirlik göstergelerini izleyerek gıda üretiminin sürdürülebilirlik etkisini ölçmeyi ve farkındalık yaratmayı sağlar.
3. **İyileştirilmiş Birlikte Çalışabilirlik, Standartlar ve Semantik:** Farklı dijital sistemler ve araçların etkili bir şekilde iletişim kurabilmesini ve uyumlu çalışabilmesini sağlayarak, birleşik bir dijital yaklaşım için kritik ön koşul oluşturur.
4. **Geliştirilmiş Kullanıcı Benimsemesi:** Özellikle çiftçiler ve gıda üreticilerinin teknolojiyi benimsemesi ve etkileşimde bulunması; kullanıcı dostu tasarımlar, eğitim ve destek sistemlerini içerir (Vahdanjoo & ark., 2025)

3. Hayvan Beslemede Yapay Zeka ve Makine Öğreniminin Entegrasyonu ve Kullanılan Sistemler

Hassas Hayvancılıkta Yapay Zeka entegrasyonu, hayvancılık yönetimini geliştirme, hayvan sağlığı ve refahını artırma ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlama üretim verimliliğinin artırılması ve doğru gerçek zamanlı verilerin sağlanması büyük sürüler artan işgücü ihtiyacı olmadan yönetilebilmektedir (Distante & ark., 2025).

Yapay zekâ (AI), hayvan bilimi alanında dönüştürücü bir teknoloji olarak öne çıkmakta ve hayvancılık yönetimi, hastalık tespiti, genetik iyileştirme ve hayvan refahı için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Makine öğrenimi, derin öğrenme, bilgisayarla görme ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi AI tabanlı sistemler, karar verme süreçlerini optimize ederek hayvan üretim sistemlerinde verimliliği artırmaktadır (Asadollahi & Bagheri, 2025)

Güncel teknolojilerin kullanımı, yem tüketiminin doğru bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmakta; ve gelecekteki ticari mera yönetiminde kullanılmak üzere geliştirilmeye devam etmektedir; bu da nihai olarak üreticiler için daha yüksek bir değer yaratmaktadır. (Liu & ark., 2023).

Makine öğrenimi algoritmaları, çeşitli sektörlerde veri analizini dönüştürerek içgörüler elde etme, tahmin yapma ve karmaşık süreçleri otomatikleştirme konusunda güçlü araçlar sunmaktadır. Sensörler, görüntüleme ve çevresel girdilerden elde edilen verileri kullanan makine öğrenimi modelleri, hastalıkları tespit edebilir, hayvan davranışlarını izleyebilir, üretim verimini tahmin edebilir ve besleme programlarını daha hassas şekilde yönetebilir (Pavlova & ark., 2025)

Makine öğrenimi (ML), hayvancılık uygulamalarını dönüştürmede önemli bir rol oynamaktadır. Veri odaklı içgörülerden yararlanarak, hayvan sağlığı, üreme, besleme ve genel çiftlik yönetimi süreçlerinin daha etkin yönetilmesini sağlamaktadır. Hassas hayvancılık uygulamaları ve optimize edilmiş yem yönetimi yer almaktadır; bunlar hem hayvan bakımının kalitesini hem de çiftlik operasyonlarının verimliliğini önemli ölçüde iyileştirebilir (Hashem & ark., 2025).

Makine öğrenimi yaklaşımlarını kullanarak, bu özellikleri potansiyel tahmin ediciler olarak değerlendirmek, doğrudan yem tüketimi ölçümüne göre maliyet açısından daha uygun bir alternatif sunar. Mevcut hayvan verilerinden yararlanarak, bu modeller kaynak kullanımını optimize edebilir ve işgücü yoğun denemelere gerek kalmadan daha büyük bir popülasyonda yem tüketimi tahmini yapılmasını sağlayabilir (Amarilho-Silveira & ark., 2025).

Tablo 1. Hayvancılıkta Kullanılan Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Sistemleri Teknolojileri

Yapay Zekâ Alanı	Yapay Zekâ Alt Alanı	Yapay Zekâ Teknikleri
Akıl Yürütme	Bilgi Temsili ve Akıl Yürütme	Bulanık Mantık, Öneri Sistemleri
Öğrenme	Makine Öğrenimi	Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri, Regresyon, Olasılıksal Öğrenme, Ansambl Yöntemleri, İstatistiksel Öğrenme, K-en Yakın Komşu, Kümeleme, Yapay Sinir Ağları
	Derin Öğrenme	Konvolüsyonel Sinir Ağları, Tekrarlayan Sinir Ağları, Üretici Çekişmeli Ağlar
Algılama	Bilgisayarla Görü	Görüntü İşleme, Görüntü Getirme, Nesne Tanıma, Hareket Tanıma, Sensör Ağları
	Ses Algılama	Konuşma Tanıma
Entegrasyon ve Etkileşim	İnsansız Araçları Robotik	Hava İnsansız Hava Araçları (drone) ve robotik sistemler

Kaynak: Distant ve ark., 2025

Yeni teknolojiler, özellikle büyük veri (Big Data) ve yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), mevcut sınırlılıkların giderilmesinde büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu teknolojiler; akıllı veri toplama, **in vitro** kinetik ve multi-omik veri madenciliği, veri çoğaltma (data augmentation), gelişmiş ve açıklanabilir makine öğrenmesi algoritmaları, çok amaçlı ve sezgisel algoritmalar ile yaşam döngüsü değerlendirmesine (Life Cycle Assessment, LCA) dayalı sürdürülebilirlik analizleri gibi teknikleri kapsamaktadır. Ayrıca büyük dil modelleri (Large Language Models, LLMs), çoklu

ajan sistemleri (multi-agent systems) ve bedenlenmiş yapay zekâ robotları (embodied AI robots) temelli yeni nesil modelleme yaklaşımları, hayvan besleme alanındaki bu ilerlemelerin önemli sonuçları arasında yer almaktadır (Zhang & ark., 2025).

4. Literatürde Hayvan Beslemede Yapay Zeka ve Makine Öğrenimine İlişkin Çalışmalar

Lee & ark. (2025), tarafından yapılan çalışmada, süt ineklerinde diyetten alınan proteinin ne kadarının sindirilip kullanıldığını tahmin etmek, beslenmelerini iyileştirmek amacıyla , iki önemli proteinle ilgili faktörü tahmin eden modeller geliştirmek için yenilikçi makine öğrenimi teknikleri kullanılmıştır: rumen sindirilemeyen protein (RUP) ve duodenal mikrobiyal azot (MicN). Bilimsel çalışmalardan elde edilen büyük bir veri seti analiz edilerek, destek vektör regresyonu (SVR) ve rastgele orman regresyonu (RFR) kullanılarak iki model oluşturulmuştur. Her model için farklı tahmin edici setler belirlenmiş ve süt gün sayısı (DIM), kuru madde alımı (DMI), diyet lif içeriği ve ham protein fraksiyonları gibi faktörler dahil edilmiştir. Model performansı belirleme katsayısı (R^2), tahminin karekök ortalama hatası (RMSEP) ve uyum korelasyon katsayısı (CCC) gibi istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiş ve sonuçlar mevcut NASEM (2021) modelleri ile karşılaştırılmıştır. RFR modeli, RUP için en kesin ve tarafsız tahminleri sağlamış ($R^2 = 0,60$; RMSEP = 0,326 kg/gün; CCC = 0,71) ve SVR modeli MicN için en iyi performansı göstermiştir ($R^2 = 0,76$; RMSEP = 42,4 g/gün; CCC = 0,86). Her iki model de geleneksel yöntemleri aşarak, protein kullanım tahminlerinde makine öğreniminin potansiyelini göstermiştir.

Süt ırkı koyunlarda yapılan çalışmada, yem verimliliğini araştırmak amacıyla süt somatik hücrelerinden elde edilen DNA metilasyon profilleri karşılaştırılarak, farklı residual feed intake (RFI) değerlerine sahip süt koyunlarında genom çapında bisülfid dizileme (GWBS) ile farklı metillenmiş bölgeler (Differentially Methylated Regions, DMRs) tespit edilmiştir. DMR'ler, RFI, feed conversion ratio (FCR) ve her iki ölçümün ortaklığı (Cons) açısından farklılaşan gruplar karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu

DMR'ler ve bu bölgelerde eşlenen genetik varyantların tahmin performansı, üç makine öğrenimi (ML) modeli (xgboost, random forest [RF], çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı [deeplearning]) kullanılarak değerlendirilmiştir. En yüksek ortalama ρ^2 (0,20), RFI, DMR'lerdeki ortalama metilasyon kullanılarak ve genetik varyantlar DMR'lere dahil edilerek tahmin edildiğinde elde edilmiştir. Genel olarak en iyi modeller, xgboost kullanılarak RFI grupları karşılaştırmasında elde edilen DMR'ler ile RFI tahmininde (RMSE=0,10, $\rho^2=0,86$) ve RF kullanılarak Cons gruplarına dayalı DMR'ler artı genetik varyantlar ile (RMSE=0,07, $\rho^2=0,62$) elde edilmiştir. (Fonseca & ark., 2025)

Broiler tavuklarında ses sinyallerini kullanarak yapılan çalışmada, derin öğrenme tabanlı bir modelden oluşan sistem kullanılmış. Sinyaller, 19 ardışık gün boyunca 7/24 kaydedilmiştir. Ham verinin bir alt kümesi seçilmiş ve olaylar iki sınıfa etiketlenmiştir: yem gagalama (feed-pecking) ve yem gagalamama (feed-non-pecking; şarkı söyleme, anomali ve sessizlik örnekleri dahil). Ardından, etiketlenmiş veriler gürültü giderme algoritması ve bant geçiş filtresi ile ön işlenmiştir. Daha sonra, her sinyaldan spektrogram ve sinyal zarfı çıkarılmış ve 1D ve 2D özellik çıkarımı için iki dallı VGG-16 tabanlı bir konvolüsyonel sinir ağına (CNN) beslenmiş, ardından binary sınıflandırma başlığıyla feed-pecking ve non-pecking olayları sınıflandırılmıştır. Model, feed-pecking vs. non-pecking sınıflandırmasında %92 doğruluk ve %91 F1-skora ulaşmıştır. Tahmin edilen yem tüketimi, günlük yem tüketimi tahmininde ortalama ± 7 hata ve saatlik tüketim tahmininde %71 R^2 ve %85 Pearson çarpım moment korelasyon katsayısı (PPMCC) göstermiştir. Sonuçlar, önerilen sistemin her yemlikte broiler yem tüketimini tahmin ettiğini ve ticari çiftliklerde uygulanma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. (Amirivojdan & ark., 2024)

Kürk hayvanı vizyonlarda yem verimliliğini araştırmak amacıyla yapılan çalışmada makine öğrenimi (ML) algoritmalarının uygulanabilirliğini değerlendirmek daha düşük maliyetli özellikler (cinsiyet, renk tipi, yaş, BW ve vücut uzunluğu) kullanarak, büyüme ve tüylenme dönemi boyunca (1 Ağustos–14 Kasım, toplam 15

hafta) ortalama günlük kazanım (ADG), yem dönüşüm oranı (FCR) ve residual feed intake (RFI) değerlerini tahmin etmek için makine öğrenimi (ML) algoritmalarının uygulanabilirliğini değerlendirmek; (2) ADG, FCR ve RFI değerlerini tahmin etmek için büyüme ve tüylenme döneminde en etkili özelliği belirlemek. Cinsiyet ve renk özellikleri 1.088 vizonda kaydedilmiş ve vizonların yaşı, BW ve uzunluğu 1 Ağustos–14 Kasım tarihleri arasında her 3 haftada bir ölçülmüştür (P1–P5). ADG, FCR ve RFI, P1’den P5’e kadar gözlemlenen ve ölçülen özelliklerin çeşitli kombinasyonları kullanılarak seçilen ML algoritmalarıyla tahmin edilmiştir. Hesaplanan ve tahmin edilen ADG, FCR ve RFI değerleri karşılaştırıldığında, en doğru özellik kombinasyonunun 1 Ağustos’ta (P1 başlangıcı) tüm özelliklerin (cinsiyet, renk, yaş, BW ve vücut uzunluğu) dahil edilmesi olduğu belirlenmiştir. Seçilen ML algoritmaları arasında, extreme gradient boosting (XGB) algoritması, ADG ($R^2 = 0,71$, RMSE = 0,10), FCR ($R^2 = 0,74$, RMSE = 0,14) ve RFI ($R^2 = 0,76$, RMSE = 0,10) için en doğru ve güvenilir tahmini sağlamıştır (Shirzadifar & ark., 2025).

Deb & ark. (2025), yapılan çalışmada domuzların büyüme-bitirme (growing-finishing) fazında sindirilebilir enerji ihtiyacını (DER) tahmin etmeyi amaçlamış ve dört makine öğrenimi (ML) modeli—çoklu doğrusal regresyon (MLR), destek vektör regresyonu (SVR), rastgele orman regresyonu (RFR) ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) dört farklı veri seti üzerinde uygulanmıştır. Girdi parametreleri olarak domuzların canlı ağırlığı (BW), ahır içi sıcaklık (IT), ahır içi bağıl nem (IRH) ve ahır içi CO₂ konsantrasyonu (ICO₂) kullanılmıştır. Bulgular farklı diyetlerle beslenen domuzların Sindirilebilir Enerji (DE) alımları arasında anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir ($p > 0,05$). Modellerin farklı veri setleri üzerindeki performansları değerlendirildiğinde, RFR modelinin DS4 veri seti ile en iyi performansı sergilediği; eğitim ve test aşamalarında sırasıyla gerçek ve tahmin edilen verilerin %97 ve %95’ini açıkladığı gözlenmiştir. MLR modeli ise diğer modellere kıyasla en düşük doğruluğu göstermiştir ($R^2 < 0,93$ ve RMSE > 6,1 MJ/domuz-gün). DS4 veri seti altındaki model performans sıralaması şu şekildedir: RFR > MLP > SVR > MLR.

Yang & ark. (2025), 'nın yaptığı çalışmada, Hayvancılıkta, yem dönüşüm oranını (FCR) araştırmak amacıyla Sichuan'daki domuzlardan elde edilen 438.552 yem örneği kullanılarak 19 makine öğrenimi algoritması test edilmiştir. Sonuçlar, Gradient Boosting modelinin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Test aralığı 40 kg'ı aştığında, bu model yüksek doğruluk elde etmiş ve tahmin edilen ile gerçek değerler arasındaki belirleme katsayısı 0,72, korelasyon ise 0,85 olmuştur. FCR testleri için en uygun besleme dönemi 50–90 kg olarak bulunmuştur. Bu bulgular, yem verimliliğini tahmin etmek için etkili bir yöntem sunmakta ve çiftçilerin besleme stratejilerini optimize etmesine, kaynakları daha iyi tahsis etmesine ve hayvanları daha proaktif şekilde yönetmesine yardımcı olarak daha sürdürülebilir ve verimli hayvancılığı desteklemektedir. (Yang & ark., 2025).

Amarilho-Silveira & ark. (2025), Koyunlarda yem tüketimini araştırmak amacıyla yapılan çalışmada Çalışmada 1.708 gözlemi içeren veri setinde 920 Avustralya Merino, 215 Corriedale ve 337 Dohne Merino koyunu yer almakta olup, bu hayvanlar 2019–2022 yılları arasında gerçekleştirilen 17 yem tüketimi denemesinden alınmıştır. Veri seti rastgele iki alt kümeye ayrılmıştır: algoritmaları eğitmek için %80 ve doğrudan doğrulama için %20. Eğitim veri setinin çapraz doğrulamasında en yüksek R^2 değeri, adım adım model ile özellik seçimi yapılan SVM'de bulunmuş ve 0,91 olarak ölçülmüştür; Pearson ve Spearman korelasyon katsayıları sırasıyla 0,95 ve 0,93'tür. Doğrudan doğrulamada ise, adım adım özellik seçimi modeli ile k-en yakın komşu modeli en yüksek Pearson ve Spearman korelasyon katsayılarını (sırasıyla 0,92 ve 0,90) göstermiştir.

Blake & ark. (2023), tarafından yapılan bir çalışmada, Çalışmada 205 hayvan kuru alan ortamında izlendi (152 boğa 88 gün ve 53 düve 50 gün). Toplanan veriler arasında günlük DMI, su alımı, günlük tahmini toplam vücut ağırlığı ve ADG yer aldı; bu ölçümler In-Pen-Weighing Positions ve Feed Intake Nodes sistemleri kullanılarak yapıldı. Düşük frekansa sahip 26 boğa ve aşırı uç değer (>3 standart sapma) olan bir hayvan çıkarıldıktan sonra modelleme için 178 hayvan kullanıldı (125 boğa, 53 düve). Çalışma süresince

iklim verileri 30 dakikalık aralıklarla kaydedildi. Makine öğrenimi yaklaşımları olarak Random Forest Regression (RFR) ve Repeated Measures Random Forest (RMRF) kullanıldı. Geleneksel yaklaşım için Repeated Measures ANOVA (RMANOVA) uygulandı. Random Forest tabanlı makine öğrenimi yaklaşımları kullanılarak, test dönemi boyunca bireysel sığırların kuru madde alımını (DMI) test ortalama DMI değerleri kullanıldığında gerçek DMI değerine $\pm 0,75$ kg hassasiyetle tahmin edebilen bir algoritma geliştirdik. Bu yaklaşım, otomatik yemlik teknolojisi veya bireysel yem ölçümüne ihtiyaç duymadan DMI ölçümüne olanak tanır.

Méndez & ark. (2025), tarafından yapılan çalışmada yoğun üretim ortamında toplanan ivmeölçer verilerini kullanarak ,Keçilerin boyunlarına yerleştirilen üç eksenli bir ivmeölçer hareket verilerini kaydetmiş Sınıflandırma ağaçları, lojistik regresyon ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) modelleri dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenimi algoritmaları, yeme, yürüme ve hareketsiz davranışları tahmin etmek için uygulanmıştır. Ağaç tabanlı sınıflandırıcılar ve çok katmanlı algılayıcı sağlam performans sergileyerek ortalama doğrulukları 0,9'un üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu bulgular, makine öğrenimi modellerinin gerçek zamanlı davranış izleme potansiyelini vurgulamakta ve keçilerle yapılan hayvancılık yönetimini geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Makine öğrenimi algoritmalarının değerlendirilmesi hem geleneksel ağaç tabanlı sınıflandırıcıların hem de MLP'nin yeme, yürüme ve hareketsiz davranışları tahmin etmede iyi performans sergilediğini göstermiştir (Méndez & ark., 2025).

Tablo 2. *Literatürde Hayvan Beslemede Yapay Zeka ve Makine Öğrenimine İlişkin Çalışmalar Tablosu*

Yıl	Hayvan Türü	Kullanılan Sistem / Teknoloji	Kaynaklar
2023	Sığır	Random Forest Regression (RFR), Repeated Measures Random Forest (RMRF)	(Blake & ark., 2023)
2025	Süt ineği	SVR ve RFR modelleri; metabolize olabilir protein tahmini	(Lee & ark., 2025)
2025	Koyun	SVM, k-en yakın komşu (k-NN)	(Amarilho-Silveira & ark., 2025)
2025	Süt koyunu	GWBS, xgboost, RF, derin öğrenme	(Fonseca & ark., 2025)
2025	Keçi	Üç eksenli ivmeölçer; sınıflandırma ağaçları, lojistik regresyon, MLP	(Méndez & ark., 2025)
2025	Domuz	MLR, SVR, RFR, MLP	(Deb & ark., 2025)
2025	Domuz	19 ML algoritması; Gradient Boosting	(Yang & ark., 2025)
2024	Broiler tavuk	Ses sinyali analizi; VGG-16 tabanlı CNN	(Amirivojdan & ark., 2024)
2025	Vizon	Extreme Gradient Boosting (XGB), ML algoritmaları	(Shirzadifar & ark., 2025)

SONUÇ

Küresel nüfus artışı ve iklim değişikliğinin olumsuz etkileri düşünüldüğünde, hayvansal üretimde en büyük faktör olan hayvan beslemede dijital dönüşümün gerçekleştirilmesi önemli boyutlara ulaşmaktadır. Hayvan beslemede yapay zekâ sistemleri

entegrasyonu, bireysel hayvanların beslenme gereksinimlerini gerçek zamanlı hem izleyip nesnel verilerle en uygun hâle getirmekte hem de yemden yararlanma oranını artırmakta ve üretim verimliliğini önemli ölçüde yükseltmektedir. Derin öğrenme ve bilgisayarla görme teknolojileri, hayvan davranışı, vücut kondisyonu ve yem tüketimini hassas şekilde analiz ederek yem rasyonlama stratejilerini optimize etmektedir. IoT ve giyilebilir sensörler, büyük veri analitiğiyle birleştirildiğinde sürü sağlığı, stres ve refah durumlarını anlık olarak izleyebilmekte ve erken müdahale fırsatları sunmaktadır. Makine öğrenimi modelleri, süt, koyun, domuz, broiler ve vizon gibi farklı türlerde yem tüketimi ve büyüme parametrelerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmekte, böylece geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmaktadır. Bu teknolojik entegrasyon, yem israfını azaltmakta, üretim maliyetlerini düşürmekte ve hayvan refahını artırmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ ve makine öğrenimi, hayvan beslemede kullanıldığında, modern hayvancılıkta sadece verim ve kaliteyi artırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilir, veri odaklı ve refah merkezli bir üretim paradigmasını mümkün kılmaktadır. Bu derleme, hayvan beslemede yapay zekâ ve makine öğrenimi tabanlı teknolojilerin etkilerini ve önemini, literatür ve güncel çalışmalara göre kapsamlı biçimde ortaya çıkarmaktadır.

Kaynakça

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

Amarilho-Silveira, F., De Barbieri, I., Navajas, E. A., Cobuci, J. A., & Ciappesoni, G. (2025). Machine learning approaches for predicting feed intake in Australian Merino, Corriedale, and Dohne Merino sheep. *Frontiers in Animal Science*, 6, 1579974. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1579974>

Amirivojdan, A., Nasiri, A., Zhou, S., & Zhao, Y., Gan, H. (2024). ChickenSense: A low-cost deep learning-based solution for poultry feed consumption monitoring using sound technology. *AgriEngineering*, 6(3), 2115–2129. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030124>

Arulmozhi, E., Deb, N. C., Tamrakar, N., Kang, D. Y., Kang, M. Y., Kook, J., Basak, J. K., & Kim, H. T. (2024). From reality to virtuality: Revolutionizing livestock farming through digital twins. *Agriculture*, 14(2231). <https://doi.org/10.3390/agriculture14122231>

Bernabucci, G., Evangelista, C., Girotti, P., Viola, P., Spina, R., Ronchi, B., Bernabucci, U., Basiricò, L., Turini, L., Mantino, A., Mele, M., & Primi, R. (2025). *Precision livestock farming: An overview on the application in extensive systems. Italian Journal of Animal Science*, 24(1), 859–884.

Blake, N. E., Walker, M., Plum, S., Hubbart, J. A., Hatton, J., Mata-Padrino, D., Holásková, I., & Wilson, M. E. (2023). Predicting dry matter intake in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 101, 1–12. <https://doi.org/10.1093/jas/skad269>

Can, L. (2024, October). *Application of Artificial Intelligence in Animal*. In *Proceedings of the 4th International Conference on Public Administration, Health and Humanity Development (PAHHD 2024)* (Vol. 868, p. 187). Springer Nature.

DataM Intelligence. (2025, October 14). *Artificial intelligence (AI) in precision livestock farming: Transforming animal agriculture in 2025*. AgriTechTomorrow. <https://www.agritechtomorrow.com>

Deb, N. C., Basak, J. K., Karki, S., Arulmozhi, E., Kang, D. Y., Tamrakar, N., Seo, E. W., Kook, J., Kang, M. Y., & Kim, H. T. (2025). Prediction of digestible energy requirement in growing finishing stage of pigs using machine learning models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101700. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101700>

Distante, D., Albanello, C., Zaffar, H., Faralli, S., & Amalfitano, D. (2025). Artificial intelligence applied to precision livestock farming: A tertiary study. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100889>

Dutta, J., Saha, D., Maurya, P., & Deuri, D. (2025). Artificial intelligence and its applications in animal husbandry. In *Emerging trends in animal husbandry & veterinary sciences* (Vol. 3, pp. 59–70). Bright Sky Publications

Fonseca, P. A. de S., Suarez-Vega, A., Esteban-Blanco, C., Marina, H., Pelayo, R., Gutiérrez-Gil, B., & Arranz, J.-J. (2025). Integration of epigenomic and genomic data to predict residual feed intake and the feed conversion ratio in dairy sheep via machine learning algorithms. *BMC Genomics*, 26, 313. <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11520-1>

Himu, H. A., & Raihan, A. (2024). Digital transformation of livestock farming for sustainable development. *International Journal of Livestock Research*, 14(9), 1–11.

Lee, M., Kim, D. H., Seo, S., & Tedeschi, L. O. (2025). Development of machine learning models for estimating metabolizable protein supply from feed in lactating dairy cows. *Animals*, 15(687). <https://doi.org/10.3390/ani15050687>

Meena, M. L., Singh, V., Jat, H., & Meena, S. (2024, October). *Artificial intelligence use in animal science: Revolutionizing agriculture*. August 2024 Issue. Raja Balwant Singh College.

Méndez, D. A., Fajardo, B., Sanjuan, S., Calabuig, J. M., Arnau, R., Villagrà, A., Calvet-Sanz, S., & Estelles, F. (2025). Development of goat behaviour prediction with accelerometer data: A machine learning and pre-processing approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237(Part C), 110701. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110701>

Moe, A. S. T., Tin, P., Aikawa, M., Kobayashi, I., & Zin, T. T. (2025). AI-powered visual E-monitoring system for cattle health and wealth. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101300>

Nawaz, U., Zaheer, M. Z., Khan, F. S., Cholakkal, H., Khan, S., & Muhammad, R. (2025). *AI in agriculture: A survey of deep learning techniques for crops, fisheries and livestock*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2507.22101>

Papadopoulos, G., Papantonatou, M.-Z., Uyar, H., Kriezi, O., Mavrommatis, A., Psiroukis, V., Kasimati, A., Tsiplakou, E., & Fountas, S. (2025). Economic and environmental benefits of digital agricultural technological solutions in livestock farming: A review.

Smart Agricultural Technology, 10, 100783.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100783>

Pavlova, K., & Trichkova-Kashamov, E. (2025). Using precision feeding to improve livestock health and profit margins: A nutritional risk management strategy. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(45s), Article 914.
<https://www.jisem-journal.com/>

Rosati, A. (2024). Guiding principles of AI: application in animal husbandry and other considerations. *Animal Frontiers*, 14(6), 3-10.

Shirzadifar, A., Manafiazar, G., Davoudi, P., Do, D., Hu, G., & Miar, Y. (2025). Prediction of growth and feed efficiency in mink using machine learning algorithms. *Animal*, 19(2), 101330.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101330>

Vahdanjoo, M., Sørensen, C. G., & Nørremark, M. (2025). Digital transformation of the agri-food system. *Current Opinion in Food Science*, 63, 101287.
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101287>

Yang, X., Zhu, L., Jiang, W., Yang, Y., Gan, M., Shen, L., & Zhu, L. (2025). Machine learning-based prediction of feed conversion ratio: A feasibility study of using short-term FCR data for long-term feed conversion ratio (FCR) prediction. *Animals*, 15(1773). <https://doi.org/10.3390/ani15121773>

Zhang S, Lai C, Zhao J, Wang J. Big Data and AI-Powered Modeling: A Pathway to Sustainable Precision Animal Nutrition. *Adv Sci* (Weinh). 2025 Sep 26:e07564. doi: 10.1002/advs.202507564. Epub ahead of print. PMID: 41002013.

BÖLÜM 3

Ruminant Beslemede Küresel Isınma ve Metan Emisyonlarının Rolü: Kapsamlı Bir Değerlendirme

BİLAL SELÇUK¹

Giriş: Antroposen Çağında Ruminant Hayvancılığı ve İklim Krizi

Yirmi birinci yüzyılın en belirleyici çevre sorunu olan iklim değişikliği, antropojenik sera gazı (GHG) emisyonlarının atmosferde birikmesiyle tetiklenen küresel ısınma olgusudur. Sanayi devriminden bu yana artan fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma ve endüstriyel tarım faaliyetleri, atmosferik karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) konsantrasyonlarını benzeri görülmemiş seviyelere taşımıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6), küresel yüzey sıcaklığının sanayi öncesi döneme kıyasla 1.1°C arttığını ve bu artışın ekolojik sistemler üzerinde geri döndürülemez etkiler yaratma riski taşıdığını vurgulamaktadır (IPCC, 2022). Bu bağlamda, tarım sektörü ve özellikle ruminant hayvancılığı, hem küresel gıda güvenliğinin sağlanması hem de çevresel

¹ Dr. Öğr. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ladik Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Orcid: 0000-0001-9136-5707

sürdürülebilirliğin korunması ekseninde kritik bir kavşakta bulunmaktadır.

Ruminantlar (sığır, koyun, keçi, manda), insan tüketimine uygun olmayan selülozik biyokütleyi yüksek biyolojik değere sahip hayvansal proteine (et ve süt) dönüştürme yetenekleri sayesinde insan beslenmesinde vazgeçilmez bir role sahiptir. Ancak, bu biyolojik dönüşüm süreci, "enterik fermantasyon" adı verilen ve yan ürün olarak metan gazının açığa çıktığı mikrobiyal bir mekanizmayı içerir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) Küresel Hayvancılık Çevresel Değerlendirme Modeli (GLEAM 3.0) verilerine göre, hayvancılık sektörü küresel antropojenik GHG emisyonlarının yaklaşık %11-14.5'inden sorumludur ve bu emisyonların en büyük payı enterik metandan kaynaklanmaktadır (FAO, 2024).

Bu akademik kitap bölümü, ruminant beslemenin küresel ısınmadaki rolünü çok boyutlu bir perspektifle ele almayı amaçlamaktadır. Bölüm boyunca, rumen mikrobiyolojisinin temel biyokimyasal süreçlerinden başlayarak, metan emisyonlarını azaltmaya yönelik nutrisyonel stratejiler, yem katkı maddeleri, genetik ıslah çalışmaları ve bu uygulamaların ekonomik fizibilitesi derinlemesine incelenecektir.

Sera Gazı Metrikleri: GWP100 ve GWP* Tartışması

Ruminantların iklim üzerindeki etkisini doğru analiz edebilmek için kullanılan ölçüm metriklerinin anlaşılması elzemdir. Geleneksel olarak, sera gazlarının ısınma potansiyeli "Küresel Isınma Potansiyeli" (GWP100) metriği ile ifade edilir. Bu metrik, metan gazının 100 yıllık bir zaman diliminde CO₂'e kıyasla atmosferde ne kadar ısı tuttuğunu hesaplar ve metanı CO₂ eşdeğeri (CO₂-e) cinsinden raporlar. AR6 raporuna göre, fosil kökenli olmayan metanın GWP100 değeri 27-30 arasındadır, yani 1 kg metan, 28 kg CO₂'e eşdeğer ısınma yaratır (IPCC, 2021).

Ancak, metan "Kısa Ömürlü İklim Kirleticisi" (SLCP) sınıfında yer alır ve atmosferdeki ömrü yaklaşık 12 yıldır. Buna karşılık CO₂ atmosferde yüzyıllarca kalır ve kümülatif bir etki yaratır. Bu farkı daha iyi yansıtmak amacıyla Oxford Üniversitesi ve IPCC tarafından önerilen GWP* metriği, metan emisyonlarındaki *değişim oranını* dikkate alır. GWP* yaklaşımına göre, sabit bir oranda salınan metan (yeni emisyon eklenmediği sürece) küresel sıcaklık artışına ek bir katkıda bulunmaz. Daha da önemlisi, metan emisyonlarında sağlanacak mutlak bir azalma, atmosferden CO₂ çekilmesine benzer güçlü bir soğutma etkisi yaratır (Lynch & ark., 2020; Cain, 2023). Bu durum, ruminant besleme stratejilerinin iklim değişikliği ile mücadelede neden "acil ve etkili" bir kaldıraç olduğunu kanıtlar niteliktedir; zira enterik metanın azaltılması, kısa vadede küresel ısınma hızını yavaşlatma potansiyeli en yüksek eylemlerden biridir (CCAC, 2021).

Rumen Mikrobiyal Ekolojisi ve Metanogenez Biyokimyası

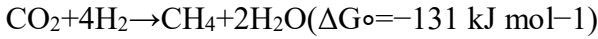
Ruminantların sindirim sistemi, retikulo-rumen adı verilen ve anaerobik koşullarda çalışan devasa bir fermantasyon tankına ev sahipliği yapar. Bu ekosistemde bakteriler (10^{10} - 10^{11} hücre/ml), protozoalar (10^5 - 10^6 hücre/ml), mantarlar ve arkeler (metanojenler) simbiyotik bir ilişki içinde yaşar. Yemle alınan kompleks karbonhidratların (selüloz, hemiselüloz, nişasta) uçucu yağ asitlerine (UYA; asetat, propiyonat, bütirat) dönüştürülmesi, hayvanın enerji ihtiyacının %70'ini karşılar (Ungerfeld, 2020).

Termodinamik Zorunluluk ve Hidrojen Akışı

Rumen fermantasyonu oksidatif bir süreçtir ve glikozun pirüvata, ardından UYA'lara yıkımı sırasında nikotinamid adenin dinükleotid (NAD⁺) indirgenerek NADH'a dönüşür. Fermantasyonun (glikolizin) devam edebilmesi için NADH'ın tekrar NAD⁺ya yükseltgenmesi gerekir; bu sırada açığa çıkan elektronlar metabolik hidrojen (H₂) formunda serbest kalır.

Rumende H₂ birikimi, ortamın redoks potansiyelini düşürür ve termodinamik yasaları gereği NADH oksidasyonunu engeller. Bu blokaj, mikrobiyal büyümeyi durdurur ve yem sindirimini kilitler. Metanojenik arkeler, bu noktada kritik bir "hidrojen lavabosu" (hydrogen sink) görevi görür. Metanojenler, ortamdaki \$H_2\$'yi ve CO₂'yi kullanarak metan üretirler ve böylece H₂ kısmi basıncını düşük tutarak (10⁻⁴ atm) fermantasyonun sürekliliğini sağlarlar (Janssen, 2010; Ungerfeld, 2020).

Metanogenezin genel stokiyometrisi şöyledir:



Metanojenlerin Çeşitliliği ve Metabolik Yollar

Rumen metanojenleri *Euryarchaeota* filumuna aittir ve temel olarak üç metabolik yol izlerler:

Hidrojenotrofik Yol: CO₂'in H₂ ile indirgenmesi. Rumen metan üretiminin yaklaşık %80'inden sorumludur. Baskın cinsler *Methanobrevibacter* (özellikle *M. ruminantium*, *M. smithii*) ve *Methanobacterium*'dur (Leahy & ark , 2010).

Metilotrofik Yol: Metil gruplarının (metanol, metilaminler) kullanılması. *Methanospaera stadtmanae* bu gruptadır ve metanolü \$H_2\$ varlığında indirger. Ayrıca, son yıllarda keşfedilen *Methanomassiliicoccales* (eski adıyla Rumen Cluster C), metilaminleri kullanarak metan üretir ve özellikle tahıl ağırlıklı beslemede önem kazanır (Poulsen & ark, 2013).

Asetoklastik Yol: Asetatın parçalanması. Rumende bu yolun katkısı çok düşüktür veya yoktur, ancak biyogaz tesislerinde baskındır.

Metanogenez biyokimyasında kritik enzim Metil-Koenzim M Redüktaz (MCR)'dır. Bu enzim, metil-koenzim M (CH₃-S-CoM) ile koenzim B'yi (HS-CoB) birleştirerek metan açığa çıkarır. Enzimin aktif merkezinde Nikel içeren bir porfinoit olan F430

kofaktörü bulunur. Güncel inhibitörlerin (örneğin 3-NOP) ana hedefi bu enzimdir (Duin & ark., 2016).

2.3. Protozoa-Metanojen İlişkisi

Rumen protozoaları (özellikle *Holotrichs*), hidrojenozom adı verilen organellerinde fermantasyon sonucu H_2 üretirler. Metanojenik arkeler, bu hidrojen kaynağına doğrudan erişmek için protozoaların yüzeyine yapışır (ekto-simbiyoz) veya içine girer (endo-simbiyoz). Araştırmalar, rumen metanojen popülasyonunun %9 ila %25'inin protozoalarla fiziksel ilişki içinde olduğunu göstermektedir (Newbold & ark., 2015). Bu nedenle, protozoaları ortamdan uzaklaştıran (defaunasyon) stratejiler, metan üretimini önemli ölçüde azaltır ancak lif sindirimini de olumsuz etkileyebilir.

Besleme Yönetimi ve Diyet Manipülasyonları

Enterik metan emisyonlarının azaltılmasında en temel ve uygulanabilir yaklaşım, rasyon kompozisyonunun ve yemleme yönetiminin optimize edilmesidir. Diyetin fiziksel ve kimyasal yapısı, ruminal fermentasyon paternini (UYA profilini) ve geçiş hızını değiştirerek metanogenez üzerinde doğrudan etki yapar.

Kaba Yem: Kesif Yem Oranı ve Karbonhidrat Tipi

Rumen fermantasyonunda üretilen ana UYA'ların stokiometrisi, net hidrojen üretimini belirler:

Asetat Oluşumu: $\text{Glukoz} \rightarrow 2\text{Asetat} + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2$

Bütirat Oluşumu: $\text{Glukoz} \rightarrow \text{Butirat} + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2$

Propiyonat Oluşumu: $\text{Glukoz} + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Propiyonat} + 2\text{H}_2\text{O}$

Selülozca zengin kaba yemler (saman, kuru ot), selülitik bakterileri (*Ruminococcus albus*, *Fibrobacter succinogenes*) teşvik eder ve asetat üretimini artırır; bu da yüksek metan üretimiyle sonuçlanır. Buna karşılık, nişastaca zengin kesif yemler (tahıllar), amilolitik bakterileri (*Streptococcus bovis*) destekler ve propiyonat

üretimini artırır. Propiyonat yolu, ortamdaki hidrojeni kullandığı için metanogeneze rakip olur ve emisyonları düşürür (Beauchemin & ark., 2020).

Diyetteki kesif yem oranının %30-40'tan %70-80 seviyelerine çıkarılması (örneğin yoğun besi sistemlerinde), metan enerjisi kaybını Brüt Enerjinin (GE) %6-7'sinden %2-3'üne kadar düşürebilir (Johnson & Johnson, 1995). Ancak, aşırı tahıl yüklemesi Rumen Asidozu (SARA) riskini artırır ve insan gıdası olabilecek tahılların hayvanlara yedirilmesi ("Gıda vs. Yem") etik tartışmasını doğurur. Ayrıca, LCA perspektifinden bakıldığında, tahıl üretimi için gereken fosil yakıt ve gübre girdileri, toplam karbon ayak izini artırabilir (Legesse & ark., 2023).

Yem Kalitesi ve İşleme Teknolojileri

Yemlerin sindirilebilirliği, metan emisyon yoğunluğu (g CH₄/kg ürün) ile ters orantılıdır. Yüksek lignin içeriğine sahip olgun çayır otları, rumende uzun süre kalarak yavaş fermente olur ve birim sindirilebilir enerji başına metan üretimini artırır.

Erken Hasat: Yem bitkilerinin daha erken vejetatif dönemde hasat edilmesi, lif içeriğini düşürür ve sindirilebilirliği artırır.

Baklagil Kullanımı: Yonca (*Medicago sativa*) veya korunga gibi baklagiller, buğdaygil kaba yemlerine göre daha hızlı sindirilir ve daha düşük metan üretimine neden olur. Ayrıca bazı baklagillerin içerdiği tanenler doğal inhibitör görevi görür (Hristov & ark., 2013).

İşleme: Yemlerin peletlenmesi, öğütülmesi veya silaj yapılması, yüzey alanını artırarak mikrobiyal atağı hızlandırır ve rumen geçiş hızını artırır. Hızlı geçiş, metanojenlerin çoğalma süresini kısıtlayarak emisyonları düşürebilir.

Otlatma Yönetimi ve Mera Stratejileri

Küresel sığır popülasyonunun büyük kısmı otlatma sistemlerine dayalıdır. Bu sistemlerde metan azaltımı daha zordur ancak mera yönetimi ile mümkündür.

Yüksek Otlatma Yoğunluğu: Meraların aşırı olgunlaşmasını önleyerek otun kalitesini yüksek tutmak, metan verimini düşürür.

Tür Kompozisyonu: C4 bitkileri (tropikal otlar), C3 bitkilerine (ılıman otlar) göre daha yüksek lif içeriğine sahiptir ve daha fazla metan üretir. Meralara sindirilebilirliği yüksek baklagillerin (*Trifolium* spp., *Lotus* spp.) eklenmesi ("overseeding"), hem metanı azaltır hem de toprağa azot fikse ederek gübre ihtiyacını düşürür (Knapp & ark., 2014).

Azot Yönetimi ve Kirlilik Takası

Ruminant beslemede sadece metan değil, azot (N) atılımı da çevresel bir sorundur. Diyetteki Ham Protein (HP) seviyesinin ihtiyacın üzerinde olması, idrarla atılan üre miktarını artırır. İdrar azotu, gübre yönetiminde amonyak (NH₃) ve güçlü bir sera gazı olan nitroz oksit (N₂O) emisyonlarına dönüşür.

Metan azaltıcı bazı stratejiler (örneğin nitrat kullanımı), idrarla azot atılımını artırabilir. Bu durum "Kirlilik Takası" (Pollution Swapping) olarak adlandırılır; yani metanı azaltırken N₂O'yu artırma riski vardır. Bu nedenle, rasyonlarda protein/enerji dengesinin hassas bir şekilde ayarlanması (Precision Feeding), her iki gazın emisyonunu minimize etmek için gereklidir (Zhao, 2017).

Yem Katkı Maddeleri: Mekanizmalar ve Etkinlik

Ruminant beslemede son 20 yılın en yoğun araştırma alanı, metanogenezi spesifik olarak hedefleyen yem katkı maddeleridir. Bu maddeler; enzim inhibitörleri, elektron alıcılar, bitkisel ikincil metabolitler ve doğrudan mikrobiyal modülatörler olarak sınıflandırılabilir.

3-Nitrooksipropanol (3-NOP)

3-Nitrooksipropanol (3-NOP), DSM tarafından geliştirilen (ticari adı Bovaer®) ve metan azaltımı için özel olarak tasarlanmış sentetik bir moleküldür.

Mekanizma: 3-NOP, metanogenezin son basamağını katalize eden Metil-Koenzim M Redüktaz (MCR) enziminin aktif bölgesindeki Nikel iyonuna (Ni^{+1}) bağlanarak enzimi geri dönüşümlü olarak inhibe eder (Duin & ark., 2016).

Etkinlik: Küresel çapta yapılan çok sayıda meta-analiz, 3-NOP'un metan emisyonlarını süt sığırlarında %30, besi sığırlarında ise %45-50'ye varan oranlarda azalttığını göstermektedir (Dijkstra vd., 2018; Kim vd., 2020). Etkinlik dozla (60-100 mg/kg KM) doğrusal ilişkilidir ve diyetin enerji yoğunluğu arttıkça (daha az lif) etkisi artmaktadır.

Güvenlik ve Verim: 3-NOP, rumende hızla 1,3-propandiol, nitrat ve nitrite metabolize olur; dokularda veya sütte birikim yapmaz. Hayvan sağlığı, kuru madde tüketimi (DMI) veya süt verimi üzerinde olumsuz bir etkisi rapor edilmemiştir; hatta bazı çalışmalarda süt yağı ve proteininde artış gözlemlenmiştir (Hristov vd., 2015).

Makroalgler: *Asparagopsis taxiformis*

Deniz yosunları, özellikle kırmızı alg *Asparagopsis taxiformis*, içerdiği halojenli bileşikler sayesinde olağanüstü bir metan azaltma potansiyeline sahiptir.

Mekanizma: *Asparagopsis*, yüksek konsantrasyonda Bromoform ($CHBr_3$) içerir. Bromoform, MCR enzimi için Vitamin B12 kofaktörü ile yarışarak metanogenezini bloke eder.

Etkinlik: In vivo çalışmalarda, rasyona sadece %0.2 - %0.5 oranında *Asparagopsis* eklenmesinin metan emisyonlarını %80-98

oranında azalttığı saptanmıştır (Roque & ark., 2021; Kinley & ark., 2020).

Zorluklar: Bromoformun potansiyel kanserojenik etkisi, ozon tabakasına zararı ve iyot metabolizması üzerindeki etkileri endişe kaynağıdır. Ayrıca, küresel talebi karşılayacak ölçekte yosun kültürü (aquaculture) henüz mevcut değildir. Uzun süreli kullanımlarda rumen mikrobiyotasının adaptasyonu ve etkinliğin azalması riski de tartışılmaktadır (Vijn & ark., 2020).

Lipid (Yağ) İlaveleri

Diyete yağ eklenmesi, en geleneksel ve güvenilir metan azaltma yöntemlerinden biridir.

Mekanizma: Yağlar üç yolla etki eder: (1) Rumen protozoaları ve metanojenleri üzerinde doğrudan toksik etki (özellikle orta zincirli yağ asitleri, C12:0, C14:0); (2) Biyohidrojenasyon yoluyla hidrojen tüketimi (etkisi sınırlıdır); (3) Fermente edilebilir karbonhidratların yerini alarak substrat miktarını azaltması.

Etkinlik: Beauchemin vd. (2008) tarafından yapılan meta-analiz, diyetteki ham yağ oranının her %1'lik artışı (toplam KM'de) için metan emisyonunun %5.6 oranında azaldığını göstermiştir. Hindistan cevizi yağı, keten tohumu yağı ve kanola yağı yaygın kaynaklardır.

Sınırlamalar: Rasyondaki toplam yağ oranının %6-7'yi geçmesi, lif sindirimini baskılar ve kuru madde tüketimini düşürür. Bu nedenle yağ kullanımı fizyolojik sınırlar dahilinde bir optimizasyon aracıdır.

Bitkisel İkincil Metabolitler

Doğal bitki ekstraktları, tüketici tarafından "yeşil ve güvenli" algılandığı için ilgi görmektedir.

Tanenler: Kondanse tanenler (*Lotus*, *Onobrychis*), metanojenlerin hücre duvarına bağlanarak veya enzimlerini inhibe ederek etki gösterir. %10-20 arası azaltım sağlayabilirler ancak yüksek dozlarda yem tüketimini düşürürler (Jayanegara & ark., 2012).

Saponinler: *Yucca* ve *Quillaja* saponinleri, protozoaların hücre zarındaki sterollerle kompleks oluşturarak zarı parçalar. Protozoa sayısının azalması (defaunasyon), onlarla ilişkili metanojenleri de azaltır (Goel & Makkar, 2012).

Uçucu Yağlar: Sarımsak (allisin), kekik (timol), tarçın (sinnamaldehit) gibi yağlar antimikrobiyal özellik gösterir. In vitro çalışmalar çok başarılı olsa da, in vivo sonuçlar tutarsızdır ve mikrobiyal adaptasyon sıklıkla görülür (Cobellis & ark., 2016).

Elektron Alıcılar: Nitrat ve Sülfat

Nitrat (NO_3^-), termodinamik olarak CO_2 'den daha güçlü bir elektron alıcısıdır.

Mekanizma: $\text{NO}_3^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{NO}_2^-$, $\text{NO}_2^- + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_3$, $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Bu reaksiyon zinciri, her mol nitrat için 4 mol H_2 tüketir ve metanogenezi baskılar.

Etkinlik: Nitratın metan emisyonlarını %16-20 oranında azalttığı kanıtlanmıştır (Feng & ark., 2020).

Risk: Ara ürün olan Nitrit (NO_2^-), kana geçerse hemoglobini methemoglobine dönüştürerek dokulara oksijen taşınmasını engeller (zehirlenme). Bu risk, hayvanların yavaş alıştırılmasıyla yönetilebilir.

Biyoteknolojik Yaklaşımlar ve Genetik İslah

Geleneksel beslemenin ötesinde, hayvanın biyolojisini ve mikrobiyotasını kalıcı olarak değiştirmeyi hedefleyen yenilikçi yaklaşımlar gelişmektedir.

Anti-Metanojen Aşılar

Yeni Zelanda Pastoral Tarım Araştırma Enstitüsü (AgResearch) öncülüğünde yürütülen çalışmalar, metanojenlerin yüzey proteinlerine veya enzimlerine karşı antikor üreten aşılar geliştirmeyi hedeflemektedir. Aşılanan hayvanın tükürüğüyle rumene giren antikorlar (IgG, IgA), metanojenlere bağlanarak onları nötralize edecektir. Bu yöntem, özellikle katkı maddesi verilmesi zor olan mera hayvanları için idealdir. Ancak, rumen sıvısının yüksek proteolitik aktivitesi ve metanojenlerin çeşitliliği nedeniyle, in vivo denemelerde henüz hedeflenen başarı (%20 azaltım) istikrarlı bir şekilde sağlanamamıştır (Subharat & ark., 2015; Wright & ark., 2024).

Genetik Seleksiyon

Metan üretimi kalıtsal bir özellik midir? Yapılan araştırmalar, metan üretimi (g/gün) ve metan verimi (g/kg KM) özelliklerinin orta düzeyde kalıtsallığa ($h^2 = 0.19 - 0.30$) sahip olduğunu göstermektedir (Pickering & ark., 2015; Donoghue & ark., 2016). Bu, düşük metan üreten bireylerin seçilmesiyle emisyonların nesiller boyu kümülatif olarak azaltılabileceği anlamına gelir. Genomik seleksiyon çalışmaları, düşük metan özelliği ile verim özellikleri arasında olumsuz bir korelasyon olmadığını, hatta Yemden Yararlanma Etkinliği (RFI) ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Yani, daha az metan üreten hayvanlar genellikle yemi daha verimli kullanmaktadır.

Rumen Mikrobiyomu Mühendisliği ve CRISPR

Geleceğin teknolojisi olarak görülen CRISPR/Cas9, rumen mikrobiyotasını doğrudan düzenleme imkanı sunabilir. Teorik olarak, baskın metanojen *Methanobrevibacter ruminantium*'un metan üretim genlerinin (mcrA) susturulması veya asetojenik bakterilerin genetik olarak güçlendirilerek hidrojen rekabetinde öne geçirilmesi mümkündür. Ancak, bu alandaki çalışmalar henüz

laboratuvar aşamasındadır ve "Genetiği Değiştirilmiş Mikroorganizmaların" (GMO) doğaya salınması konusundaki etik ve yasal engeller büyüktür (Bickhart & ark., 2024).

Ekonomik Analiz ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Teknik olarak mümkün olan her strateji ekonomik olarak uygulanabilir değildir. Çiftçilerin metan azaltıcı teknolojileri benimsemesi için maliyet-fayda dengesinin pozitif olması gerekir.

Maliyet ve Karbon Piyasaları

3-NOP veya *Asparagopsis* gibi katkı maddeleri, üretim maliyetini artırır. Eğer bu katkılar, enerji tasarrufu sağlayarak yem maliyetini düşürmüyorsa (ki çoğu zaman nötr etki yaparlar), çiftçinin bunları kullanması için ek teşviklere ihtiyacı vardır. Karbon kredisi mekanizmaları (Carbon Credits) veya devlet sübvansiyonları burada devreye girer. Bir LCA çalışması, metan azaltımının ton başına maliyetinin (Marginal Abatement Cost), karbon vergisi seviyesinin altında kalması durumunda teknolojinin yaygınlaşacağını öngörmektedir (Alvarez-Hess & ark., 2023).

Sinerjik Etkiler ve Kombinasyonlar

Maliyeti düşürmek ve etkinliği artırmak için stratejilerin kombinasyonu (Additive Effects) önerilmektedir. Örneğin, 3-NOP (enzimatik inhibitör) ile diyetle yağ ilavesi (substrat azaltımı) birlikte kullanıldığında, metan düşüşü %50'nin üzerine çıkabilmektedir (Abecia & ark., 2020). Bu tür kombinasyonlar, tekil dozların düşürülmesini sağlayarak yan etki riskini ve maliyeti azaltabilir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Metan azaltımı, sistemin toplam karbon ayak izi içinde değerlendirilmelidir. Örneğin, metanı azaltmak için aşırı tahıl kullanımı, tahılın yetiştirilmesi, işlenmesi ve nakliyesi sırasında oluşan CO₂ emisyonlarını artırabilir. IPCC Tier 2 ve Tier 3

metodolojileri, bu dolaylı etkileri de hesaba katarak "Beşikten Mezara" (Cradle-to-Grave) analiz yapar. Kanada sığır eti endüstrisi üzerine yapılan bir LCA çalışması, verimliliği artırmanın (daha az hayvanla aynı eti üretmek), emisyon yoğunluğunu düşürmenin en etkili yolu olduğunu teyit etmiştir (Legesse & ark., 2023).

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Ruminant hayvancılığı, küresel ısınma ile mücadelede hem bir sorunun kaynağı hem de çözümün bir parçasıdır. Enterik metan emisyonları, biyolojik bir zorunluluktan ziyade, yönetilebilir bir enerji kaybı olarak görülmelidir. Mevcut bilimsel veriler ışığında şu sonuçlara varılabilir:

Tek Çözüm Yoktur: Coğrafi bölgeye, üretim sistemine (mera vs. entansif) ve sosyo-ekonomik koşullara göre farklı stratejilerin (diyet, katkı, genetik) entegre edilmesi gerekir.

3-NOP Devrimi: 3-Nitrooksipropanol, güvenilirliği ve ölçeklenebilirliği ile kısa vadede en etkili araç olarak öne çıkmaktadır.

Verimlilik Anahtardır: Hayvan başına verimin artırılması, emisyon yoğunluğunu (kg CO₂-e/kg ürün) düşürmeye devam edecektir.

Politika Desteği: Teknolojilerin benimsenmesi için karbon fiyatlandırması ve üretici teşvikleri şarttır.

Gelecekte, "Düşük Karbonlu Süt/Et" etiketli ürünler, bilinçli tüketicilerin talebiyle pazar standardı haline gelebilir. Bilim dünyasının görevi, bu dönüşümü sağlayacak araçları güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde geliştirmektir.

Kaynakça

Abecia, L., Molina-Alcaide, E., Cantalapiedra-Hijar, G., & Martín-García, A. I. (2020). Combined effects of 3-nitrooxypropanol and canola oil supplementation on methane emissions, rumen fermentation and biohydrogenation in beef cattle. *Journal of Animal Science*, *98*(12), skaa387. doi:10.1093/jas/skaa387

Alvarez-Hess, P. S., Eckard, R. J., & Moate, P. J. (2023). Modeling the trade-off between diet costs and methane emissions: A goal programming approach. *Journal of Dairy Science*, *106*(4), 2855–2868. doi:10.3168/jds.2022-22489

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. doi:10.1071/EA07299

Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Eckard, R. J., & Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, *14*(s1), s2–s16. doi:10.1017/S1751731119003100

Bickhart, D. M., Weimer, P. J., & Hess, M. (2024). Microbial engineering approaches to mitigate methane emissions from livestock. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1389203. doi:10.3389/fmicb.2024.1389203

Cain, M. (2023, June). *Key points from the FAO report on methane metrics: Implications for policy*. [Presentation to the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Food Safety]. Oxford, United Kingdom.

Climate and Clean Air Coalition (CCAC). (2021). *Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions*. United Nations Environment Programme.

Cobellis, G., Trbalza-Marinucci, M., & Yu, Z. (2016). Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: A review. *Science of the Total Environment*, *545–546*, 556–568. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.103

Dijkstra, J., Oenema, O., & Bannink, A. (2013). Dietary strategies to reducing N excretion from cattle: Implications for methane emissions. In *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *5*(3-4), 417–425. doi:10.1016/j.cosust.2013.06.008

Dijkstra, J., Bannink, A., France, J., Kebreab, E., & van Gastelen, S. (2018). Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *Journal of Dairy Science*, *101*(10), 9041–9047. doi:10.3168/jds.2017-13956

Donoghue, K. A., Bird-Gardiner, T., Arthur, P. F., Herd, R. M., & Hegarty, R. S. (2016). Genetic and phenotypic variance and covariance components for methane emission and postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, *94*(4), 1438–1445. doi:10.2527/jas.2015-0065

Duin, E. C., Wagner, T., Shima, S., Prakash, D., Cronin, B., Yáñez-Ruiz, D. R., ... & Kindermann, M. (2016). Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(22), 6172–6177. doi:10.1073/pnas.1600298113

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) 3.0*. <http://www.fao.org/gleam/en/>

Feng, X., Dijkstra, J., Bannink, A., van Gastelen, S., France, J., & Kebreab, E. (2020). Antimethanogenic effects of nitrate

supplementation in cattle: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, *103*(12), 11375–11385. doi:10.3168/jds.2020-18541

Goel, G., & Makkar, H. P. S. (2012). Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health and Production*, *44*(4), 729–739. doi:10.1007/s11250-011-9966-2

Hristov, A. N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., ... & Dell, C. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions (FAO Animal Production and Health Paper No. 177). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T. W., Harper, M. T., Weeks, H. L., ... & Duval, S. M. (2015). An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(34), 10663–10668. doi:10.1073/pnas.1504124112

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926

Janssen, P. H. (2010). Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and stoichiometry. *Journal of Animal Science*, *88*(E. Suppl.), E9–E16. doi:10.2527/jas.2009-2000

Jayanegara, A., Leiber, F., & Kreuzer, M. (2012). Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, *96*(3), 365–375. doi:10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x

Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, *73*(8), 2483–2492. doi:10.2527/1995.7382483x

Kim, M., Lee, C., & Hristov, A. N. (2020). Effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission, digestion, and energy and nitrogen balance of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *103*(10), 8924–8937. doi:10.3168/jds.2020-18497

Kinley, R. D., Martinez-Fernandez, G., Matthews, M. K., de Nys, R., Magnusson, M., & Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, *259*, 120836. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120836

Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, *97*(6), 3231–3261. doi:10.3168/jds.2013-7234

Leahy, S. C., Kelly, W. J., Altermann, E., Ronimus, R. S., Yeoman, C. J., Pacheco, D. M., ... & Attwood, G. T. (2010). The genome sequence of the rumen methanogen *Methanobrevibacter ruminantium* reveals new possibilities for controlling ruminant methane emissions. *PLOS ONE*, *5*(1), e8926. doi:10.1371/journal.pone.0008926

Legesse, G., McAllister, T. A., & Beauchemin, K. A. (2023). The environmental footprint of Canadian beef: A life cycle assessment. *Canadian Journal of Animal Science*, *103*(1), 1–15. doi:10.1139/cjas-2022-0077

Lynch, J., Cain, M., Frame, D., & Pierrehumbert, R. (2020). Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 518039. doi:10.3389/fsufs.2020.518039

Newbold, C. J., de la Fuente, G., Belanche, A., Ramos-Morales, E., & McEwan, N. R. (2015). The role of ciliate protozoa in the rumen. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1313. doi:10.3389/fmicb.2015.01313

Pickering, N. K., Oddy, V. H., Basarab, J., Cammack, K., Hayes, B., Hegarty, R. S., ... & McEwan, J. C. (2015). Animal board invited review: Genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, *9*(9), 1431–1440. doi:10.1017/S1751731115000968

Poulsen, M., Schwab, C., Jensen, B. B., Engberg, R. M., Spang, A., Canibe, N., ... & Urich, T. (2013). Methylophilic methanogenic Thermoplasmata implicated in reduced methane emissions from bovine rumen. *Nature Communications*, *4*(1), 1428. doi:10.1038/ncomms2432

Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLOS ONE*, *16*(3), e0247820. doi:10.1371/journal.pone.0247820

Subharat, S., Shu, D., Zheng, T., Buddle, B. M., Janssen, P. H., Luo, D., & Wedlock, D. N. (2015). Vaccination of cattle with a

methanogen protein produces specific antibodies in the saliva which are stable in the rumen. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, *164*(3-4), 201–207. doi:10.1016/j.vetimm.2015.02.009

Ungerfeld, E. M. (2020). Metabolic hydrogen flows in rumen fermentation: Principles and possibilities of interventions. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 589. doi:10.3389/fmicb.2020.00589

Vijn, S., Compart, D. P., Dutta, N., Foukis, A., Hess, M., Hristov, A. N., ... & Kebreab, E. (2020). Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*, 1135. doi:10.3389/fvets.2020.597430

Wright, A. D. G., Kennedy, P., & O'Neill, C. J. (2024). The potential and challenges of developing anti-methanogen vaccines for ruminants. *Frontiers in Animal Science*, *5*, 1356752. doi:10.3389/fanim.2024.1356752

Zhao, G., & O'Mara, F. P. (2017). Modulation of protein metabolism to mitigate nitrous oxide emissions from ruminants: A review. *Animal Production Science*, *57*(11), 2195–2203. doi:10.1071/AN17360

BÖLÜM 4

Ruminant Beslemede İn Vitro Yem Değerlendirme Sistemleri: Metodolojik Derinlik, Biyokimyasal Temeller ve Uygulamalı Stratejiler

1. BİLAL SELÇUK¹

Giriş

Ruminant hayvancılığında sürdürülebilirlik, üretim verimliliği ve çevresel etkinin yönetimi, hayvanlara sunulan yemlerin besin madde içeriklerinin ve sindirilebilirliklerinin hassas bir şekilde belirlenmesine dayanır. Yemlerin enerji değerinin doğru tahmini, rasyon formülasyonunun temel taşıdır; zira enerji, mikrobiyal protein sentezi ve hayvanın idame ile verim payları için birincil kısıtlayıcı faktördür (Menke & Steingass, 1988). Tarihsel perspektiften bakıldığında, yem değerlendirme sistemleri basit kimyasal analizlerden (Weende analizi), deterjan lif sistemine (Van Soest) ve nihayetinde sindirim fizyolojisini dinamik olarak modelleyen biyolojik yöntemlere doğru evrilmiştir.

Geleneksel olarak, bir yemin sindirilebilirliğini belirlemenin en kesin yolu, canlı hayvanlar üzerinde yürütülen *in vivo* sindirim denemeleridir. Bu denemeler, yemin hayvan tarafından tüketilmesi,

¹ Dr. Öğr. Gör., Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ladik Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Orcid: 0000-0001-9136-5707

sindirilmesi ve atılması süreçlerini tüm fizyolojik karmaşıklığıyla yansıtır. Ancak, *in vivo* çalışmaların doğasında var olan kısıtlamalar—yüksek maliyet, yoğun iş gücü gereksinimi, büyük miktarda yem materyaline ihtiyaç duyulması, uzun süren deneme periyotları ve artan hayvan refahı endişeleri—araştırmacıları alternatif arayışlara itmiştir (Rymer & ark., 2005; Tilley & Terry, 1963). Bu bağlamda, *in vitro* (laboratuvar ortamında) teknikler, rumen ekosistemini yapay bir ortamda taklit ederek, *in vivo* denemelerin yerini alabilecek veya onları tamamlayabilecek güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır.

In vitro sistemler, ruminant beslemede sadece sindirilebilirliği tahmin etmekle kalmaz, aynı zamanda fermentasyon kinetiği, mikrobiyal protein sentezi, uçucu yağ asitleri (VFA) profili ve metan emisyon potansiyeli gibi kritik parametrelerin belirlenmesine de olanak tanır (Getachew & ark., 2004). Bu yöntemlerin temel felsefesi, rumen mikrobiyotasının (bakteri, protozoa, arkea ve mantarlar) yem partiküllerini anaerobik koşullarda, sabit sıcaklıkta (39°C) ve fizyolojik pH aralığında fermente etmesini sağlayan kontrollü bir ortam yaratmaktır.

Bu kapsamlı kitap bölümü, ruminant beslemede kullanılan *in vitro* yem analiz sistemlerinin tarihsel gelişimini, biyokimyasal mekanizmalarını, metodolojik detaylarını ve modern uygulamalarını derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Tilley ve Terry (1963) devrim niteliğindeki iki aşamalı yönteminden, Menke ve Steingass (1988) gaz üretim tekniğine, enzimatik hidroliz yöntemlerinden (De Boever & ark., 1986) modern otomasyon sistemlerine (Ankom Daisy II) kadar geniş bir yelpaze ele alınacaktır. Ayrıca, bu yöntemlerin *in vivo* verilerle olan korelasyonları, avantajları ve kısıtlılıkları, güncel literatür ışığında kritik bir süzgeçten geçirilecektir.

Rumen Fermentasyonunun Biyokimyasal Simülasyonu

Bir *in vitro* sistemin başarısı, karmaşık rumen ekosistemini ne kadar doğru taklit edebildiğine bağlıdır. Rumen, simbiyotik mikroorganizmaların selülozik biyokütleyi enerjiye dönüştürdüğü devasa bir fermentasyon tankıdır. Bu süreci laboratuvar tüpüne (*in vitro*) taşımak, belirli fizikokimyasal koşulların titizlikle sağlanmasını gerektirir.

Anaerobik Koşullar ve Redoks Potansiyeli

Rumen ortamı, oksijensiz (anaerobik) bir yapıya sahiptir ve bu durum, oksijene duyarlı olan selülitik bakterilerin (örneğin *Ruminococcus albus*, *Fibrobacter succinogenes*) ve metanojen arkelerin hayatta kalması için elzemdir. *İn vitro* sistemlerde bu ortam, inkübasyon ortamının oksijensiz gazlarla (genellikle CO₂) doyurulması ve redoks potansiyelini düşürücü ajanların (sistein hidroklorür veya sodyum sülfid) kullanılmasıyla sağlanır (Mould & ark., 2005).

Oksijenin varlığı, fakültatif anaerobların çoğalmasına ve zorunlu anaerobların inhibe edilmesine yol açarak fermentasyon paternini bozar. Bu nedenle, *in vitro* gaz üretim tekniği gibi yöntemlerde, tampon çözelti hazırlanırken kaynatma ve sürekli CO₂ basma işlemleri uygulanır. Menke ve Steingass (1988) yönteminde, ortamın anaerobik olduğunun görsel indikatörü olarak "resazurin" kullanılır; ortam renksizleştğinde redoks potansiyelinin yeterince düştüğü anlaşılr.

Tamponlama Kapasitesi ve pH Dengesi

Rumen mikroorganizmaları, özellikle selülitik bakteriler, pH değişimlerine karşı oldukça hassastır. pH'nın 6.0'ın altına düşmesi, selülozizi (lif sindirimini) ciddi şekilde baskılar. *In vivo* koşullarda, ruminantın tükürüğü (bikarbonat ve fosfat açısından zengin) rumen pH'ını 6.2-7.0 aralığında tamponlar. *İn vitro* sistemlerde bu görevi "yapay tükürük" veya tampon çözelti üstlenir.

En yaygın kullanılan tampon, McDougall (1948) tarafından geliştirilen çözeltidir. Bu çözelti, koyun tükürüğünün kimyasal kompozisyonunu taklit eder. McDougall tamponu, fermantasyon sırasında açığa çıkan uçucu yağ asitlerini (VFA) nötralize ederek pH'ın fizyolojik sınırlarda kalmasını sağlar.

Tablo 1. McDougall (1948) Tampon Çözeltisinin Standart Bileşimi (g/L)

Bileşen	Kimyasal Formül	Miktar (g/L)	Fonksiyonu
Sodyum Bikarbonat	NaHCO_3	9.80	Ana tamponlama ajanı (pH kontrolü)
Disodyum Fosfat (Susuz)	Na_2HPO_4	3.71	Fosfat tampon sistemi ve P kaynağı
Potasyum Klorür	KCl	0.57	Ozmotik basınç ve K kaynağı
Sodyum Klorür	NaCl	0.47	Ozmotik basınç
Magnezyum Sülfat	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12	Mg ve S kaynağı (Mikrobiyal enzim kofaktörü)
Kalsiyum Klorür	CaCl_2	0.04	Ca kaynağı (Hücre duvarı stabilitesi)

Alternatif olarak kullanılan Kansas tamponu, üre içermesiyle McDougall'dan ayrılır ve özellikle düşük proteinli yemlerin analizinde mikrobiyal protein sentezi için gerekli azotu sağlamayı amaçlar. Tampon seçiminin, özellikle nişasta içeriği yüksek yemlerin (konsantre yemler) inkübasyonunda asiditeyi kontrol etme kapasitesi açısından kritik olduğu, aksi takdirde asidoz benzeri bir durumun tüp içinde gerçekleşerek sonuçları yanıltabileceği bilinmektedir (Lana Russell & Van Amburgh, 1998).

İnokulum Kaynakları: Değişkenliğin Yönetimi

In vitro sistemlerin "motoru", yemi sindirecek enzimleri sağlayan mikrobiyal popülasyondur. Bu popülasyonun kaynağı (inokulum), yöntemin tekrarlanabilirliği ve doğruluğu üzerinde en büyük etkiye sahip faktördür.

Rumen Sıvısı

Rumen sıvısı, *in vitro* çalışmalar için "altın standart" inokulum kaynağıdır. Genellikle rumen kanülü takılmış donör hayvanlardan (sığır, koyun, keçi) elde edilir. Rumen sıvısının aktivitesi; donör hayvanın türü, diyeti, besleme zamanı ve sıvının alındığı bölgeye göre değişir.

Donör Diyeti: Donör hayvanın, test edilecek yeme benzer bir rasyonla beslenmesi, o yemi sindirecek spesifik mikrobiyal popülasyonun (adaptasyon) gelişmesini sağlar. Örneğin, nişasta ağırlıklı yemler test edilecekse, donörün de belirli oranda konsantre yem tüketmesi, amilolitik bakteri popülasyonunu artırarak *in vitro* sonuçların doğruluğunu artırır (Nagadi, Herrero & Jessop, 2000).

Toplama Zamanı: Genellikle sabah yemlemesinden önce (aç karna) alınması tercih edilir, çünkü bu saatte mikrobiyal kompozisyon nispeten daha stabildir.

İşleme: Rumen sıvısı alındıktan sonra hızla laboratuvara ulaştırılmalı, sıcaklık şoku (soğuma) önlenmeli (termos içinde taşınmalı) ve kaba partiküllerden arındırmak için tülbentten (genellikle 4 kat) süzülmalıdır.

Dışkı (Feces) İnokulumu

Rumen kanüllü hayvanların bakımı ve cerrahi operasyon gerekliliği, etik ve ekonomik zorluklar yaratır. Bu nedenle, dışkının inokulum olarak kullanımı (özellikle atlar ve bazı ruminant çalışmaları için) araştırılmıştır. Dışkı, rumen veya sekumdan gelen mikrobiyal popülasyonun bir kısmını barındırır.

Araştırmalar, dışkı inokulumunun, rumen sıvısına kıyasla daha düşük bir başlangıç mikrobiyal aktivitesine sahip olduğunu ve bu durumun fermentasyonun başlama süresini (lag time) uzattığını göstermiştir (El Shaer & ark., 1987). Ancak, toplam gaz üretimi ve sindirilebilirlik potansiyeli (48-96 saat sonunda) açısından rumen

sıvısı ile yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. Dışkı inokulumu kullanıldığında, "Menke Denklemleri" gibi standart denklemlerin yeniden kalibre edilmesi gerekebilir.

İki Aşamalı Sindirim Yöntemi (Tilley ve Terry)

1963 yılında J.M.A. Tilley ve R.A. Terry tarafından *Journal of the British Grassland Society*'de yayımlanan "A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops" başlıklı makale, yem değerlendirme tarihinde bir dönüm noktasıdır. Bu yöntem, ruminant sindirim sisteminin fizyolojik aşamalarını (retikulo-rumen ve abomasum/ince bağırsak) laboratuvar ortamında simüle eden ilk kapsamlı protokoldür (Tilley & Terry, 1963).

Metodolojinin Evreleri

Yöntem, birbirini takip eden iki 48 saatlik inkübasyon periyodundan oluşur.

Birinci Aşama (Rumen Fermantasyonu):

Yaklaşık 0.5 g öğütülmüş (1 mm elek) yem örneği, 50 mL'lik santrifüj tüpüne tartılır. Üzerine 10 mL taze rumen sıvısı ve 40 mL McDougall tamponu eklenir. Tüplerin havası CO₂ ile değiştirilerek anaerobik ortam sağlanır ve ağızları Bunsen valfi (gaz çıkışına izin veren, içeri hava girişini önleyen sistem) ile kapatılır. Tüpler, karanlıkta ve 39°C'de 48 saat inkübe edilir. Günde birkaç kez çalkalanarak mikrobiyal temas artırılır. Bu aşamada, yapısal karbonhidratlar (selüloz, hemiselüloz), nişasta ve çözünebilir şekerler mikroorganizmalar tarafından fermente edilir (Tilley & Terry, 1963).

İkinci Aşama (Asit-Pepsin Sindirimi):

48 saatin sonunda fermantasyon durdurulur. Bakteriyel proteinlerin ve yem kaynaklı kaçak proteinlerin sindirimini simüle etmek için tüplere 6 N HCl eklenerek pH 1.2-1.5 aralığına düşürülür.

Ardından pepsin enzimi (mide proteazı) ilave edilir ve 48 saat daha 39°C'de inkübe edilir. Bu aşama, abomasumdaki (gerçek mide) asidik sindirimi temsil eder.

Toplam 96 saatlik işlemin ardından kalan bakiye (residue), filtre kağıdından veya sinterlenmiş cam krozedden süzülür, 105°C'de kurutulur ve tartılır. Kül fırınında yakılarak organik madde içeriği belirlenir.

IVOMD (%) = (Başlangıç Organik Madde – Kalan organik madde- Kör değeri) / (Başlangıç organik madde) x 100

Burada "Blank", yem konulmadan sadece inokulum ile inkübe edilen tüplerin değeridir ve inokulumdan gelen kalıntı miktarını düzeltmek için kullanılır.

Burada IVOMD, *In Vitro* Organik Madde Sindirilebilirliği (*In Vitro* Organic Matter Digestibility)

Yöntemin Modifikasyonları ve Van Soest Revizyonu

Tilley ve Terry yöntemi, "görünür" (apparent) sindirilebilirliği ölçer. Çünkü fermantasyon sonucu çoğalan ve sindirilmeyen mikrobiyal biyokütle, kalıntı içinde kalır ve sanki yem sindirilmemiş gibi tartılır. Bu durum, gerçek sindirilebilirliğin olduğundan düşük tahmin edilmesine (underestimation) neden olur.

Van Soest (1994), ikinci aşamada asit-pepsin yerine Nötr Deterjan Solüsyonu (NDS) kullanılarak ekstraksiyon yapılmasını önermiştir. NDS, mikrobiyal hücre duvarlarını ve endojen metabolik ürünleri çözerek ortamdan uzaklaştırır. Bu modifikasyon ile elde edilen değere "Gerçek İn Vitro Sindirilebilirlik" (True Digestibility) denir. Gerçek sindirilebilirlik, özellikle mikrobiyal gelişimin yoğun olduğu yüksek enerjili yemlerde daha doğru sonuçlar verir. Ayrıca, Alexander ve McGowan (1966), ikinci aşamayı kısaltarak asit-pepsin süresini 24 saate indirmiş ve benzer doğrulukta sonuçlar elde etmişlerdir.

Yöntemin Güçlü ve Zayıf Yönleri

Güçlü Yönler: *In vivo* sindirilebilirlik ile çok yüksek korelasyon ($r > 0.90$) gösterir. Yemlerin enerji değerinin tahmininde güvenilir bir referans yöntemidir.

Zayıf Yönler: Toplam analiz süresi uzundur (4-6 gün). Donör hayvan gerektirir. Sadece sindirimin son noktası (extent) hakkında bilgi verir; sindirim hızı (rate) hakkında veri sağlamaz.

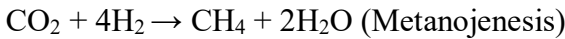
Gaz Üretim Tekniği (Menke ve Steingass)

Menke ve & (1979) tarafından geliştirilen ve Menke ve Steingass (1988) tarafından standardize edilen "Hohenheim Gaz Testi", yemlerin fermentasyon kinetiğini izlemeye devrim yaratmıştır. Bu yöntem, yemin sindirimi sırasında açığa çıkan gaz miktarının (CO_2 ve CH_4), sindirilen organik madde ve üretilen enerji ile doğrudan orantılı olduğu prensibine dayanır (Menke & ark., 1979).

Biyokimyasal Stokiyometri

Anaerobik fermentasyon sırasında karbonhidratlar kısa zincirli yağ asitlerine (SCFA) dönüştürülür. Bu süreçte gaz üretimi iki yolla gerçekleşir:

Doğrudan Gaz: Mikrobiyal metabolizma sonucu oluşan CO_2 ve CH_4 .



Dolaylı Gaz: Oluşan asitlerin (Asetat, Propiyonat, Bütirat), tampon çözeltideki bikarbonat (HCO_3^-) ile reaksiyona girmesi sonucu açığa çıkan CO_2 .



Bu stokiyometri nedeniyle, üretilen gaz miktarı, üretilen VFA miktarı ile güçlü bir lineer ilişki içindedir. Propiyonat üretimi sırasında net gaz açığa çıkmazken (tampondan gelen hariç), asetat ve bütirat üretiminde yüksek miktarda gaz oluşur. Bu nedenle gaz üretimi, yemin fermente olabilirliğinin hassas bir göstergesidir (Getachew & ark., 2004).

Metodolojik Protokol

Standart yöntemde, 100 mL kapasiteli, kalibre edilmiş cam şırıngalar kullanılır (Häberle Labortechnik, Almanya).

Numune Hazırlama: 200 mg (± 0.1 mg) öğütülmüş yem şırınganın dibine tartılır.

İnokulum Hazırlama: Rumen sıvısı süzülür ve özel bir mineral-tampon karışımı ile 1:2 oranında (1 birim rumen sıvısı, 2 birim tampon) karıştırılır. Menke tamponu, mikro ve makro elementleri (Mn, Co, Fe vb.) ve indirgeyici ajanı (Sodyum sülfid) içerir.

İnkübasyon: Her şırıngaya 30 mL inokulum karışımı havasız ortamda çekilir. Şırıngalar 39°C'deki su banyosunda veya döner inkübatörde inkübe edilir.

Ölçüm: Belirli zaman aralıklarında (0, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96 saat) pistonun hareketi okunarak kümülatif gaz hacmi kaydedilir.

Modern sistemlerde (örn. Ankom RF Gas Production System), cam şırıngalar yerine kapalı şişeler ve basınç sensörleri kullanılır. Basınç (psi/kPa), ideal gaz yasası kullanılarak hacme (mL) dönüştürülür. Bu sistemler, veri kaydını otomatikleştirerek operatör hatasını azaltır ve gece boyunca da veri toplanmasını sağlar (Theodorou vd., 1994).

Enerji Değerinin Tahmini (Regresyon Denklemleri)

Menke ve Steingass (1988), 24 saatlik gaz üretimi (\$Gp24\$) ile yemin kimyasal bileşenlerini (Ham Protein, Ham Yağ, Ham Kül) kullanarak Metabolik Enerji (ME) ve Net Enerji (NEL) değerlerini tahmin eden regresyon denklemleri geliştirmişlerdir. Bu denklemler 500'den fazla *in vivo* deneme verisiyle valide edilmiştir.

Kaba Yemler (Yeşil ot, kuru ot, silaj, saman) için:

$$ME \text{ (MJ/kg KM)} = 2.20 + 0.136 \times GÜ24 + 0.057 \times HP + 0.0029 \times HY^2$$

$$OMD \text{ (\%)} = 14.88 + 0.889 \times GÜ24 + 0.45 \times HP + 0.0651 \times HK$$

Karma Yemler (Konsantreler) için:

$$ME \text{ (MJ/kg KM)} = 1.06 + 0.157 \times Gp24 + 0.084 \times HP + 0.22 \times HY - 0.081 \times HK$$

Burada GÜ24: 200 mg KM'den 24 saatte üretilen net gaz (mL); HP: Ham Protein (% KM veya g/kg, denkleme göre kontrol edilmeli, Menke orijinalinde g/kg veya % olarak farklı katsayılar kullanır, yukarıdaki katsayılar genellikle % değeri içindir ancak orijinal makaledeki birimlere dikkat edilmelidir. Yaygın kullanımda HP % olarak girildiğinde katsayılar bu şekildedir.

Kinetik Modelleme

Gaz üretim verileri, fermentasyonun hızını (rate) ve potansiyelini (extent) tanımlayan matematiksel modellere uydurulur (curve fitting). En yaygın kullanılan model Ørskov ve McDonald (1979) eksponansiyel modelidir:

$$Y = b \times (1 - e^{-ct})$$

Burada Y: t zamanındaki gaz üretimi, b: Potansiyel gaz üretimi (asimptot), c: Gaz üretim hızı sabiti (saat⁻¹).

Alternatif olarak, Gompertz modeli gibi sigmoid modeller, bakteriyel kolonizasyonun neden olduğu gecikme fazını (lag phase) daha iyi tanımlayabilir. Bu kinetik parametreler, yemin rumende kalış süresine (passage rate) bağlı olarak ne kadarının sindirileceğini tahmin etmede kullanılır.

Ankom Daisy II İnkübatör Sistemi: Verimlilik ve Otomasyon

Geleneksel tüp yöntemlerinin düşük kapasitesi (tek seferde sınırlı numune), laboratuvar verimliliğini artırmaya yönelik teknolojilerin gelişmesini tetiklemiştir. Ankom Technology (ABD) tarafından geliştirilen Daisy II İnkübatör, "filtre torba teknolojisi" (filter bag technology) kullanarak aynı anda 100'e yakın numunenin analiz edilmesine olanak tanır.

Sistemin Bileşenleri ve Çalışma Prensibi

Daisy II sistemi, sıcaklığı $39.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulan bir kabin ve içinde sürekli dönen dört adet 4 litrelik cam kavanozdan oluşur.

Filtre Torbalar (F57/F58): Numuneler (0.25 - 0.50 g), 25 μm gözenek çapına sahip, aside ve ısıya dayanıklı özel sentetik torbalara konur ve ağızları ısıyla kapatılır (heat-sealed). Bu gözenek çapı, rumen bakterilerinin ve enzimlerin içeri girmesine izin verirken, sindirilmemiş lif partiküllerinin dışarı çıkmasını engeller.

İnkübasyon: Her kavanoza 1600 mL tampon çözeltisi (McDougall) ve 400 mL rumen sıvısı konur. İçine 20-25 adet numune torbası atılır. Kavanozlar CO_2 ile purj edilir ve kapatılır. Kavanozların sürekli dönmesi, homojen bir karışım ve mikrobiyal temas sağlar.

Analiz Süreci

Standart 48 saatlik inkübasyonun ardından torbalar çıkarılır ve soğuk suyla yıkanarak fermentasyon durdurulur.

Torbalar, Ankom Fiber Analizörü kullanılarak Nötr Deterjan Solüsyonu (NDS) ile 1 saat muamele edilir (kaynatılır). Bu işlem, mikrobiyal kalıntıları uzaklaştırır.

Kurutma ve tartım sonrası, başlangıç ağırlığı ile son ağırlık arasındaki farktan "*In Vitro* Gerçek Sindirilebilirlik" (IVTD) hesaplanır.

Validasyon ve Kritik Değerlendirme

Daisy II sistemi, Tilley ve Terry yöntemiyle yüksek korelasyon ($r > 0.90$) gösterse de, bazı çalışmalarda sindirilebilirliği geleneksel yöntemlere göre %1-3 oranında daha yüksek tahmin ettiği rapor edilmiştir. Bu durumun, çok ince öğütülmüş yem partiküllerinin torba gözeneklerinden dışarı sızması (washout effect) veya sürekli rotasyonun sağladığı daha etkin mekanik aşınmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu hatayı minimize etmek için numunelerin çok ince öğütülmemesi ve standart bir elek çapının (genellikle 1 mm veya 2 mm) kullanılması önerilir. Sistemin en büyük avantajı, iş gücü maliyetini %50'den fazla azaltması ve tek bir teknisyenin günde yüzlerce numuneyi analiz edebilmesidir.

Enzimatik (Biyolojik Olmayan) Yöntemler

Rumen sıvısı kullanımının getirdiği standardizasyon sorunları (inokulumun günden güne değişmesi) ve donör hayvan gereksinimi, araştırmacıları tamamen kimyasal ve enzimatik yöntemlere yöneltmiştir. Bu yöntemler, rumen mikroorganizmalarının hidrolitik aktivitesini ticari enzim preparatları (selüloz, hemiselüloz, amilaz, proteaz) kullanarak taklit etmeyi amaçlar.

Pepsin-Selüloz Yöntemi (Jones ve Hayward, 1975)

Bu yöntem, Tilley ve Terry'nin tersine çevrilmiş halidir. Önce pepsin ile proteinler uzaklaştırılır, ardından selüloz ile lifler sindirilir.

Pepsin Aşaması: Numune, asidik ortamda (0.1 N HCl) pepsin ile 24 saat 40°C'de inkübe edilir. Bu ön işlem, hücre duvarı matriksindeki proteinleri parçalayarak selülozu enzimlere daha açık hale getirir.

Selülaaz Aşaması: *Trichoderma viride* mantarından elde edilen selülaaz enzimi, asetat tamponu (pH 4.8) içinde numuneye eklenir ve 48 saat 40°C'de inkübe edilir (Jones & Hayward, 1975).

Bu yöntem, özellikle çayır otları (grasses) için *in vivo* sindirilebilirlikle mükemmel bir uyum ($r = 0.96$) gösterir. Ancak baklagillerde ve odunlaşmış materyallerde, fungal selülaazların lignoselülozik bağları kırma yeteneği rumen bakterilerine (özellikle mantar ve esteraz aktivitesi) göre daha zayıf olduğundan, sindirilebilirliği olduğundan düşük tahmin edebilir. Bu sapmayı düzeltmek için regresyon denklemleri kullanılır.

De Boever Yöntemi (Selülaaz-Gamanaz ve Isıl İşlem)

Özellikle nişasta ve protein içeriği yüksek olan karma yemlerin (fabrika yemleri) enerji değerini belirlemek için Jones ve Hayward yöntemi yetersiz kalmıştır. De Boever & ark., (1986), yöntemi nişasta hidrolizini kapsayacak şekilde geliştirmişlerdir. Bu yöntem Belçika ve Hollanda gibi ülkelerde yasal yem analiz standardı haline gelmiştir.

Prosedürün Kritik Aşamaları

Pepsin-HCl Hidrolizi: 24 saat, 40°C.

Nişasta Jelatinizasyonu (Isıl İşlem): Pepsin aşamasından sonra, tüpler 80°C'de 45 dakika tutulur. Bu adım, kristalize nişasta granüllerinin şişmesini ve patlamasını (jelatinizasyon) sağlar. Jelatinize olmayan nişasta, enzimler tarafından tam olarak parçalanamaz.

Enzimatik Hidroliz: Soğutulan numunelere, selülozün yanı sıra Gamanaz (hemiselüloz aktivitesi yüksek) ve Amilaz içeren enzim kokteyli eklenir. pH 4.8'de 24-48 saat inkübe edilir. Bu yöntemle elde edilen "Enzimatik Organik Madde Sindirilebilirliği" (EOMD), *in vivo* değerlerle yüksek korelasyon gösterir ve karma yemlerin enerji değerini tahmin etmede gaz üretim tekniğine güçlü bir alternatiftir (De Boever & ark., 1986).

Karşılaştırmalı Analiz ve İn Vivo Validasyon

Hangi yöntemin seçileceği, çalışmanın amacına bağlıdır. Aşağıdaki tablo, yöntemlerin temel özelliklerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tablo 2. Yaygın İn Vitro Yöntemlerin Karşılaştırılması

Özellik	Tilley & Terry (İki Aşamalı)	Gaz Üretim Tekniği (Menke)	Ankom Daisy II İnkübatör	Enzimatik Yöntemler (De Boever)
Prensip	Gravimetrik (Kalıntı tartımı)	Manometrik/Hacimsel (Gaz)	Gravimetrik (Filtre torba)	Gravimetrik (Enzimatik hidroliz)
İnokulum	Rumen Sıvısı	Rumen Sıvısı (veya Dışkı)	Rumen Sıvısı	Ticari Enzimler (Standardize)
Çıktı Verisi	IVOMD (Sindirilebilirlik)	Gaz (mL), ME, NEL, Kinetik	IVTD, IVNDFD	EOMD (Enzimatik Sind.)
Kapasite	Düşük (Manuel tüp)	Orta/Yüksek	Çok Yüksek (>100/run)	Yüksek
Donör İhtiyacı	Evet (Zorunlu)	Evet	Evet	Hayır (Büyük avantaj)
Maliyet	Orta	Düşük (Kurulum sonrası)	Düşük (Torba hariç)	Yüksek (Enzim maliyeti)
Doğruluk (r)	> 0.90 (Referans Yöntem)	> 0.90 (Enerji Tahmini)	> 0.90 (Sıralama için)	0.80 - 0.95 (Yem türüne bağlı)

Kitessa, Flinn & Irish, (1999), farklı laboratuvar yöntemlerini *in vivo* verilerle karşılaştırdıklarında, pepsin-selüloz yönteminin *in vivo* sindirilebilirliği olduğundan düşük, Daisy II yönteminin ise yüksek tahmin ettiğini bulmuşlardır. Ancak, regresyon düzeltmeleri yapıldığında (kalibrasyon), tüm yöntemler *in vivo* değerleri başarıyla tahmin edebilmektedir. Menke denklemleri ise, özellikle enerji (ME) tahmininde, kimyasal analizlere (HP, NDF) dayalı tahminlerden çok daha üstün sonuçlar vermektedir ($R^2 = 0.94$) (Menke & Steingass, 1988).

Gelecek Perspektifleri: Mikrobiyom ve Sürdürülebilirlik

In vitro sistemler, günümüzde sadece besin değeri belirlemenin ötesine geçerek, küresel hayvancılık sorunlarına çözüm arayan platformlara dönüşmüştür.

Metan Azaltma Stratejileri: *In vitro* gaz üretim sistemi, binlerce bitki ekstraktının, esansiyel yağın (örn. sarımsak yağı, tanenler) ve kimyasal katkının enterik metan üretimini düşürme potansiyelini taramak (screening) için birincil araçtır. Bu çalışmalar, *in vivo* denemelere geçilmeden önce en etkili adayların belirlenmesini sağlar.

Rumen Mikrobiyomu ve "Omics": *In vitro* inkübasyon sıvılarından alınan örneklerle yapılan metagenomik (DNA) ve metatranskriptomik (RNA) analizler, spesifik yem maddelerinin mikrobiyal kompozisyon üzerindeki etkisini moleküler düzeyde ortaya koymaktadır. Örneğin, bir katkı maddesinin metanojen arkeleri baskımlarken selüloolitik bakterilere zarar verip vermediği bu yöntemlerle anlaşılabilir.

Otomasyon ve Büyük Veri: Otomatik gaz ölçüm sistemleri ve robotik analizörlerin entegrasyonu, veri üretim hızını artırmakta ve

yapay zeka (makine öğrenmesi) algoritmaları ile yem değerlerinin daha hassas tahmin edilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç

Ruminant beslemede *in vitro* yem analiz sistemleri, *in vivo* denemelerin zorluklarını aşarak, bilimsel araştırmaların ve pratik rasyon formülasyonlarının temelini oluşturan verileri sağlamaktadır. Tilley ve Terry yöntemi sindirilebilirlik için tarihsel bir referans olmaya devam ederken, Menke Gaz Üretim tekniği enerji tahmini ve fermantasyon dinamiğinin anlaşılmasında eşsizdir. Daisy II sistemi, rutin analiz laboratuvarları için yüksek kapasiteli bir çözüm sunarken, enzimatik yöntemler standardizasyon ve hayvan refahı açısından öne çıkmaktadır. Gelecekte, bu sistemlerin moleküler biyoloji teknikleriyle entegrasyonu, rumen ekolojisinin daha iyi anlaşılmasını ve çevre dostu, verimli besleme stratejilerinin geliştirilmesini sağlayacaktır.

Kaynakça

Alexander, R. H., & McGowan, M. (1966). The routine determination of in vitro digestibility of organic matter in forages: An investigation of the problems associated with continuous large-scale operation. *Journal of the British Grassland Society*, 21(2), 140–147. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1966.tb00462.x>

De Boever, J. L., Cottyn, B. G., Buysse, F. X., Wainman, F. W., & Vanacker, J. M. (1986). The use of an enzymatic technique to predict digestibility, metabolizable and net energy of compound feedstuffs for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 14(3–4), 203–214. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(86\)90095-2](https://doi.org/10.1016/0377-8401(86)90095-2)

El Shaer, H. M., Omed, H. M., Chamberlain, A. G., & Axford, R. F. E. (1987). Use of faecal organisms from sheep for the in vitro determination of digestibility. *The Journal of Agricultural Science*, 109(2), 257–259.

Getachew, G., Robinson, P. H., DePeters, E. J., & Taylor, S. J. (2004). Relationships between chemical composition, dry matter degradation and in vitro gas production of several ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 111(1–4), 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2003.08.006>

Jones, D. I. H., & Hayward, M. V. (1975). The effect of pepsin pretreatment of herbage on the prediction of dry matter digestibility from solubility in fungal cellulase solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26(5), 711–718. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740260519>

Kitessa, S., Flinn, P. C., & Irish, G. G. (1999). Comparison of methods used to predict the in vivo digestibility of feeds in ruminants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50(6), 825–842. <https://doi.org/10.1071/AR98169>

Lana, R. P., Russell, J. B., & Van Amburgh, M. E. (1998). The role of pH in regulating ruminal methane and ammonia production. *Journal of Animal Science*, 76(8), 2190–2196. <https://doi.org/10.2527/1998.7682190x>

McDougall, E. I. (1948). Studies on ruminant saliva. 1. The composition and output of sheep's saliva. *Biochemical Journal*, 43(1), 99–109. <https://doi.org/10.1042/bj0430099>

Menke, K. H., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D., & Schneider, W. (1979). The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro. *The Journal of Agricultural Science*, 93(1), 217–222. <https://doi.org/10.1017/S0021859600086305>

Menke, K. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7–55.

Mould, F. L., Morgan, R., Kliem, K. E., & Krystallidou, E. (2005). A review and simplification of the in vitro incubation medium. *Animal Feed Science and Technology*, 123, 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.04.031>

Nagadi, S., Herrero, M., & Jessop, N. S. (2000). The effect of diet of donor animal on in vitro gas production profiles. *Animal Science*, 70, 156–157.

Ørskov, E. R., & McDonald, I. (1979). The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. *The Journal of Agricultural Science*, 92(2), 499–503. <https://doi.org/10.1017/S0021859600063048>

Rymer, C., Huntington, J. A., Williams, B. A., & Givens, D. I. (2005). In vitro cumulative gas production techniques: History, methodological considerations and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 123–124, 9–30. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.04.006>

Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., & France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48(3–4), 185–197. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)90171-6](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)90171-6)

Tilley, J. M. A., & Terry, R. A. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Journal of the British Grassland Society*, 18(2), 104–111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>

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

BÖLÜM 5

SÜT SIĞIRLARINDA MİKOTOKSİN MADDELER

1. PROF. DR. İSMAİL ÜLGER¹

2. ARŞ. GÖR. HÜSEYİN MERT YÜKSEL²

Giriş

Mikotoksinler, çeşitli küf türleri tarafından sentezlenen ve hayvan sağlığı ile üretim performansı üzerinde olumsuz etkilere sahip olan toksik sekonder metabolitlerdir. Kimyasal yapılarına, üretici mantar türüne ve etki mekanizmalarına bağlı olarak farklı gruplara ayrılan bu bileşikler, özellikle *Aspergillus*, *Fusarium* ve *Penicillium* cinsi mantarlar tarafından üretilmektedir (Kaya, 1987; Seglar, 2001; Hussein ve Brasel, 2001). Küf gelişimi ve mikotoksin oluşumu; yem bitkilerinin yetiştirme döneminden başlayarak hasat, depolama, işleme ve yemleme aşamalarının her birinde ortaya çıkabilmekte; sıcaklık, nem, mekanik hasar ve yetersiz depolama koşulları bu süreci önemli ölçüde hızlandırmaktadır. Nitekim dünya genelinde üretilen tahıl ve yağlı tohumların önemli bir kısmının farklı düzeylerde mikotoksinlerle kontamine olduğu ve bu durumun hayvansal üretimde sürekli bir risk unsuru oluşturduğu

¹ Prof. Dr. İsmail ÜLGER, Ziraat Fakültesi, Zootečni, Orcid: 0000-0002-9400-6459

² Arş. Gör. Hüseyin Mert YÜKSEL, Ziraat Fakültesi, Zootečni, Orcid: 0000-0002-9429-8877

bildirilmektedir (Jelinek, 1987; Fink-Gremmels, 1999; Yiannikouris ve Jouany, 2002).

Süt sığırları açısından önem taşıyan başlıca mikotoksinler arasında aflatoksinler, deoksinivalenol (DON), T-2 toksini, zearalenon, fumonisinler ve okratoksin A yer almaktadır. Bu toksinlerin büyük bir kısmı tarla koşullarında veya uygun olmayan depolama süreçlerinde oluşmakta; kontamine yemlerin çoğunlukla birden fazla mikotoksin içermesi nedeniyle toksik etkiler birbirini güçlendirebilmektedir. Özellikle sıcak ve kurak iklim koşullarında *Aspergillus flavus* kaynaklı aflatoksin oluşumunun arttığı; *Fusarium* türlerinin ise mısır ve küçük taneli tahıllarda yaygın hastalıklara ve buna bağlı mikotoksin kontaminasyonuna yol açtığı bilinmektedir. *Penicillium* türleri ise daha çok serin ve nemli depolama koşullarında gelişerek toksin üretimini sürdürebilmektedir.

Son yıllarda genetik seleksiyon ve besleme yönetimindeki ilerlemeler sayesinde süt sığırlarında laktasyon başına süt verimi önemli ölçüde artmış olsa da, bu durum beraberinde metabolik ve bağışıklıkla ilişkili sağlık sorunlarının daha sık görülmesine neden olmuştur. Özellikle geçiş dönemi ve erken laktasyon, hayvanların yoğun metabolik stres altında bulunduğu kritik evreler olup; bu dönemlerde yem tüketiminin azalması, negatif enerji dengesi, mineral mobilizasyonu ve bağışıklık sisteminin baskılanması yaygın olarak görülmektedir. Yüksek verimli ineklerde bu fizyolojik zorluklar, mastitis, ketozis, süt humması, rumen asidozu ve üreme performansında düşüş gibi sorunlarla birlikte seyretmektedir (Geelen ve Wensing, 2006; Goff, 2006).

Bu fizyolojik hassasiyet ortamında, rasyonlarla alınan mikotoksinler çoğu zaman göz ardı edilen ancak hayvan sağlığı ve verim kayıplarına önemli katkılar sağlayan etmenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikotoksinler; yem tüketiminin azalması, besin maddelerinin sindirim ve emiliminin bozulması, endokrin fonksiyonlarda değişiklikler ve bağışıklık sisteminin baskılanması

gibi mekanizmalar yoluyla hem akut hem de kronik etkiler gösterebilmektedir (Coulombe, 1993; Pier, 1992). Klinik belirtiler çoğu zaman özgül olmayıp, düşük süt verimi, zayıf kondisyon, döl veriminde bozulma ve artmış hastalık insidansı gibi dolaylı bulgularla ortaya çıkmakta; bu durum mikotoksikozislerin saha koşullarında tanısını güçleştirmektedir.

Bu derlemenin amacı, süt sığırı rasyonlarında bulunan mikotoksinlerin, özellikle geçiş dönemi ve erken laktasyon gibi stresli dönemlerde, beslenmeye bağlı dengesizlikler ve metabolik hastalıklarla etkileşimini ortaya koymak; mikotoksinlerin çoğu zaman karıştırıcı bir faktör olarak değerlendirilmesine karşın, bazı durumlarda sağlık ve üretim sorunlarının doğrudan nedeni olabileceğini vurgulamaktır.

HAYVAN YEMLERİNDE KÜFLER VE MİKOTOKSİNLERİN GENEL ÇERÇEVESİ

Küfler, doğal çevrenin ayrılmaz bir parçası olan geniş bir mantar grubunu ifade eder ve bitkisel kökenli organik materyalin parçalanmasında önemli ekolojik işlevler üstlenir. Bununla birlikte, bitkilerin veya yem materyallerinin küflerle kontaminasyonu; yem hijyeni, hayvan sağlığı ve verimliliği açısından önemli riskler doğurur (CAST, 2003). Küflerin ürettiği sekonder metabolitlerin bir kısmı terapötik amaçlarla kullanılabilse de (örn. mikofenolik asit gibi), yem ve gıdalarda yer aldıklarında hayvanlarda zehirlenmeye yol açabilmeleri nedeniyle “mikotoksin” olarak değerlendirilir (Osweiler, 2000; CAST, 2003). Ayrıca mikotoksinlerin gerçek sayısı kesin olarak bilinmemektedir; yeni fungal metabolitlerin tanımlanması sürmekte ve bunların klinik sendromlara katkısı araştırılmaktadır (Bacon ve ark., 1996; Kamyar ve ark., 2004; Odriozola ve ark., 2005).

Mikotoksinler, süt sığırlarında çoğu zaman subklinik seyreden; ancak süt verimi, döl verimi, metabolik denge ve

bağıışıklık üzerinde belirgin ekonomik kayıplara yol açabilen bir risk alanıdır. Ruminantlar rumen mikroflorasının detoksifikasyon kapasitesi nedeniyle genel olarak daha dayanıklı kabul edilse de bu kapasite sınırsız değildir; rasyon değışiklikleri, rumen asidozu ve stres koşulları detoksifikasyonu zayıflatabilir (Kiessling ve ark., 1984; Jouany ve Díaz, 2005; Fink-Gremmels, 2008).

KÜF KONTAMİNASYONU VE YEM TÜKETİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Çiftlik koşullarında depolanan veya silolanan yemlerde küf gelişimi sık karşılaşılan bir durumdur. Depolama florası; coğrafya ve iklimle bağılı olarak *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Monascus*, *Trichoderma*, *Mucor* ve diğere bazı cinsleri içerebilir. Bu mikroorganizmalar metabolizmaları sırasında “küflü yem”e özgü kokuyu oluşturan mikrobiyal uçucu organik bileşikler (MVOC) üretir; bunlar sığırlarda yemden kaçınma davranışını artırarak yem tüketiminde azalma ve yemleme süresinde uzama ile sonuçlanabilir (Fiedler ve ark., 2001). Özellikle süt sığırlarında enerji gereksiniminin kritik olduğu dönemlerde (geçiş dönemi/erken laktasyon), küflü yeme karşı gelişen bu kaçınma davranışı negatif enerji dengesini derinleştirebilir.

Kuru ot, haylaj ve saman gibi kuru materyallerde küf gelişimi; spor yükü yüksek toz fraksiyonunu artırarak solunum sistemi üzerinde irritan/proinflamatuar bir uyarı oluşturabilir. Ayrıca bazı küf türlerinin (özellikle *Aspergillus fumigatus*) enfeksiyon etkeni olabilmesi, kontamine yemlerin yalnızca toksin değil aynı zamanda mikozis riski de taşıdığını göstermektedir (Bartels ve ark., 1999; Melo dos Santos ve ark., 2003).

MİKOTOKSİNLERİN ETKİ MEKANİZMALARI VE RUMEN MİKROFLORASI İLE ETKİLEŞİMİ

Mikotoksinler süt sığırlarında etkilerini birden fazla yol üzerinden gösterebilir. Genel olarak; yemlerin besleyici değerini

azaltma, sindirim kanalında irritasyon/yanğı oluşturma, endokrin sistemi etkileme, rumen mikroorganizmalarının metabolik aktivitesini baskılama ve bağışıklık sistemini baskı altına alma temel mekanizmalar arasında sayılmaktadır (Whitlow ve Hagler, 2005; şahindokuyucu ve ark., 2010).

Ruminantlarda rumen mikroflorası ve mikrofauna “ilk savunma hattı” olarak değerlendirilir. Bazı mikotoksinler rumende daha az toksik metabolitlere dđnüştürülebilir (ör. aflatoksin → aflatoksikol; okratoksin A → okratoksin- α ; trikotesenler → de-epoksi metabolitler) (Kiessling ve ark., 1984; Jouany ve Dıaz, 2005). Ancak tüm mikotoksinler için bu dđnüşüm geçerli değildir. Örneğin fumonisinlerin büyük ölçüde değişmeden geçebildiği; zearalenonun ise daha güçlü östrojenik metabolitlerden biri olan α -zearalenol’e dđnüşebildięi bildirilmektedir (Caloni ve ark., 2000; Dänicke ve ark., 2005).

Detoksifikasyon kapasitesinde protozoaların rolü vurgulanmakla birlikte, bu kapasite rumen ekosisteminin bütününe bağlıdır. Rumen protozoa popölasyonunun azalması (ör. asidoz/yoğun konsantre yemleme gibi durumlarda) mikotoksinlerin daha fazla “yıkımdan kaçmasına” ve bağırsaklardan emilerek sistemik etki göstermesine zemin hazırlayabilir (Yiannikouris ve Jouany, 2002; Fink-Gremmels, 2008).

Öte yandan, mikotoksinlerin kendisi de rumen mikroflorasını bozabilir. Patulin gibi antimikrobiyal özellikli toksinlerin; uçucu yağ asidi üretimi, asetat oluşumu ve protein sentezi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiği; selülozinin baskılanması yoluyla kaba yem sindirimini düşürebildiği bildirilmiştir (Escoula, 1992; Tapia ve ark., 2002; Morgavi ve ark., 2003). Ayrıca bazı Fusarium metabolitlerinin (örn. fuzarik asit) rumen bakterileri ve metanojenleri baskılayabildiği gösterilmiştir (May ve ark., 2000). Bu bulgular, saha koşullarında küflü silaj tüketimini takiben görölen rumen doluluğunda azalma, yemden yararlanmanın bozulması, hafif ishal,

süt veriminde kayıp ve subklinik mastitis insidansında artış gibi gözlemlerle uyumludur (Hadley ve ark., 2006; Wenz ve ark., 2007).

KLİNİK VE SUBKLİNİK MİKOTOKSİKOZİS: NEDEN TANISI ZORDUR?

Süt sığırlarında mikotoksikozis olgularında spesifik/tek bir belirti çoğu zaman bulunmadığından klinik tanı güçtür. Bu nedenle şüpheli durumlarda yem analizi önem kazanır (Whitlow ve Hagler, 2005; Şahindokuyucu ve ark., 2010). Klinik belirtiler geniş bir yelpazede görülebilir: süt veriminde düşme, yem tüketiminde azalma/yem reddi, aralıklı ishal (koyu renkli veya kanlı dışkı), tüy örtüsünde bozulma, kondisyon kaybı, döl veriminde azalma, düzensiz östrüs, embriyonik ölümler ve abortuslar gibi bulgular sık rapor edilmektedir (Whitlow ve ark., 2000; Fink-Gremmels, 2008).

Buna ek olarak; topallık/ayak hastalıkları (subklinik laminitis dâhil), abomasum deplasmanı, ketozis, plasentanın atılamaması, uterus yangısı (metritis), mastitis ve karaciğer yağlanması gibi üretim hastalıklarının sıklığında artış bildirilmektedir (Whitlow ve Hagler, 2004; Whitlow ve Hagler, 2005; Şahindokuyucu ve ark., 2010). Bu tabloların önemli bir kısmı “tek bir toksinden” ziyade çoklu mikotoksin maruziyeti ve eşlik eden stres faktörleriyle birlikte ortaya çıkabilmektedir.

KÜFLERİN ENFEKSİYON OLUŞTURMASI: MIKOZİS VE MİKOTOKSİNLERLE ETKİLEŞİMİ

Küflerin neden olduğu enfeksiyonlar mikozis olarak adlandırılmaktadır. Fungal patojenler arasında *Aspergillus fumigatus*, *Candida* spp. ve bazı *Fusarium* türleri yer alır. Özellikle *Aspergillus fumigatus*, süt sığırlarında mikotik hemorajik bağırsak sendromu (HBS) ile ilişkilendirilen etkenler arasında öne çıkmıştır (Puntenney ve ark., 2003). *A. fumigatus*’un kuru ot ve silajlarda yaygın bulunabilmesi, yem hijyeninin enfeksiyon riski açısından da

kritik olduğunu göstermektedir (Shadmi ve ark., 1974; Cole ve ark., 1977).

Erken laktasyon dönemi gibi bağışıklığın baskılandığı dönemlerde ineklerin mikotik enfeksiyonlara yatkınlığı artar (Kehrli ve ark., 1989a,b). Bu noktada mikotoksinlerin bağışıklık baskılayıcı etkisi, fungal enfektiviteyi artırarak bir “kısır döngü” oluşturabilir. Örneğin *A. fumigatus*’un gliotoksin üretebildiği, gliotoksinin enfekte hayvanlarda saptandığı ve virülansa katkı sağlayabildiği bildirilmiştir (Bauer ve ark., 1989; Reeves ve ark., 2004). Ayrıca T-2 toksini gibi immün baskılayıcı toksinlerin, fagositoz gibi savunma mekanizmalarını zayıflatarak aspergillozisin şiddetini artırabildiği gösterilmiştir (Niyo ve ark., 1988a,b). Bu çerçevede, mikotoksin maruziyetinin azaltılması HBS ve benzeri mikozislerin kontrolünde temel stratejilerden biri olarak değerlendirilebilir; bazı antifungal/adsorban özellikli yem katkılarının HBS insidansını azaltabildiği de bildirilmiştir (Puntenney ve ark., 2003).

BAŞLICA MİKOTOKSİNLER VE SÜT SİĞİRLARINDA ÖNEMİ

Aspergillus Toksinleri: Aflatoksinler

Aflatoksinler başlıca *Aspergillus flavus* ve *A. parasiticus* tarafından üretilen; toksik, mutajenik ve karsinojenik özellikleriyle öne çıkan bileşiklerdir (D’Mello ve Macdonald, 1997; Diener ve ark., 1987; Kurtzman ve ark., 1987). Aflatoksin B₁ (AFB₁) güçlü bir karaciğer karsinojeni olup, IARC tarafından Grup 1 kanserojen sınıfında değerlendirilmiştir (IARC, 1993). Aflatoksinler; mısır, pamuk tohumu, yer fıstığı gibi yem hammaddelerinde daha sık görülür ve iklim/nem koşullarına bağlı olarak farklı yıllarda daha geniş coğrafyalarda da sorun oluşturabilir (Russell ve ark., 1991).

Ruminantlarda AFB₁’in rumende sınırlı düzeyde aflatoksikole dönüşebildiği; bununla birlikte AFB₁’in bir kısmının rumen yıkımından kaçtığı ve karaciğerde metabolize edilerek

aflatoksin M₁ (AFM₁) formunda süte atılabildiği bildirilmektedir (Nakazato ve ark., 1990; Kuilman ve ark., 2000). Sütteki AFM₁ varlığı, halk sağlığı ve mevzuat açısından kritik bir konudur. Aflatoksin maruziyeti; yem tüketiminde azalma, yemden yararlanmanın bozulması, süt veriminde düşüş, sarılık ve karaciğer hasarı ile ilişkili olup; ayrıca bağışıklığı baskılayarak enfeksiyonlara duyarlılığı artırabilir (Diekman ve Green, 1992; Whitlow ve Hagler, 2005). Saha koşullarında aflatoksinsiz rasyona geçişin süt veriminde belirgin artış sağlayabildiği rapor edilmiştir (Guthrie ve Bedell, 1981). Ayrıca bazı sürülerde topallık ve fertilitite bozukluklarının aflatoksin varlığı ile ilişkili olabileceğine dair bulgular bildirilmiştir.

Fusarium Toksinleri

Deoksinivalenol (DON)

DON (vakitoksin/vomitoksin), Fusarium türleri tarafından üretilen ve yemlerde yaygın saptanan bir trikotesendir (D'Mello ve Macdonald, 1997). Ruminantlarda DON'un rumende de-epoksi metabolite dönüşmesi genellikle toksisiteyi azaltır; bu durum ruminantların görece toleransını açıklayan temel mekanizmalardan biridir (Yiannikouris ve Jouany, 2002; Fink-Gremmels, 2008). Bununla birlikte saha gözlemleri, DON kontaminasyonunun düşük performansla ilişkili olabileceğini; ancak tek başına net bir neden-sonuç ilişkisinin her zaman kurulamadığını göstermektedir (Whitlow ve ark., 1994). Bu belirsizlik, çoğu zaman DON'un "tek başına" değil, çoklu mikotoksin karışımlarının bir bileşeni olarak bulunmasıyla açıklanmaktadır. Nitekim doğal kontaminasyonlu yemlerde gözlenen etkilerin, saf DON ilavesine göre daha belirgin olabildiği; bunun da mikotoksin etkileşimleriyle ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Foster ve ark., 1986; Smith ve MacDonald, 1991). Bu nedenle DON, bazı durumlarda "marker" toksin gibi değerlendirilerek, yemin küf gelişimine elverişli koşullara maruz kaldığını ve başka toksinlerin de bulunabileceğini işaret eden bir gösterge olarak ele alınmaktadır.

T-2 Toksini

T-2 toksini özellikle *Fusarium* türleri tarafından üretilen, güçlü sitotoksik etkileri ile bilinen bir tip A trikotesendir (D'Mello ve Macdonald, 1997). Rumen sıvısında daha az toksik metabolitlere dönüşebilse de, belirli koşullarda sindirim kanalında ciddi irritasyon, ülserasyon, kanama, yem reddi, süt veriminde düşüş, üreme problemleri ve hatta ölümle ilişkilendirilen vakalar bildirilmiştir (Pier ve ark., 1980; Whitlow ve Hagler, 2005; Şahindokuyucu ve ark., 2010). Ayrıca T-2'nin bağışıklık sistemi üzerinde baskılayıcı etkileri; immünoglobulin/kompleman düzeylerinde azalma, lökosit ve nötrofil sayılarında düşme gibi parametrelerle ortaya konmuştur (Mann ve ark., 1983; Gentry ve ark., 1984; McLaughlin ve ark., 1977).

Zearalenon (ZEA)

Zearalenon, östrojenik etkili bir *Fusarium* toksinidir ve mısır başta olmak üzere çeşitli tahıl ve kaba yemlerde bulunabilir (D'Mello ve Macdonald, 1997; Zinedine ve Mañes, 2009). Rumen metabolizması zearalenonu α - ve β -zearalenol'e dönüştürebilir; özellikle α -zearalenol'ün daha güçlü östrojenik aktivite gösterebildiği bilinmektedir (Yiannikouris ve Jouany, 2002; Fink-Gremmels, 2008). Saha koşullarında ZEA maruziyeti; düzensiz östrüs, fertilitede düşüş, vulvovajinit/vajinal akıntı, düvelerde meme dokusunda büyüme, abortus ve süt veriminde azalma gibi üreme odaklı klinik tablolarla ilişkilendirilmektedir (Coppock ve ark., 1990; Kallela ve Ettala, 1984). Ancak kontrollü çalışmalarda saha gözlemlerindeki şiddetin her zaman yeniden üretilmemesi, yine çoklu toksin etkisi ve çevresel/stres faktörleriyle etkileşime işaret etmektedir.

Fumonisinler (özellikle FB₁)

Fumonisinler (özellikle FB₁) *Fusarium verticillioides* tarafından üretilir ve daha çok mısır ve mısır yan ürünlerinde

görülür. FBı'ın rumende mikrobiyal yıkıma dirençli olabildiği; oral biyoyararlanımının ise düşük olduğu bildirilmektedir (Caloni ve ark., 2000). Buna rağmen süt sığırlarında üretim stresi nedeniyle fumonisinlere duyarlılığın artabileceği; yem tüketimindeki düşüş üzerinden süt veriminde belirgin kayıplar meydana gelebileceği rapor edilmiştir (Díaz ve ark., 2000). Fumonisinlerin mekanizması; sfingolipit biyosentezinin inhibisyonu üzerinden hücrel membran ve özellikle sfingolipitten zengin dokularda fonksiyon bozukluğu oluşturmasıyla açıklanmaktadır (Chu ve Li, 1994; Rheeder ve ark., 1992). Süte geçişin ise genellikle çok düşük/ihtimal edilebilir düzeyde olduğu bildirilmektedir (Scott ve ark., 1994).

Penicillium Toksinleri: Okratoksinler

Okratoksinler başta *Penicillium viridicatum* ve *P. cyclopium* (ve bazı *Aspergillus* türleri) tarafından üretilir (D'Mello ve Macdonald, 1997). Okratoksin A (OTA) rumende büyük ölçüde parçalanarak okratoksin- α 'ya dönüşür ve bu dönüşüm ruminantların görece toleransını açıklar (Yiannikouris ve Jouany, 2002). Buna rağmen yüksek maruziyetlerde ishal, dehidratasyon, su tüketiminde artış, böbrek hasarı ve süt üretiminde azalma gibi bulgular rapor edilmiştir; preruminantlar ve genç hayvanların daha riskli olabileceği vurgulanmaktadır (Whitlow ve Hagler, 2005; Şahindokuyucu ve ark., 2010). Bazı çalışmalarda OTA ve metabolitlerinin süte geçebildiği bildirilmiştir.

DİĞER ÖNEMLİ MİKOTOKSİN GRUPLARI VE KLİNİK SENDROMLAR

Klinik mikotoksikozisler yalnızca "klasik" toksinlerle sınırlı değildir. Rumen tarafından inaktive edilemeyen veya sınırlı inaktive edilen bazı toksin sınıfları; özellikle ergot alkaloidleri ve endofit toksinleri (örn. fescue toksikozisi, ryegrass staggers) gibi sendromlarla ilişkili olabilir (Cheeke, 1995; Botha ve ark., 2004). Ayrıca bazı baklagillerde *Rhizoctonia leguminicola* kaynaklı

slaframin gibi metabolitler “salya akması” tablosu ile ilişkilendirilmektedir (Hibbard ve ark., 1995; Le Bars ve Le Bars, 1996). Patulin gibi bazı lakton türevleri ise hem antimikrobiyal etkileriyle rumen fonksiyonunu bozabilir hem de yüksek maruziyette nörotoksik belirtilere yol açabilir (Kellerman ve ark., 1984; Sabater-Vilar ve ark., 2004). Bu çeşitlilik, sahada gözlenen tablonun sıklıkla “tek bir toksin” ile açıklanamamasının temel nedenlerinden biridir.

SİLAJDA MİKOTOKSİNLER: GÖZ ARDI EDİLEN BİR RİSK

Saha koşullarında özellikle silaj kaynaklı mikotoksin maruziyetinin, analitik sonuçlarla her zaman birebir örtüşmeyen sağlık ve performans sorunlarına yol açabildiği bildirilmiştir (O’Brien ve ark., 2006). Silaj; hasat öncesi *Fusarium* kaynaklı kontaminasyonun yanı sıra, hasat sonrası dönemde silajlarda yaygın bulunan *Penicillium*, *Aspergillus*, *Monascus* ve *Trichoderma* gibi türlerin ürettiği toksinleri içeren karmaşık bir karışım barındırabilir (Cole ve ark., 1977; Boysen ve ark., 2000; Garon ve ark., 2006). Antimikrobiyal etkili bu toksinler rumen mikroflorasını bozarak disbiyozise ve buna bağlı “malnütrisyon benzeri” bir tabloya, yemden yararlanmanın düşmesine, hafif ishale, canlı ağırlık kaybına ve süt veriminde azalmaya zemin hazırlayabilir (Escoula, 1992; Puel ve ark., 2005). Bu süreçte rumen detoksifikasyon kapasitesi zayıfladıkça, konsantre yemlerden gelen diğer mikotoksinlerin emilim oranı artabilir ve toplam mikotoksin yükü beklenenden yüksek bir metabolik baskı oluşturabilir. Bu durum, özellikle geçiş dönemi gibi metabolik/hormonal değişimlerin yoğun olduğu evrelerde daha belirgin hale gelebilir.

MİKOTOKSİN ANALİZLERİ: ÖRNEKLEME SORUNU VE YORUMLAMA GÜÇLÜĞÜ

Mikotoksin analiz yöntemleri gelişmekte, çoklu toksin taramaları yapan ticari laboratuvarlar yaygınlaşmaktadır. Bununla birlikte, saha uygulamalarında en kritik sorunlardan biri temsili örneklemedir. Küfler, yem yığınının belirli bölgelerinde çok yüksek düzeyde toksin üretebildiğinden, aynı parti içinde mikotoksin dağılımı son derece heterojen olabilir (Whitaker ve ark., 1991). Ayrıca örnek alındıktan sonra da numune içinde küf gelişimi devam edebileceğinden, numunelerin uygun koşullarda (kurutma/dondurma vb.) muhafazası önem taşır. Bu nedenle “kabul edilebilir” düzeyler belirlenirken; yem içi düzensiz dağılım, örnekleme belirsizliği, çoklu toksin varlığı ve toksisiteyi etkileyen etkileşimler dikkate alınarak ihtiyatlı yaklaşım önerilmektedir (Hamilton, 1984).

ÖNLEME VE KONTROL STRATEJİLERİ

Mikotoksinler oluştuktan sonra tamamen ortadan kaldırmaya yönelik pratik yöntemler sınırlı olduğundan, en etkili yaklaşım önlemedir. Silajda mikotoksin riskini azaltmada temel hedef; bozulmayı önlemek, pH'nın hızla düşmesini sağlamak ve oksijeni ortamdaki uzaklaştırmaktır. Depolama hijyeni, uygun nem düzeyleri, silo boyutunun sürü büyüklüğüne uygun seçimi ve silajın bozulma hızından daha hızlı tüketilmesi gibi yönetim uygulamaları kritik önem taşır. Kuru yemlerin düşük nem düzeylerinde depolanması, depoların havalandırılması ve yemliklerin düzenli temizliği de küf gelişimini sınırlamada yardımcıdır.

Kontaminasyonun yüksek olduğu durumlarda temel strateji, mümkünse küflenmiş yemlerin kullanılmaması; mümkün değilse kontamine partinin rasyondan çıkarılması veya seyreltilmesidir. Bazı katkı maddeleri (örn. propiyonik asit, sorbik asit, amonyak uygulamaları ve bazı mikrobiyal/enzimatik katkılar) küf gelişimini

kısmen baskılayabilir. Mikotoksin etkilerini azaltmaya yönelik olarak kil bazlı adsorbanlar (bentonitler), glukomannanlar veya mannanoligosakkaritler gibi bağlayıcılar üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve süt sığırlarında bazı ürünlerle umut verici sonuçlar rapor edilmiştir (Huwig ve ark., 2001). Bununla birlikte, mikotoksikozislerin önlenmesi/tedavisi amacıyla kullanılan adsorbanların mevzuat ve onay durumları ülkelere göre değişebilmekte; bu nedenle saha kullanımında bilimsel kanıtlar ve yasal çerçevenin birlikte değerlendirilmesi gerekir.

MEVZUAT VE TOLERANS DÜZEYLERİNE GENEL BAKIŞ

İnsan ve hayvan sağlığını korumak ve ekonomik kayıpları azaltmak amacıyla birçok ülkede yem ve yem hammaddelerinde izin verilen mikotoksin düzeyleri belirlenmiştir. Türkiye’de süt sığırı yemlerinde aflatoksin B1, deoksinivalenol, zearalenon ve fumonisin için tolerans düzeyleri bildirilmektedir (Şahindokuyucu ve Mor, 2011). Ayrıca farklı düzenleyici otoriteler (AB ve ABD gibi) süt sığırı yemleri ve süt ürünleri için aflatoksin başta olmak üzere çeşitli sınırlar tanımlamıştır. Özellikle aflatoksinlerde, yem düzeyi ile sütte AFM1 oluşumu arasındaki ilişki nedeniyle, yem kontrolünün “süt güvenliği” açısından belirleyici olduğu vurgulanmaktadır.

GENEL DEĞERLENDİRME

Mikotoksinler süt sığırcılığında yalnızca akut zehirlenmeler değil; daha çok subklinik performans kaybı, bağışıklık baskılanması, enfeksiyonlara yatkınlık, üreme sorunları ve metabolik hastalıklarla etkileşim üzerinden ekonomik kayba yol açan kompleks bir risk alanıdır (Whitlow ve Hagler, 2005; Fink-Gremmels, 2008). Rumen mikroflorası önemli bir koruyucu bariyer oluşturmakla birlikte, küflü yemlerin antimikrobiyal toksinler yoluyla rumen ekosistemini bozabilmesi, çoklu mikotoksin maruziyetinin saha koşullarında daha ağır tablolar oluşturabilmesi ve silajın “göz ardı edilen” bir mikotoksin kaynağı olabilmesi, yönetim ve izleme stratejilerini

zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle etkili kontrol; yem hijyeni, uygun hasat–depolama uygulamaları, risk dönemlerinde (özellikle geçiş dönemi) dikkatli izleme, gerektiğinde analiz ve rasyon düzeltmeleri ile bütüncül biçimde ele alınmalıdır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Süt sığırı işletmelerinde mikotoksinler; yalnızca akut zehirlenmelere yol açan ajanlar olarak değil, çoğu zaman subklinik seyrederek süt verimi, yem tüketimi, yemden yararlanma, bağışıklık yanıtı ve üreme performansı üzerinde kümülatif olumsuz etkiler oluşturan çok boyutlu bir risk faktörü olarak değerlendirilmelidir. Ruminantların rumen mikroflorası, bazı mikotoksinlerin detoksifikasyonunda önemli bir koruma sağlasa da bu kapasite; rasyon değişiklikleri, rumen disbiyozisi, subakut ruminal asidoz ve özellikle geçiş dönemi gibi stres koşullarında azalabilmekte, böylece mikotoksinlerin sistemik etkileri belirginleşebilmektedir. Saha koşullarında karşılaşılan klinik tablolar çoğu zaman özgül olmayıp, üretim kaybı ve artmış hastalık insidansı şeklinde ortaya çıktığından, mikotoksin kaynaklı sorunlar kolaylıkla gözden kaçabilmektedir. Bununla birlikte, yemlerde çoklu mikotoksin kontaminasyonu ve toksinler arası etkileşimler, hem klinik bulguların şiddetini artırmakta hem de analitik sonuçlar ile gözlenen performans kaybı arasındaki uyumu zayıflatmaktadır. Özellikle silaj ve depolanmış yemler, yalnızca bir kontaminasyon kaynağı değil; aynı zamanda rumen mikroflorasını baskılayan antimikrobiyal toksinler aracılığıyla detoksifikasyon kapasitesini zayıflatabilen kritik bir risk alanı olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle mikotoksin yönetimi, yalnızca toksin ölçümüne dayalı bir yaklaşım yerine, yem hijyeni, depolama koşulları, rasyon yönetimi ve riskli dönemlerin izlenmesini kapsayan bütüncül bir çerçevede ele alınmalıdır.

Mikotoksinlerle mücadelede en etkili yaklaşımın önleyici stratejiler olduğu unutulmamalıdır. Mikotoksinler oluşuktan sonra

bunların tamamen ortadan kaldırılmasına yönelik pratik ve güvenilir yöntemler sınırlı olduğundan, riskin azaltılmasında hasat, depolama ve yemleme zincirinin tüm aşamalarında küf gelişimini engellemeye yönelik uygulamalar ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, silaj yapımında hızlı pH düşüşünü sağlayacak uygun fermantasyon koşullarının oluşturulması, oksijenin ortamdan etkin biçimde uzaklaştırılması ve silo yüzeyinde bozulmanın en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Silo büyüklüğünün sürü büyüklüğüne uygun seçilmesi, günlük silaj yüzey ilerleme hızının bozulma hızını aşacak şekilde ayarlanması ve yemliklerde biriken artıkların düzenli olarak temizlenmesi, silaj kaynaklı mikotoksin riskini azaltmada temel uygulamalar arasında yer almaktadır.

Depolanan tahıl ve kuru yemlerde ise nem içeriğinin kontrol altında tutulması, uygun havalandırmanın sağlanması ve sıcaklık–rutubet dalgalanmalarının sınırlandırılması küf gelişimini önlemede kritik rol oynamaktadır. Özellikle geçiş dönemi ve erken laktasyon gibi metabolik stresin yoğun olduğu dönemlerde, süt sığırlarının mikotoksinlere karşı daha duyarlı hâle geldiği dikkate alınmalı; bu dönemlerde yem tüketimi, süt verimi, kondisyon skoru, dışkı karakteri ve hastalık insidansı yakından izlenmelidir. Üretim performansında açıklanamayan düşüşler ve artan hastalık sıklığı durumlarında, mikotoksinler ayırıcı tanıda sistematik biçimde değerlendirilmelidir.

Mikotoksinlerin yem partisi içinde düzensiz dağılım göstermesi nedeniyle, analizlerin güvenilirliği büyük ölçüde doğru örneklemeye bağlıdır. Bu nedenle yem partilerinden farklı noktalardan alınan çoklu alt örneklerin birleştirilmesiyle temsili numuneler oluşturulmalı; numunelerin küf gelişimini sürdürebilecek koşullardan korunarak uygun şekilde muhafaza edilmesi ve en kısa sürede analiz edilmesi sağlanmalıdır. Saha koşullarında çoğu zaman birden fazla mikotoksinin birlikte bulunabildiği göz önünde

bulundurularak, mümkün olduğuunda çoklu mikotoksin taramalarını içeren analiz yaklaşımları tercih edilmelidir.

Kontamine yemlerle karşılaşıldığında, açıkça küflenmiş yemlerin kullanımından kaçınılmalı; yüksek düzeyde kontaminasyon saptanan durumlarda bu yemler rasyondan çıkarılmalı veya uygun şekilde seyretilmelidir. Özellikle kaba yemlerde tamamen çıkarma her zaman mümkün olmadığından, risk yönetimi alternatif yem kaynaklarının kullanımı ve rasyonun yeniden düzenlenmesini içermelidir. Rasyon planlamasında yeterli düzeyde efektif lif sağlanması ve gerekli durumlarda tampon maddelerle rumen pH'sının desteklenmesi, rumen mikrobiyotasının detoksifikasyon kapasitesinin korunmasına katkı sağlayacaktır.

Mikotoksinlerin olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik olarak kullanılan bağlayıcı ve adsorban yem katkılarının, tek başına bir çözüm olarak değil; önleyici yönetim uygulamalarını tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tür ürünlerin etkinliği mikotoksin türüne, rasyon yapısına ve hayvanın fizyolojik durumuna göre değişebildiğinden, ürün seçimi bilimsel veriler ve mevzuat çerçevesi dikkate alınarak yapılmalıdır. Özellikle aflatoksinler açısından yemlerdeki kontaminasyon düzeyinin, sütte kalıntı oluşumu ile doğrudan ilişkili olduğu göz önünde bulundurularak, yem kontrolünün yalnızca hayvan sağlığı değil, aynı zamanda süt güvenliği açısından da kritik olduğu unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, süt sığırcılığında mikotoksinlerle etkin mücadele; yem hijyeni ve depolama uygulamalarından başlayarak, rumen sağlığını önceleyen rasyon yönetimi, riskli dönemlerde dikkatli izleme, doğru analiz ve gerektiğinde hızlı müdahaleyi içeren entegre bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu yaklaşımın benimsenmesi, sürü sağlığının korunmasına ve süt üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanmasına önemli katkılar sunacaktır.

Kaynakça

Bacon, C. W., Porter, J. K., Norred, W. P., & Leslie, J. (1996). Production of fusaric acid by *Fusarium* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 62(11), 4039-4043.

Bartels, C. J. M., Wouda, W., & Schukken, Y. H. (1999). Risk factors for *Neospora caninum*-associated abortion storms in dairy herds in The Netherlands (1995 to 1997). *Theriogenology*, 52(2), 247-257.

Bauer, J., Gareis, M., Bott, A., & Gedek, B. (1989). Isolation of a mycotoxin (gliotoxin) from a bovine udder infected with *Aspergillus fumigatus*. *Journal of Medical and Veterinary Mycology*, 27(1), 45-50.

Botha, C. J., Naude, T. W., Moroe, M. L., & Rottinghaus, G. E. (2004). Gangrenous ergotism in cattle grazing fescue (*Festuca elatior* L.) in South Africa: Clinical communication. *Journal of the South African Veterinary Association*, 75(1), 45-48.

Boysen, M. E., Jacobsson, K. G., & Schnürer, J. (2000). Molecular identification of species from the *Penicillium roqueforti* group associated with spoiled animal feed. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(4), 1523-1526.

Caloni, F., Spotti, M., Auerbach, H., Op den Camp, H., Fink Gremmels, J., & Pompa, G. (2000). In vitro metabolism of fumonisin B1 by ruminal microflora. *Veterinary Research Communications*, 24(6), 379-387.

Cheeke, P. R. (1995). Endogenous toxins and mycotoxins in forage grasses and their effects on livestock. *Journal of animal science*, 73(3), 909-918.

Chu, F. S., & Li, G. Y. (1994). Simultaneous occurrence of fumonisin B1 and other mycotoxins in moldy corn collected from the People's Republic of China in regions with high incidences of esophageal cancer. Applied and environmental microbiology, 60(3), 847-852.

Cole, R. J., Kirksey, J. W., Dorner, J. W., Wilson, D. M., Johnson Jr, J. C., Johnson, A. N., ... & Chexal, K. K. (1977). Mycotoxins produced by *Aspergillus fumigatus* species isolated from molded silage. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 25(4), 826-830.

Coppock, R. W., Mostrom, M. S., Sparling, C. G., Jacobsen, B., & Ross, S. C. (1990). Apparent zearalenone intoxication in a dairy herd from feeding spoiled acid-treated corn. Veterinary and human toxicology, 32(3), 246-248.

Coulombe Jr, R. A. (1993). Biological action of mycotoxins. Journal of dairy science, 76(3), 880-891.

Council for Agricultural Science. (2003). Mycotoxins: risks in plant, animal, and human systems (No. 139). Council for Agricultural Science & Technology (Cast).

D'Mello, J. P. F., Macdonald, A. M. C., & Mycotoxins, A. (1997). Feed Sci. Technol, 69, 155-166.

Dänicke, S., Matthäus, K., Lebzien, P., Valenta, H., Stemme, K., Ueberschär, K. H., ... & Flachowsky, G. (2005). Effects of *Fusarium* toxin-contaminated wheat grain on nutrient turnover, microbial protein synthesis and metabolism of deoxynivalenol and zearalenone in the rumen of dairy cows. Journal of animal physiology and animal nutrition, 89(9-10), 303-315.

Diaz, D. E., Hopkins, B. A., Leonard, L. M., Hagler Jr, W. M., & Whitlow, L. W. (2000). Effect of fumonisin on lactating dairy cattle. J. Dairy Sci, 83(1.171).

Diekman, M. A., & Green, M. L. (1992). Mycotoxins and reproduction in domestic livestock. Journal of animal science, 70(5), 1615-1627.

Diener, U. L., Cole, R. J., Sanders, T. H., Payne, G. A., Lee, L. S., & Klich, M. A. (1987). Epidemiology of aflatoxin formation by *Aspergillus flavus*. Annual review of phytopathology, 25(1), 249-270.

Escoula, L. (1992). Patulin production by *Penicillium granulatum* and inhibition of ruminal flora. Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology: Official Organ of the International Society for Environmental Toxicology and Cancer, 11(2), 45-48.

Fiedler, K., Schütz, E., & Geh, S. (2001). Detection of microbial volatile organic compounds (MVOCs) produced by moulds on various materials. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 204(2-3), 111-121.

Fink-Gremmels, J. (2008). The role of mycotoxins in the health and performance of dairy cows. The Veterinary Journal, 176(1), 84-92.

Fink-Gremmels, J. (1999). Mycotoxins: their implications for human and animal health. Veterinary Quarterly, 21(4), 115-120.

Foster, B. C., Trenholm, H. L., Friend, D. W., Hartin, K. E., & Thompson, B. K. (1986). Evaluation of different sources of deoxynivalenol (vomitoxin) fed to swine. Canadian journal of animal science, 66(4), 1149-1154.

Garon, D., Richard, E., Sage, L., Bouchart, V., Pottier, D., & Lebailly, P. (2006). Mycoflora and multimycotoxin detection in corn silage: experimental study. Journal of agricultural and food chemistry, 54(9), 3479-3484.

Geelen, M. J. H., & Wensing, T. (2006). Studies on hepatic lipidosis and coinciding health and fertility problems of high-producing dairy cows using the “Utrecht fatty liver model of dairy cows”. A review. Veterinary Quarterly, 28(3), 90-104.

Gentry, P. A., Ross, M. L., & Chan, P. K. (1984). Effect of T-2 toxin on bovine hematological and serum enzyme parameters. Veterinary and Human Toxicology, 26(1), 24-28.

Goff, J. P. (2006). Major advances in our understanding of nutritional influences on bovine health. Journal of dairy science, 89(4), 1292-1301.

Guthrie, L. D., & Bedell, D. M. (1981). Effects of aflatoxin in corn on production and reproduction in dairy cattle.

Hadley, G. L., Wolf, C. A., & Harsh, S. B. (2006). Dairy cattle culling patterns, explanations, and implications. Journal of dairy science, 89(6), 2286-2296.

Hamilton, P. B. (1984). Determining safe levels of mycotoxins. Journal of Food Protection, 47(7), 570-575.

Hibbard, B., Peters, J. P., Chester, S. T., Robinson, J. A., Kotarski, S. F., Croom Jr, W. J., & Hagler Jr, W. M. (1995). The effect of slaframine on salivary output and subacute and acute acidosis in growing beef steers. Journal of animal science, 73(2), 516-525.

Hussein, H. S., & Brasel, J. M. (2001). Toxicity, metabolism, and impact of mycotoxins on humans and animals. Toxicology, 167(2), 101-134.

Huwig, A., Freimund, S., Käppeli, O., & Dutler, H. (2001). Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents. Toxicology letters, 122(2), 179-188.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer, & World Health Organization. (1993). Some naturally occurring substances: food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins (Vol. 56). World Health Organization.

Jelinek, C. F. (1987). Distribution of mycotoxins: an analysis of worldwide commodities data, including data from FAO/WHO/UNEP Food Contamination Monitoring Programme.

Jouany, J. P., & Diaz, D. E. (2005). Effects of mycotoxins in ruminants.

Kallela, K., & Ettala, E. (1984). The oestrogenic Fusarium toxin (zearalenone) in hay as a cause of early abortions in the cow. Nordisk veterinærmedicin, 36(9-10), 305-309.

Kamyar, M., Rawnduzi, P., Studenik, C. R., Kouri, K., & Lemmens-Gruber, R. (2004). Investigation of the electrophysiological properties of enniatins. Archives of biochemistry and biophysics, 429(2), 215-223.

Kaya, S. (1987). YEM VE BESİNLERDEKİ MİKOTOKSİNLER: İNSAN VE HAYVAN SAĞLIĞI İÇİN ÖNEMLERİ. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 36(01).

Kehrli, M., Nonnecke, B., & Roth, J. (1989a). Alterations in bovine lymphocyte function during the periparturient period.

Kehrli, M., Nonnecke, B., & Roth, J. (1989b). Alterations in bovine neutrophil function during the periparturient period.

Kellerman, T. S., Van der Westhuizen, G. C. A., Newsholme, S. J., & Coetzer, J. A. (1984). A tremorgenic mycotoxicosis of cattle caused by maize sprouts infested with *Aspergillus clavatus*.

Kiessling, K. H., Pettersson, H., Sandholm, K., & Olsen, M. O. N. I. C. A. (1984). Metabolism of aflatoxin, ochratoxin, zearalenone, and three trichothecenes by intact rumen fluid, rumen protozoa, and rumen bacteria. *Applied and environmental microbiology*, 47(5), 1070-1073.

Kuilman, M. E. M., Maas, R. F. M., & Fink-Gremmels, J. (2000). Cytochrome P450-mediated metabolism and cytotoxicity of aflatoxin B1 in bovine hepatocytes. *Toxicology in vitro*, 14(4), 321-327.

Kurtzman, C. P., Horn, B. W., & Hesseltine, C. W. (1987). *Aspergillus nomius*, a new aflatoxin-producing species related to *Aspergillus flavus* and *Aspergillus tamaraii*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 53(3), 147-158.

Le Bars, J., & Le Bars, P. (1996). Recent acute and subacute mycotoxicoses recognized in France. *Veterinary research*, 27(4-5), 383-394.

Mann, D. D., Buening, G. M., Hook, B., & Osweiler, G. D. (1983). Effects of T-2 mycotoxin on bovine serum proteins. *American Journal of Veterinary Research*, 44(9), 1757-1759.

May, H. D., Wu, Q., & Blake, C. K. (2000). Effects of the *Fusarium* spp. mycotoxins fusaric acid and deoxynivalenol on the growth of *Ruminococcus albus* and *Methanobrevibacter ruminantium*. *Canadian Journal of Microbiology*, 46(8), 692-699.

McLaughlin, C. S., Vaughan, M. H., Campbell, I. M., Wei, C. M., Stafford, M. E., & Hansen, B. S. (1977). Inhibition of

protein synthesis by trichothecenes. Mycotoxins in human and animal health, 1, 263-73.

Melo dos Santos, V., Dorner, J. W., & Carreira, F. (2003). Isolation and toxigenicity of *Aspergillus fumigatus* from moldy silage. *Mycopathologia*, 156(2), 133-138.

Morgavi, D. P., Boudra, H., Jouany, J. P., & Graviou, D. (2003). Prevention of patulin toxicity on rumen microbial fermentation by SH-containing reducing agents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(23), 6906-6910.

Nakazato, M., Morozumi, S., Saito, K., Fujinuma, K., Nishima, T., & Kasai, N. (1990). Interconversion of aflatoxin B1 and aflatoxicol by several fungi. *Applied and environmental microbiology*, 56(5), 1465-1470.

Niyo, K. A., Richard, J. L., Niyo, Y., & Tiffany, L. H. (1988a). Effects of T-2 mycotoxin ingestion on phagocytosis of *Aspergillus fumigatus* conidia by rabbit alveolar macrophages and on hematologic, serum biochemical, and pathologic changes in rabbits. *American Journal of Veterinary Research*, 49(10), 1766-1773.

Niyo, K. A., Richard, J. L., Niyo, Y., & Tiffany, L. H. (1988b). Pathologic, hematologic, and serologic changes in rabbits given T-2 mycotoxin orally and exposed to aerosols of *Aspergillus fumigatus* conidia. *American Journal of Veterinary Research*, 49(12), 2151-2160.

O'Brien, M., Nielsen, K. F., O'Kiely, P., Forristal, P. D., Fuller, H. T., & Frisvad, J. C. (2006). Mycotoxins and other secondary metabolites produced in vitro by *Penicillium paneum* Frisvad and *Penicillium roqueforti* Thom isolated from baled grass silage in Ireland. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(24), 9268-9276.

Odriozola, E., Odeón, A., Canton, G., Clemente, G., & Escande, A. (2005). *Diplodia maydis*: a cause of death of cattle in Argentina. *New Zealand Veterinary Journal*, 53(2), 160-161.

Osweiler, G. D. (2000). Mycotoxins: Contemporary issues of food animal health and productivity. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 16(3), 511-530.

Pier, A. C. (1992). Major biological consequences of aflatoxicosis in animal production. *Journal of Animal Science*, 70(12), 3964-3967.

Pier, A. C., Richard, J. L., & Cysewski, S. J. (1980). Implications of mycotoxins in animal disease. *Journal of the american veterinary medical association*, 176(8), 719-724.

Puel, O., Tadrict, S., Galtier, P., Oswald, I. P., & Delaforge, M. (2005). *Byssosclamyces nivea* as a source of mycophenolic acid. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(1), 550-553.

Puntenney, S. B., Wang, Y., & Forsberg, N. E. (2003, February). Mycotic infections in livestock: Recent insights and studies on etiology, diagnostics and prevention of Hemorrhagic Bowel Syndrome. In Southwest Nutrition & Management Conference, Phoenix, University of Arizona, Department of Animal Science, Tuscon (pp. 49-63).

Reeves, E. P., Messina, C. G. M., Doyle, S., & Kavanagh, K. (2004). Correlation between gliotoxin production and virulence of *Aspergillus fumigatus* in *Galleria mellonella*. *Mycopathologia*, 158(1), 73-79.

Rheeder, J. P., Marasas, W. F., Thiel, P. G., Sydenham, E. W., Shephard, G. S., & Van Schalkwyk, D. J. (1992). *Fusarium moniliforme* and fumonisins in corn in relation to human esophageal cancer in Transkei.

Russell, L., Cox, D. F., Larsen, G., Bodwell, K., & Nelson, C. E. (1991). Incidence of molds and mycotoxins in commercial animal feed mills in seven Midwestern states, 1988–1989. *Journal of animal Science*, 69(1), 5-12.

Sabater-Vilar, M., Maas, R. F., De Bosschere, H., Ducatelle, R., & Fink-Gremmels, J. (2004). Patulin produced by an *Aspergillus clavatus* isolated from feed containing malting residues associated with a lethal neurotoxicosis in cattle. *Mycopathologia*, 158(4), 419-426.

Scott, P. M., Delgado, T., Prelusky, D. B., Trenholm, H. L., & Miller, J. D. (1994). Determination of fumonisins in milk. *Journal of Environmental Science & Health Part B*, 29(5), 989-998.

Seglar, B. (2001). Mycotoxin effects on dairy cattle. Erişim: http://www.uwex.edu/ces/forage/wfc/proceedings2001/dairy_mycotoxin.htm. Erişim Tarihi, 24, 2004.

Shadmi, A., Volcani, R., & Nobel, T. A. (1974). The pathogenic effects on animals fed with mouldy hay or given its etheric fraction. *Zentralblatt für Veterinärmedizin Reihe A*, 21(7), 544-552.

Smith, T. K., & MacDonald, E. J. (1991). Effect of fusaric acid on brain regional neurochemistry and vomiting behavior in swine. *Journal of animal science*, 69(5), 2044-2049.

şahindokuyucu, F., & Mor, F. (2011). Süt sığırlarında önemli mikotoksinler ve etkileri. *Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakóltesi Dergisi*, 30(1), 59-64.

şahindokuyucu, F., Mor, F., Oğuz, M. N., & Oğuz, F. K. (2010). Burdur İl'inde Toplanan Silajlarda Mikotoksin

Varlığının ve Düzeylerinin Araştırılması. Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 29(1), 49-54.

Tapia, M. O., Stern, M. D., Koski, R. L., Bach, A., & Murphy, M. J. (2002). Effects of patulin on rumen microbial fermentation in continuous culture fermenters. Animal Feed Science and Technology, 97(3-4), 239-246.

Wenz, J. R., Jensen, S. M., Lombard, J. E., Wagner, B. A., & Dinsmore, R. P. (2007). Herd management practices and their association with bulk tank somatic cell count on United States dairy operations. Journal of dairy science, 90(8), 3652-3659.

Whitaker, T. B., Dickens, J. W., & Giesbrecht, F. G. (1991). Sampling, subsampling, and analysis. Mycotoxins and animal foods, 23, 153.

Whitlow, L. W., & Hagler, W. J. (2004). Mycotoxins in feeds.

Whitlow, L. W., & Hagler, W. M. (2005, February). Mycotoxins in dairy cattle: Occurrence, toxicity, prevention and treatment. In Proc. Southwest Nutr. Conf (pp. 124-138).

Whitlow, L. W., Hagler, W. M., Hopkins, B. A., & Diaz, D. E. (2000). Mycotoxins in feeds and their effects on dairy cattle. Moormoon's Feeds Facts, 11(3), 1-7.

Whitlow, L. W., Nebel, R. L., & Hagler Jr, W. M. (1994). The association of deoxynivalenol in grain with milk production loss in dairy cows. In Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General Biodeterioration (pp. 131-139). Boston, MA: Springer US.

Yiannikouris, A., & Jouany, J. P. (2002). Mycotoxins in feeds and their fate in animals: a review. Animal Research, 51(2), 81-99.

Zinedine, A., & Mañes, J. (2009). Occurrence and legislation of mycotoxins in food and feed from Morocco. Food Control, 20(4), 334-344.

