

Sürdürülebilir Hayvansal Üretimde Yem Verimliliği ve Yerel Kaynakların Döngüsel Kullanımı: Hassas Besleme, Hayvan Sağlığı ve Ürün Kalitesi Perspektifi

E. Mevliyaogulları^{1*}, Serap Göncü², A. Yıldırım³

¹Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Ankara, Türkiye.

²Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, 01330, Balcalı, Adana, Türkiye.

³Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Zootečni Bölümü, Tokat, Türkiye.

Abstract

Feed is the principal input in animal production because it accounts for the largest share of production costs and largely determines the environmental burden of the system. This review evaluates feed efficiency and the circular use of local resources in sustainable animal production from the perspectives of precision feeding, animal health, and product quality. Sustainable feed efficiency should not be interpreted merely as improving feed conversion ratio; it also encompasses reducing nutrient losses, safely integrating local and alternative resources into rations, using processing technologies appropriately, and continuously updating ration management through animal-based monitoring data. Local legumes, agro-industrial by-products, pasture-based resources, and biomass recoverable from the food chain have substantial potential to reduce external dependence and increase the resilience of production systems. However, this potential can only be realized when variability in chemical composition, storage-related risks, and antinutritional factors are managed through appropriate processing and regular analyses. Precision feeding systems, rumination monitoring, metabolic profiling, and product quality indicators make it possible to track the real sustainability outcomes of feed management. In conclusion, feed efficiency in sustainable animal production is not a narrow cost-reduction strategy but a holistic management framework that reduces environmental load, protects animal health and welfare, supports product quality, and reintegrates local resources into the production cycle.

Key Words: sustainable animal production, feed efficiency, local feed resources, precision feeding, circular bioeconomy, product quality

Sürdürülebilir Hayvansal Üretimde Yem Verimliliği ve Yerel Kaynakların Döngüsel Kullanımı: Hassas Besleme, Hayvan Sağlığı ve Ürün Kalitesi Perspektifi

Özet

Hayvansal üretimde yem, maliyetin en büyük bölümünü oluşturan ve aynı zamanda çevresel yükü belirleyen temel girdidir. Bu derleme, sürdürülebilir hayvansal üretimde yem verimliliği ile yerel kaynakların döngüsel kullanımını; hassas besleme, hayvan sağlığı ve ürün kalitesi boyutlarıyla birlikte değerlendirmektedir. Sürdürülebilir yem verimliliği yalnızca yem dönüşüm oranının iyileştirilmesi anlamına gelmemekte; besin maddesi kayıplarının azaltılmasını, yerel ve alternatif kaynakların güvenli biçimde rasyona entegre edilmesini, işleme teknolojilerinin doğru kullanılmasını ve hayvan bazlı izleme verileriyle rasyon yönetiminin sürekli güncellenmesini kapsamaktadır. Yerel baklagiller, agro-endüstriyel yan ürünler, mera temelli kaynaklar ve gıda zincirinden geri kazanılabilen biyokütleler, dışa bağımlılığı azaltma ve üretim sistemini daha dayanıklı hale getirme potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin hayata geçirilebilmesi için kimyasal bileşim değişkenliğinin, depolama risklerinin ve anti-nutrisyonel faktörlerin uygun işleme ve düzenli analizle yönetilmesi gerekir. Hassas besleme sistemleri, ruminasyon izlemi, metabolik profil değerlendirmeleri ve ürün kalite göstergeleri ise yem yönetiminin gerçek sürdürülebilirlik çıktılarının izlenmesini sağlar. Sonuç olarak sürdürülebilir hayvansal üretimde yem verimliliği, yalnızca maliyet düşürmeye odaklanan dar bir yaklaşım değil; çevresel yükü azaltan, hayvan sağlığı ve refahını koruyan, ürün kalitesini destekleyen ve yerel kaynakları üretim döngüsüne geri kazandıran bütüncül bir yönetim çerçevesidir.

Anahtar Kelimeler: sürdürülebilir hayvansal üretim, yem verimliliği, yerel yem kaynakları, hassas besleme, döngüsel biyoeкономи, ürün kalitesi



Giriş

Hayvansal üretim sistemlerinde yem, işletme maliyetinin en büyük bölümünü oluşturan temel girdi olmanın ötesinde; arazi kullanımı, su tüketimi, besin maddesi kayıpları ve sera gazı emisyonları üzerinden üretimin çevresel performansını da belirlemektedir. Artan hayvansal protein talebi, iklim değişikliğinin yem üretimi üzerindeki baskısı, tarımsal arazilerin sınırlılığı ve tedarik zincirlerinde yaşanan kırılganlıklar, yem yönetiminin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda ekolojik ve stratejik bir konu olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır (FAO, 2022; Makkar, 2018; Mottet ve ark., 2017).

Bu nedenle sürdürülebilir yem verimliliği kavramı, klasik yem dönüşüm oranı yaklaşımının ötesine taşınmıştır. Güncel çerçevede amaç; hayvanın fizyolojik gereksinimlerini daha doğru karşılayan, sindirilebilirliği yükselten, azot ve fosfor kayıplarını azaltan, metan ve amonyak oluşum potansiyelini sınırlayan ve gıda-yem rekabetini düşüren rasyonlar oluşturmaktır (Dijkstra ve ark., 2013; Cottle ve Nolan, 2014; Salami ve ark., 2019). Bu yaklaşım, verimi yalnızca bir çıktı oranı olarak değil, kaynak kullanım etkinliği ve sistem dayanıklılığı ile birlikte değerlendirmektedir.

Sürdürülebilirlik tartışmasının ikinci önemli boyutu, yemin kaynağıdır. Yerel baklagiller, meraya dayalı kaba yemler, tarımsal ürün kalıntıları ve agro-endüstriyel yan ürünler; ithal hammaddelere bağımlılığı azaltma, lojistik kaynaklı emisyonları sınırlama ve atık biyokütleyi yeniden üretim döngüsüne kazandırma bakımından dikkat çekmektedir (Makkar, 2018; Ajila ve ark., 2012; Shah ve ark., 2025). Bununla birlikte bu materyallerin değişken kimyasal bileşimi, depolama güçlükleri ve anti-nutrisyonel bileşikler, işleme teknolojileri ve analitik izleme olmaksızın etkin biçimde değerlendirilememektedir (Ravindran, 2013; Galaverna ve ark., 2021).

Bu derleme, sürdürülebilir hayvansal üretimde yem verimliliği ile yerel kaynakların döngüsel kullanımını aynı çerçevede ele almakta; hassas besleme, hayvan sağlığı ve ürün kalitesi arasındaki etkileşimi bütüncül bir bakışla tartışmaktadır. Temel amaç, yem yönetimini yalnızca rasyon maliyeti veya yem dönüşüm oranı üzerinden değil; biyolojik verim, çevresel yük, refah ve ürün güvenliği üzerinden birlikte değerlendirebilen bir değerlendirme çerçevesi sunmaktır.

Sürdürülebilir Yem Verimliliğinin Kavramsal Çerçevesi

Klasik yem verimliliği değerlendirmeleri çoğunlukla birim canlı ağırlık artışı, süt verimi ya da yumurta üretimi başına tüketilen yem miktarı üzerine kuruludur. Oysa sürdürülebilir hayvansal üretimde asıl mesele, rasyona giren her besin maddesinin hayvansal ürüne en yüksek biyolojik etkinlikle dönüşmesini sağlarken üretim sisteminden kaynaklanan kayıpları azaltmaktır. Bu nedenle sindirilebilirlik, besin maddesi biyoyararlanımı, azot kullanım etkinliği, fosfor geri kazanımı ve dışkı-idrar yoluyla oluşan kayıplar birlikte değerlendirilmelidir (Dijkstra ve ark., 2013; Salami ve ark., 2019).

Ruminant sistemlerde sürdürülebilir yem verimliliği, özellikle azot döngüsü açısından ayrı bir önem taşımaktadır. Gereğinden yüksek protein arzı, çoğu zaman üretim performansına eşdeğer katkı sağlamadan amonyak oluşumunu ve idrarla azot kayıplarını artırmaktadır. Benzer biçimde, rumende hızlı fermente olan bileşenlerin hatalı dengelenmesi metan oluşumu ve sindirim bozuklukları bakımından risk yaratabilmektedir (Dijkstra ve ark., 2013; Cottle ve Nolan, 2014). Dolayısıyla sürdürülebilir besleme, “daha yoğun rasyon” ile “daha doğru rasyon” arasındaki farkı net biçimde gözetmek zorundadır.

Yem verimliliğinin bir başka belirleyici boyutu da gıda-yem rekabetidir. İnsan tarafından doğrudan tüketilebilen tahıl ve protein kaynaklarının yoğun biçimde hayvan beslemede kullanılması, sınırlı kaynak koşullarında sistem verimliliğini tartışmalı hale getirmektedir. Mottet ve ark. (2017), hayvancılık sistemlerinin insan tarafından tüketilemeyen biyokütleyi yüksek kaliteli hayvansal proteine dönüştürme kapasitesinin sürdürülebilirlik açısından stratejik değer taşıdığını vurgulamıştır. Bu nedenle yerel yem kaynakları ve yan ürünler yalnızca maliyeti düşüren ikame girdiler değil; sistemin etik, ekolojik ve ekonomik meşruiyetini güçlendiren bileşenlerdir.

Aynı çerçevede tedarik güvenliği ve bölgesel dayanıklılık da sürdürülebilir yem verimliliğinin ayrılmaz parçalarıdır. Dışa bağımlı yem zincirleri, fiyat dalgalanmaları ve lojistik aksaklıklar karşısında özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeleri kırılgan hale getirmektedir. Yerel kaynakların rasyonlara planlı biçimde entegre edilmesi, yalnızca besleme stratejisini değil, bütün işletme yönetimini daha dirençli kılan bir yaklaşım sunmaktadır (Makkar, 2018; Salami ve ark., 2019).

Hassas Besleme ve Hayvan Bazlı İzleme

Hassas besleme, her hayvana ya da benzer özellik gösteren alt gruplara ihtiyaç duydukları zamanda ve ihtiyaç duydukları düzeyde besin maddesi sunmayı hedefleyen veri temelli bir yönetim yaklaşımıdır. Geleneksel sürü ortalamasına dayalı besleme, düşük verimli hayvanlarda aşırı, yüksek verimli hayvanlarda ise yetersiz besleme riskini artırabilmektedir. Buna karşılık hassas besleme; canlı ağırlık, büyüme veya laktasyon dönemi, üretim düzeyi, çevre koşulları ve yem tüketim davranışı gibi değişkenleri birlikte değerlendirerek rasyon yoğunluğunun daha doğru belirlenmesini sağlar (Banhazi ve ark., 2012; Halachmi ve ark., 2019; National Research Council, 2016; Pomar ve Remus, 2019).



Bu yaklaşımın sürdürülebilirlik bakımından en önemli getirilerinden biri, gereksiz protein ve mineral fazlasının azaltılmasıdır. Besin maddesi arzı ile hayvanın fizyolojik gereksinimi arasındaki fark daraldıkça hem ekonomik kayıplar azalmakta hem de dışkı ve idrar yoluyla çevreye taşınan azot ve fosfor miktarı düşmektedir (Dijkstra ve ark., 2013; Salami ve ark., 2019). Bu nedenle hassas besleme, yalnızca performans optimizasyonu için değil, çevresel yükün azaltılması için de temel araçlardan biridir.

Ruminasyon davranışı, ruminantlarda sindirim etkinliği ile refah durumunu aynı anda yansıtan güçlü bir fonksiyonel göstergedir. Geviş getirme süresi ve sıklığı; rasyonun fiziksel olarak etkili lif düzeyi, partikül büyüklüğü, rumen tamponlanması, dinlenme davranışı ve çevresel stres ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle ruminasyon verileri, yem yönetiminin sahadaki sonuçlarını izlemek için yalnızca davranışsal değil, aynı zamanda beslenmeye duyarlı biyolojik sinyaller olarak değerlendirilmelidir (Banhazi ve ark., 2012; Halachmi ve ark., 2019).

Adana koşullarında sığır, koyun ve keçilerde yürütülen gözlemsel çalışmada, türler arasında geviş getirme sayısı bakımından anlamlı farklılıklar belirlenmiş; keçiler en yüksek genel ortalama göstermiştir. Aynı çalışmada yatar pozisyonda geviş getirme düzeyi, ayaktaki değer üzerinde gerçekleşmiştir (Mevliyaoğulları ve Göncü, 2025b). Bu bulgu, dinlenme alanı konforu ile rasyonun fiziksel yapısının birlikte düşünülmesi gerektiğini göstermektedir. Yani ruminasyon verisindeki değişim, yalnızca yem formülasyonuna değil, barınak kalitesine ve refah koşullarına ilişkin erken uyarı niteliği de taşıyabilir.

Dijital sensörler ve sürü yönetim yazılımlarıyla desteklenen ruminasyon izleme sistemleri, sindirim bozuklukları ve verim kayıpları oluşmadan önce karar vermeyi kolaylaştırmaktadır. Ancak bu veriler tek başına yorumlanmamalı; yem tüketimi, süt bileşimi, çevresel koşullar ve barınak yönetimi ile birlikte değerlendirilmelidir (Banhazi ve ark., 2012; Halachmi ve ark., 2019).

Yem verimliliğinin sürdürülebilir sayılabilmesi için yüksek performansın metabolik bozulma pahasına sağlanmaması gerekir. Bu gereklilik özellikle erken laktasyon döneminde daha da belirginleşmektedir. Yüksek ve düşük verimli Siyah Alaca ineklerde yürütülen çalışmada, gruplar arasında birçok kan parametresi açısından önemli fark bulunmamakla birlikte, yüksek verimli grupta kolesterol ve gama glutamil transferaz düzeylerinin daha yüksek, fosfor düzeyinin ise daha düşük seyrettiği bildirilmiştir (Mevliyaoğulları ve Göncü, 2025c).

Bu sonuçlar, aynı toplam karma rasyonla beslenen sürülerde dahi yüksek verimli hayvanların enerji, protein ve mineral dengesi bakımından daha hassas bir izleme gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Erken laktasyon metabolitleri; gizli enerji açığı, mineral dengesizliği ve karaciğer yükü gibi sorunların erken fark edilmesini sağlayarak rasyonun zamanında revize edilmesine katkı verir. Böylece metabolik profil izlemesi, hassas beslemenin laboratuvar temelli tamamlayıcısı olarak değerlendirilebilir.

Yerel Kaynakların Döngüsel Kullanım Potansiyeli

Döngüsel biyoeкономи yaklaşımı, üretim sistemi içinde ortaya çıkan veya insan tüketimine uygun olmayan biyokütlenin yeniden değerlendirilmesini esas almaktadır. Hayvancılık bu açıdan önemli bir dönüştürücü role sahiptir; çünkü tarımsal yan ürünler, işleme artıkları ve mera biyokütlesi, uygun rasyon yönetimi ile yüksek kaliteli hayvansal ürüne dönüştürülebilmektedir (Makkar, 2018; Mottet ve ark., 2017).

Yerel baklagiller ile bölgesel yağ sanayi yan ürünleri, özellikle protein arzı bakımından dışa bağımlılığı azaltabilecek başlıca seçenekler arasında yer almaktadır. Bakla, bezelye, ayçiçeği küspesi ve kanola küspesi gibi kaynaklar; soya küspesine alternatif veya tamamlayıcı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte tanen, tripsin inhibitörü, glikozinolat, yüksek ham selüloz ve fitik asit gibi bileşenler kullanım düzeyini sınırlayabilmektedir (Ravindran, 2013; Galaverna ve ark., 2021). Bu nedenle bu hammaddelerin rasyona entegrasyonu, uygun işleme ve kontrollü formülasyonla birlikte yürütülmelidir.

Şeker pancarı işleme kalıntıları, meyve-sebze posaları, bira ve nişasta endüstrisi yan ürünleri ile tarımsal ürün kalıntıları, sürdürülebilir yem yönetiminin en dikkat çekici bileşenlerindendir. Bu materyaller hem atık yükünü azaltmakta hem de bölgesel erişilebilirliğe bağlı olarak ekonomik rasyon bileşenleri oluşturmaktadır (Ajila ve ark., 2012; Shah ve ark., 2025). Ruminant beslemede özellikle sindirilebilir lif içeriği yüksek yan ürünler, rumen fermentasyonuna olumlu katkı sağlayabilmektedir.

Buna karşılık yan ürünlerin besin değeri parti bazında değişkenlik gösterebilmekte; yüksek nem içeriği, bozulma riski, mikrobiyal kontaminasyon ve lojistik kısıtlar pratik kullanımın önünde engel oluşturabilmektedir. Bu nedenle döngüsel kullanım stratejilerinde düzenli besin analizi, kurutma veya silajlama, depolama güvenliği ve tedarik planlaması birlikte ele alınmalıdır (Makkar, 2018; Ajila ve ark., 2012; Shah ve ark., 2025).

Yerel kaynak kullanımının yalnızca alternatif kesif yemlerle sınırlandırılması eksik bir yaklaşımdır. Sürdürülebilir hayvansal üretim aynı zamanda bölgesel kaba yem tabanının güçlendirilmesini, mera ıslahını, kontrollü otlatmayı ve su kullanım etkinliği yüksek yem bitkilerinin yaygınlaştırılmasını gerektirir. Bu çerçevede mera ve kaba yem stratejileri, yem güvenliği ile çevresel sürdürülebilirliğin kesişim noktasında yer almaktadır (Salami ve ark., 2019; Shah ve ark., 2025).

Kuraklığa dayanıklı yem bitkileri ve bölgesel ekolojiye uyumlu otlatma sistemleri, özellikle iklim baskısının arttığı bölgelerde dışa bağımlılığı azaltarak işletme direncini yükseltmektedir. Böylece sürdürülebilir yem verimliliği, yalnızca rasyon formülasyonunda değil, işletmenin toplam yem üretim deseni içinde de yeniden kurgulanmaktadır.



Yem İşleme Teknolojileri ve Anti-Nutrisyonel Faktörlerin Yönetimi

Yerel ve alternatif yem kaynaklarının etkin biçimde kullanılabilmesi çoğu zaman uygun işleme teknolojilerine bağlıdır. Öğütme, peletleme, buharla işleme, flake etme, ekstrüzyon ve fermentasyon gibi uygulamalar; yemin partikül yapısını, nişasta jelatinizasyon düzeyini, proteinlerin erişilebilirliğini ve yem tüketim özelliklerini değiştirebilmektedir (Ravindran, 2013; Behnke, 1994; Abdollahi ve ark., 2013; Zinn ve ark., 2011). Bu sayede biyoyararlanım artırılabilir ve bazı yan ürünlerin rasyondaki kullanım eşiği yükseltilebilir.

Bununla birlikte işlem şiddetinin aşırı artması her zaman avantaj sağlamaz. Fazla ince öğütme, ruminantlarda fiziksel etkili lif değerini düşürebilir; aşırı ısı işlem ise bazı amino asitlerde kalite kaybına yol açabilir. Kanatlı ve diğer tek mideli hayvanlarda ise yem yapısının sindirim sistemi fonksiyonları üzerindeki etkisi ayrıca önemlidir; partikül yapısı ve yem formu, öğütücü mide işlevi ve besin maddesi yararlanımını etkileyebilmektedir (Svihus, 2011).

Rasyona eklenen dış kaynaklı enzimler, yerel ve alternatif hammaddelerin kullanımını kolaylaştıran biyokimyasal araçlar arasında yer almaktadır. Fitaz, ksilanaz ve beta-glukanaz gibi enzimler; fitata bağlı minerallerin açığa çıkmasını, hücre duvarı fraksiyonlarının parçalanmasını ve enerji kullanımının iyileşmesini sağlayabilmektedir (Ravindran, 2013; Bedford ve Cowieson, 2012). Böylece aynı rasyon daha düşük kayıpla değerlendirilebilmekte ve çevresel atım azaltılabilmektedir.

Bitki kökenli alternatif yemlerde bulunan tanenler, lektinler, tripsin inhibitörleri, glikozinolatlar ve fitat gibi bileşikler, özellikle baklagil ve yağlı tohum kaynaklarının kullanımında teknik sınırlılık oluşturmaktadır (Galaverna ve ark., 2021; Francis ve ark., 2001). Isıl işlem, fermentasyon, enzim ilavesi ve uygun kullanım oranlarının belirlenmesi, bu sınırlılıkların yönetilmesinde temel stratejilerdir. Bu nedenle bir hammaddenin “yerel” olması tek başına yeterli değildir; aynı zamanda güvenli, standart ve sindirilebilir olması gerekir.

Döngüsel kullanımın özel bir alt başlığını, gıda zincirinde oluşan tüketilebilir nitelikteki artıkların yem hammaddesine dönüştürülmesi oluşturmaktadır. Ekmek atığı bu kapsamda dikkat çekici bir örnektir. Mevliyoğulları ve ark. (2023), ekmek kırıntısının köpek mamasında bileşen olarak kullanımını inceleyen çalışmalarında, özellikle ekstrüde ürünlerde ekmek oranı arttıkça ekspansiyon indeksinin yükseldiğini, bulk density ve spesifik mekanik enerji değerlerinin düştüğünü, kuru madde sindirilebilirliğinin ise büyük ölçüde korunduğunu göstermiştir.

Çalışmada yüksek kullanım düzeylerinde ham protein sindirilebilirliğinde bir miktar düşüş bildirilmiş olsa da, sonuçlar işleme teknolojisinin atık biyokütleyi yem zincirine güvenli ve işlevsel biçimde dahil etmede belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Mevliyoğulları ve ark., 2023). Bu örnek, gıda atıklarının doğrudan değil; kurutma, öğütme, ekstrüzyon veya benzeri kontrollü süreçlerle standardize edilmiş yem hammaddeleri olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir.

Yem Verimliliği, Hayvan Sağlığı, Refah ve Ürün Kalitesi

Sürdürülebilir yem yönetiminin başarısı, yalnızca rasyon maliyetinin düşmesiyle değil; hayvan sağlığının korunması, refahın sürdürülmesi ve nihai ürün kalitesinin istikrarlı biçimde devam etmesiyle ölçülmelidir. Bu nedenle süt bileşimi, somatik hücre sayısı, metabolik göstergeler ve davranışsal sinyaller, yem verimliliğinin işletme düzeyindeki gerçek çıktıları olarak değerlendirilmelidir.

Pozantı ilçesindeki dağ köyü süt sığırcılığı işletmelerinde yürütülen çalışmada, süt yağ oranı, protein, yağsız kuru madde, laktoz ve somatik hücre sayısı bakımından işletmeler arasında dikkate değer farklılıklar belirlenmiştir. Ortalama somatik hücre sayısının yüksek bulunması ve örneklerin önemli bir bölümünde kabul sınırlarının aşılması, sürdürülebilirliğin yalnızca yem teminiyle değil; besleme yeterliliği, meme sağlığı, hijyen ve sürü yönetimiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Mevliyoğulları ve Göncü, 2025a).

Benzer şekilde, ruminasyon davranışındaki sapmalar veya erken laktasyondaki metabolik profil değişimleri, çoğu zaman performans kaybı ortaya çıkmadan önce görülebilen gizli uyarı işaretleridir. Bu nedenle yüksek verim sağlayan ancak somatik hücre sayısı yükselen, geviş getirme davranışı bozulan veya metabolik dengesizlik yaşayan sürülerde elde edilen yem verimliliği sürdürülebilir kabul edilemez. Buna karşılık yerel kaynaklara dayalı, iyi işlenmiş ve hayvan bazı verilerle sürekli izlenen rasyonlar; daha dengeli ürün kalitesi, daha iyi sağlık çıktıları ve daha dayanıklı işletme yapıları oluşturabilir (Mevliyoğulları ve Göncü, 2025a, 2025b, 2025c).

Uygulamaya Yönelik Bütüncül Yol Haritası

Uygulamanın ilk adımı, işletme veya bölge düzeyinde kullanılabilecek yem kaynaklarının sistematik biçimde tanımlanmasıdır. Yerel baklagiller, mera kaynakları, yan ürünler ve gıda işleme artıkları; kuru madde, ham protein, lif, enerji ve mineral içerikleri bakımından düzenli analiz edilmeden rasyonlara güvenle dahil edilmemelidir. Parti bazında değişkenlik gösteren hammaddelerde bu analiz zorunluluk düzeyindedir.

İkinci adım, yerel ve alternatif hammaddelerin depolama ve işleme süreçlerinin standartlaştırılmasıdır. Nemli yan ürünlerde kurutma veya silajlama, partikül yapısı hassas hammaddelerde uygun öğütme, anti-nutrisyonel risk taşıyan materyallerde ısı işlem, fermentasyon veya enzim kullanımı planlı biçimde uygulanmalıdır (Ravindran, 2013; Galaverna ve ark., 2021; Behnke, 1994; Abdollahi ve ark., 2013; Zinn ve ark., 2011; Svihus, 2011; Bedford



ve Cowieson, 2012). Aksi halde ekonomik görünen bir hammadde, bozulma ve düşük sindirilebilirlik nedeniyle gizli kayıp kaynağına dönüşebilir.

Üçüncü adım, rasyon performansının yalnızca yem tüketimi ve verim kayıtlarıyla değil; ruminasyon davranışı, süt bileşimi, erken laktasyon metabolik göstergeleri ve sağlık verileri ile birlikte izlenmesidir. Hassas besleme sistemleri ancak bu geri bildirimler düzenli biçimde okunup yorumlandığında gerçek anlamda işlevsel hale gelir (Banhazi ve ark., 2012; Halachmi ve ark., 2019; Mevliyaogulları ve Göncü, 2025a, 2025b, 2025c). Bu nedenle sensör verileri, laboratuvar bulguları ve saha gözlemleri tek bir karar çerçevesinde birleştirilmelidir.

Son adım, sürdürülebilirliği yalnızca yem maliyeti veya yem dönüşüm oranı üzerinden izlememektir. Azot ve fosfor kayıpları, yerel kaynak kullanım oranı, lojistik bağımlılık, hayvan refahı göstergeleri ve ürün kalitesi parametreleri de performans değerlendirmesine dahil edilmelidir (Dijkstra ve ark., 2013; Salami ve ark., 2019). Böylece yem verimliliği, işletmenin çevresel ve ekonomik dayanıklılığını birlikte yöneten stratejik bir göstergeye dönüşebilir.

Sonuç

Sürdürülebilir hayvansal üretimde yem verimliliği, yalnızca daha ucuz veya daha yoğun rasyonlar oluşturma meselesi değildir; hayvanın fizyolojik gereksinimini doğru karşılayan, besin maddesi kayıplarını azaltan, çevresel yükü sınırlayan ve yerel kaynakları üretim döngüsüne geri kazandıran bütüncül bir yönetim modelidir. Bu çerçevede hassas besleme, yerel kaynakların döngüsel kullanımı, uygun işleme teknolojileri ve hayvan bazlı izleme sistemleri birbirini tamamlayan bileşenler olarak değerlendirilmelidir.

Literatür ve uygulamalı örnekler birlikte değerlendirildiğinde; ruminasyon verisi, metabolik profil göstergeleri ve ürün kalite parametrelerinin, yem yönetiminin başarısını izlemek için güçlü araçlar sunduğu görülmektedir. Geleceğin sürdürülebilir besleme stratejileri; yerel kaynak envanteri, analitik kalite kontrol, proses standardizasyonu ve veri temelli karar destek sistemlerini aynı çatı altında birleştiren modeller üzerine kurulmalıdır. Böyle bir yaklaşım, hem işletme direncini artıracak hem de hayvansal üretimin çevresel ayak izini azaltacaktır.

Kaynaklar

- Abdollahi, M. R., Ravindran, V., & Svihus, B. (2013). Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and feed intake. *Animal Feed Science and Technology*, 179(1-4), 1-23.
- Ajila, C., Brar, S., Verma, M., Tyagi, R., Godbout, S., & Valero, J. (2012). Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32, 382-400.
- Banhazi, T. M., Lehr, H., Black, J. L., Crabtree, H., Berckmans, D., & Goss, M. (2012). Precision livestock farming: An international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 1-9.
- Bedford, M. R., & Cowieson, A. J. (2012). Exogenous enzymes and their role in optimizing feed efficiency. *Animal Feed Science and Technology*, 173(1-2), 8-16.
- Behnke, K. C. (1994). Factors affecting pellet quality. *Proceedings of the Maryland Nutrition Conference for Feed Manufacturers*, 44-54.
- Cottle, D. J., & Nolan, J. V. (2014). Metabolic strategies to reduce methane emissions from ruminants. *Animal Production Science*, 54(12), 2060-2070.
- Dijkstra, J., Oenema, O., van Laar, H., Spek, J. W., Wiedemann, S., & Bannink, A. (2013). Nitrogen efficiency and its role in sustainable dairy farming. *Journal of Agricultural Science*, 151(1), 63-74.
- FAO. (2022). *World food and agriculture: Statistical yearbook 2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (2001). Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish. *Aquaculture*, 199(3-4), 197-227.
- Galaverna, G., Dall'Asta, C., & Sforza, S. (2021). Effects of processing on antinutritional factors in grain legumes: A review. *Food Chemistry*, 341, 128-142.
- Halachmi, I., Guarino, M., Bareille, N., & Pastell, M. (2019). Smart breeding as a strategy for sustainable livestock farming. *Animal*, 13(8), 1729-1739.
- Makkar, H. P. S. (2018). Feed resources for sustainable livestock production. *Animal Feed Science and Technology*, 243, 1-11.
- Mevliyaogulları, E., & Göncü, S. (2025a). Dağ köyleri süt sığırları işletmelerinde süt kompozisyonu ve kalite özelliklerinin incelenmesi: Adana ili Pozantı ilçesi örneği. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 13(11), 3386-3390.
- Mevliyaogulları, E., & Göncü, S. (2025b). Koyun, keçi ve sığırlarda vücut pozisyonunun geniş getirme davranışı ve beslenme üzerine etkisi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 13(12), 4064-4070.
- Mevliyaogulları, E., & Göncü, S. (2025c). Yüksek ve düşük verimli Siyah Alaca ineklerde erken laktasyon dönem kan parametreleri değerlendirmesi. *Çukurova Journal of Agriculture and Food Science*, 40(2), 252-259.





- Mevliyaogullari, E., Karshi, M. A., & Mert, B. (2023). Utilizing surplus bread as an ingredient in dog food: Evaluating baking and extrusion processing on physicochemical properties and in vitro digestibility performance. *Journal of Cereal Science*, 113, 103741.
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed efficiency of livestock systems. *Global Food Security*, 14, 1-8.
- National Research Council. (2016). Nutrient requirements of beef cattle (8th rev. ed.). The National Academies Press.
- Pomar, C., & Remus, A. (2019). Precision pig feeding: A strategy to improve the efficiency of nitrogen utilization. *Animal*, 13(S1), S52-S59.
- Ravindran, V. (2013). Feed enzymes: The current state of play. *Feed Compounder*, 33(1), 16-22.
- Salami, S. A., Guinguina, A., Agboola, A. F., Ojo, A. O., Akamo, A. J., & Garba, S. (2019). Sustainability of the global ruminant sector: The role of local and alternative feed resources. *Reviews in Agricultural Science*, 7, 30-46.
- Shah, A. M., Zhang, H., Shahid, M., Ghazal, H., Shah, A. R., Niaz, M., et al. (2025). The vital roles of agricultural crop residues and agro-industrial by-products to support sustainable livestock productivity in subtropical regions. *Animals*, 15(8), 1184.
- Svihus, B. (2011). The gizzard: Function, influence of diet structure and effects on nutrient availability. *World's Poultry Science Journal*, 67(1), 79-86.
- Zinn, R. A., Barreras, A., Owens, F. N., & Plascencia, A. (2011). Steam-flaking of corn for beef cattle: Effects on integration of starch utilization and digestive function. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 124-139.

