TARIM VE HAYVANCILIKTA DEĞİŞEN DİNAMİKLER: İKLİM, TEKNOLOJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK











EDİTÖRLER

Prof. Dr. Yusuf UZUN

Doç. Dr. Şeyda ÇAVUŞOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Bulut SARĞIN

İKSAD Publishing House

www.iksadyayinevi.com

BÖLÜM 12

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN YEM KALİTESİ, HAYVAN BESLEME VE SERA GAZI EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİLERİ: BÜTÜNCÜL BİR DEĞERLENDİRME

Doç. Dr. Cemal BUDAĞ[1]

DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18132404

[1] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Zootekni Bölümü Yemler ve Hayvan Besleme Ana Bilim Dalı, Van, Türkiye.
cbudag@yyu.edu.tr Orcid ID: 0000-0003-3532-7727

GİRİŞ

Bu çalışma, iklim değişikliğinin ruminant besleme ve ürün odaklı sera gazı (GHG) yoğunluğu üzerindeki etkilerini; kuru madde tüketimi (KMT), rasyon protein konsantrasyonu, selüloz/NDF, konsantre düzeyi, rasyona yağ eklenmesi, besleme sıklığı ve yem katkıları bağlamında sentezlemektedir. Güncel derlemeler ve değerlendirme raporları ışığında; ısı stresi ve hidrolojik kısıtların KMT'yi azalttığı, yem kalitesini düşürdüğü ve ECM başına GHG yoğunluğunu artırdığı gösterilmektedir. Bununla birlikte, 3-NOP, korunmuş yağlar, tanenler ve besleme sıklığı gibi müdahaleler; rasyon verimliliğini ve azot kullanım verimliliğini (NUE) artırarak enterik CH_4 emisyonlarında %5–40 bandında azalma sağlayabilir. Sonuçlar, GLEAM 3.0 ve IPCC Tier 2–3 çerçeveleriyle bütünleşik değerlendirmelerin, işletme ve politika düzeyinde karşılaştırılabilirliği güçlendirdiğini göstermektedir

1. GENEL DEĞERLENDİRME

Yüksek sıcaklıklar, hayvan sağlığını tehdit eden başlıca çevresel faktörlerden biridir ve sıcak stresine yol açarak hayvansal üretimi olumsuz etkiler. Yapılan çalışmalar, küresel ısınmanın et ve süt verimini azalttığını, hayvanların su gereksinimini artırdığını, yem kalitesini düşürdüğünü ve kuru madde tüketimini (KMT) sınırladığını ortaya koymuştur. İklim değişikliği; yem arzı, büyüme oranları, üreme performansı, süt ve yumurta üretimi, hastalık yayılımı ve ölüm oranlarını doğrudan etkiler. Aynı zamanda hayvancılık da sera gazı emisyonları (özellikle CH_4) aracılığıyla iklim değişikliğini besleyen ikincil bir faktördür. Sıcaklık artışları, hayvanların metabolizmasını yavaşlatarak büyüme ve beslenme verimliliğini düşürür, nem oranındaki değişimler ise bağışıklık sistemini zayıflatır ve hastalık riskini artırır. Bu etkiler, sürdürülebilir üretim için iklim-adaptif hayvancılık stratejilerinin gerekliliğini vurgular. Araştırmalar, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için hayvan besleme stratejilerine ve yem kalitesinin iyileştirilmesine odaklanılması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, besleme formülasyonlarının yeniden tasarımı ve çevre dostu üretim yaklaşımları, gelecekte hayvancılığın iklimle uyumlu sürdürülebilirliğini sağlayacak temel araçlardır.

Küresel ısınma; sıcaklık rejimlerinde kayma, yağışın mekânsal-zamansal dağılımındaki bozulma, aşırı hava olaylarının (sıcak dalgaları, ani kuraklık, sel) sıklaşması ve atmosferik CO_2 düzeylerinin yükselmesi yoluyla tarımsal üretim sistemlerini çok boyutlu biçimde etkilemektedir. Yem üretimi—tane-yemler (mısır, arpa), yağlı tohum küspeleri (soya küspesi vb.), kaba yemler (yonca, silajlık mısır, çayır-mera otu) ve meralatma—bu iklim sürücülerine çift yönlü duyarlıdır. Küresel ısınma, yem üretiminin hem miktar (verim, hektar başına biyokütle) hem de niteliği (ham protein, NDF/ADF, mineral yoğunluğu, sindirilebilirlik) üzerinde etkiler yaratır. IPCC (2022)'nin Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6, WGII, Bölüm 5) tarım-gıda sistemlerinde iklim değişikliğinin halihazırda gözlenen olumsuz etkilerini özetlemekte; ısınmanın özellikle orta-düşük enlemlerde tarımsal üretkenlik artışını son 50 yılda yavaşlattığına dair kanıtı "orta-yüksek güven" düzeyiyle rapor etmektedir. Bu çerçevede yem bitkilerinin hem verim hem kalite bileşenleri üzerindeki baskı, hayvansal üretimin maliyet yapısı, besleme stratejileri ve ürün birimi başına sera gazı (GHG) yoğunluğu açısından stratejik önem taşır (IPCC, 2022).

İklim-ürün etkileşimlerinin nicel olarak çözümlenmesinde çoklu model yaklaşımları kritik rol oynar (Rosenzweig ve ark., 2013; Müller ve ark., 2021). Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) gibi inisiyatifler; farklı ürün ve iklim modellerini ortak senaryolarda çalıştırarak, mısır-buğday-pirinç-soya gibi ana ürünlerde ısınmanın verim üzerindeki olası etkilerini (uyum seçenekleriyle birlikte) karşılaştırmalı biçimde sunar. Bu sentezler, bölgesel heterojenliğe rağmen ısınmanın artışıyla birlikte mısırda belirgin negatif etki; buğdayda ise iklim-yönetim bağlamına duyarlı, daha değişken bir yanıt zamanı göstermiştir. Yem üretimindeki risk değerlendirmeleri, yem tedarikinin kesintiye uğrama olasılığını ve meraların taşıma kapasitesindeki dalgalanmaları politika-tasarım gündemine taşır (Rosenzweig ve ark., 2013).

Bununla birlikte, kalite etkileri basit verim kayıplarından bağımsız ve kimi zaman daha sinsi seyreder. Yükselmiş atmosferik CO_2 (eCO_2) ve C_3 bitkilerinde fotosentezi uyarırken dokularda azot seyreltmesi ve iyonoma kaymaları (özellikle protein, demir, çinko gibi besin öğelerinde düşüş) yaratabilir. Loladze'nin (2014) meta-analizi ve sonrasında gelen sentezler; eCO_2 koşullarında pek çok yem bitkisinde protein ve bazı mineral

derişimlerinin anlamlı biçimde azaldığını, toplam yapısal olmayan karbonhidratların (şeker-nişasta) ise arttığını göstermiştir. Yem kalitesine yansıyan bu değişimler ruminant beslemede mikrobiyal protein sentezini, enerji-protein senkronunu ve sonuç olarak süt proteini verimini etkiler. Bu durum rasyonların yeniden dengelenmesini, kimi durumlarda daha yüksek girdi ayak izine sahip protein konsantrelerine yönelmeyi gerektirebilir (Loladze, 2014).

Kaba yemler özelinde, yonca (*Medicago sativa*) günümüz rasyonlarının belkemiğidir. Yoncada eCO_2 + ısınma altında ham proteinde azalma, lif fraksiyonlarında artış (NDF/ADF) ve in vitro sindirilebilirlikte düşüş bildiren çalışmalar mevcuttur (Sanz-Sáez ve ark., 2012). Bu bulgular yalnızca agronomik bir merak değil, doğrudan yem değerindeki kayma ve metan oluşum dinamikleri açısından da önemlidir. Daha yüksek lif ve daha düşük protein, rasyon formülasyonunda enerji yoğunlaştırma ve by-pass protein dengelemesini gündeme getirir. Bu sırada rasyon CH_4/N_2O etkileri, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) sınırlarında yeniden hesaplanmalıdır. Ayrıca bazı çalışmalar, simbiyotik *Sinorhizobium meliloti* suş farklılıklarının bu kalite yanıtlarını kısmen modüle edebileceğini göstererek bitki-mikrop etkileşimlerinin ısınan iklimde seçici ıslah/uygulama alanlarını işaret etmektedir (Sanz-Sáez ve ark., 2012; Baslam ve ark., 2014; Kizildeniz, 2024).

Isı stresi yem üretimi ve hayvansal üretim arasında çift yönlü bir köprü oluşturur: Tarlada su kullanımı verimliliği ve biçim zamanı etkilenirken, ahırda hayvanların kuru madde alımı (DMI) ve süt verimi düşer; sağlık ve doğurganlık riskleri artar (IPCC, 2022; West, 2003; Rhoads ve ark., 2009). Literatürde süt sığırlarında ısı-nem indeksinin (THI) kritik eşiğine ilişkin geniş bir aralık verilse de, yüksek verimli sürülerde etkin eşiklerin daha düşük THI düzeylerine kaydığı giderek daha sık rapor edilmektedir (Rodríguez-Venegas ve ark., 2023; Duru, 2018). Yakın dönem çalışmalar; THI ≈ 68–70 ölçeğinde dahi üretim ve davranış göstergelerinde anlamlı bozulmaların başlayabildiğini, ısı dalgalarının yüksek "wet-bulb" (havanın sıcak ve nemli olduğu, hayvanların ter/buharlaşma yoluyla serinleyemediği saatler) nedeniyle bile günlük süt verimini hissedilir ölçüde azaltabildiğini göstermektedir (Palandri ve ark., 2025; Rodríguez-Venegas ve ark., 2023). Bölgesel uygulamalarda (ör. Türkiye Marmara koşulları) Holştayn sürülerinde süt verimi kayıplarının THI eşiğinin 68–72

bandında tetiklenebildiğini bildiren saha analizleri de bu eğilimi destekler (Duru, 2018). Bu veri, "yaz rasyonları" ile yem elektrolit dengesi (DCAD)/elektrolit yönetimi, enerji yoğunlaştırma ve erken-eşik soğutma stratejilerinin daha düşük THI'lardan itibaren devreye alınması gerektiğini göstermektedir (Oliveira ve ark., 2025; IPCC, 2022)

İklim etkilerinin yem üretimi ve hayvansal üretime taşınan maliyetleri yalnızca "kg/ha" veya "kg süt/gün" ile ölçülmemelidir; ürün birimi başına sera gazları (GHG) yoğunluğu (CO_2e/kg süt, CO_2e/kg canlı ağırlık artışı vb.) gibi LCA metrikleri ile değerlendirilmelidir (FAO, 2022). FAO'nun Küresel Hayvancılık Çevresel Değerlendirme Modeli (Global Livestock Environmental Assessment Model GLEAM) çerçevesi; yem üretimi, enterik fermantasyon, gübre yönetimi ve enerji kullanımını ortak sistem sınırları içinde birleştirerek politika ve işletme düzeyinde karşılaştırılabilir sonuçlar üretir (FAO, 2023). Yem kalitesindeki iklim kaynaklı bozulma (yoncada HP düşüşü gibi) rasyonun protein-enerji dengesini yeniden kurmak için daha yüksek ayak izli girdilere (soya küspesi gibi) kaymayı tetikleyebilir; bu da enterik metan (CH_4) etkilenmese bile yem kaynaklı CO_2e bileşenini artırabilir (Loladze, 2014; FAO, 2022). Buna karşılık besleme-temelli azaltımlar—örneğin 3-nitrooksipropanol (3-NOP) ile enterik CH_4'te %20–40 kalıcı düşüşler ya da korunmuş yağların (%2–3 KM) %5–10 düzeyinde CH_4 azaltımı—kalite kayıplarının LCA üzerindeki olumsuz etkisini telafi edebilir veya net azaltıma çevirebilir (Kebreab ve ark., 2023; Shephard ve ark., 2024; Knapp ve ark., 2014). Bu sebeple iklimin yem kalitesi ve hayvan performansı üzerindeki etkilerini, uyarlama (adaptasyon) ve azaltım (mitigasyon) araçlarının entegre edildiği bir LCA çerçevesinde ele almak gereklidir (FAO, 2022; IPCC, 2022).

Bu makalenin amacı; (i) küresel ısınmanın yem üretimi üzerindeki mekanik kanıt zincirini (verim düşmesi; kalite/ besin yoğunluğu kaymaları; hasat zamanı ve mera taşıma kapasitesindeki dalgalanmalar) sistematik biçimde sentezlemek; (ii) bu etkilerin rasyon formülasyonu, DMI, MUN (sütte üre azotu)-NUE (azot kullanım verimliliği), sağlık-doğurganlık göstergeleri ve sonuç olarak ürün birimi başına GHG yoğunluğu üzerindeki sonuçlarını analitik bir çerçevede tartışmak; (iii) besleme temelli adaptasyon ve azaltım seçeneklerini (DCAD/elektrolit optimizasyonu; amino asit hedefleme;

antioksidanlar ve su yönetimi; 3-NOP, yağlar, güvenli olduğunda tanen/nitrat; gübre CH_4 kontrolleri) kanıt gücü ve uygulanabilirlik bakımından karşılaştırmaktır (FAO, 2022; IPCC, 2022). Böylelikle iklim kaynaklı kalite-verim kaymalarının rasyon maliyetleri ve emisyon yoğunluğuyla nasıl etkileştiğini; "erken uyarı" göstergeleri (THI, ıslak termometre saatleri), hassas besleme ve MRV (ölçme-raporlama-doğrulama) altyapıları üzerinden nasıl yönetilebileceğini somutlaştırmayı hedeflemektedir (Model, 2017).

Son olarak, literatürde üç önemli açık/boşluk dikkat çekmektedir. Birincisi, kalite etkilerinin büyüklüğü ve varyansı ürün-çeşit, yönetim ve simbiyotik etkileşimlere (*S. meliloti* suşları gibi) yüksek derecede bağımlıdır; bu heterojenlik besleme kararlarına doğrudan yansır ve yerel veri gerektirir (Sanz-Sáez ve ark., 2012). İkincisi, ısı stresi eşiklerinin yüksek verimli genotiplerde aşağı kaydığına dair bulgular artmakla birlikte, soğutma + besleme paketlerinin farklı iklim-barınak tasarımlarında marjinal getirilerinin sistematik kıyasları sınırlıdır (Palandri ve ark., 2025; Rodríguez-Venegas ve ark., 2023). Üçüncüsü, eCO_2 kaynaklı mineral/protein azalmasının rasyon-LCA sonuçları üzerindeki dolaylı etkilerinin (artan protein konsantresi gereksinimi, yem tedarik zinciri emisyonları) entegre olarak ölçülmesi için açık veri setleri ve standart varsayımlar gerekmektedir (FAO, 2022; Loladze, 2014). Bu makale, söz konusu boşluklara işaret ederek, yem üretiminin iklim ısınmasına uyumlu ve düşük karbonlu bir yörüngeye taşınmasında kanıt temelli besleme ve LCA-entegrasyonlu karar destek yaklaşımının önemini vurgulamaktadır.

2. Mekanizmalar

2.1. İklim sürücüleri → Verim, fenoloji ve tedarik

Küresel ısınma; mevsim uzunluğu, ısı birikimi (gün-derece), yağış örüntüleri ve "flash drought" (haftalar mertebesinde hızla gelişen ani kuraklık) sıklığı üzerinden yem bitkilerinin verim ve fenolojik gösterglerini değiştirir. Çoklu ürün/iklim model kümeleri (AgMIP; GGCMI) mısır için ısınmaya negatif, buğday için bölgeye ve yönetim pratiklerine duyarlı yanıtların öne çıktığını göstermiştir. Bu değişimler, kaba yem- biçim zamanlarının kaymasına ve biçim sayısının azalmasına yol açarak kaba yem arz güvenliğini ve meraların taşıma kapasitesini dalgalandırır; yem tedarik zinciri fiyat oynaklığı artar

(Rosenzweig ve ark., 2013; IPCC, 2022; Niderkorn et al., 2021; Augustine et al., 2018).

Küresel ısınma, yem bitkilerinin büyüme mevsimini ve gelişim hızını birden çok kanal üzerinden yeniden biçimlendirir. Birincisi, mevsim uzunluğu ve ısı birikimi (gün-derece) artışı, vejetatif ve generatif evrelerin zamanlamasını değiştirir: İlkbahar erkenleşir, ısı birikimi hızlandığı için bitki fenolojik evreleri (çıkış–sapa kalkma–başaklanma/çiçeklenme–olum) daha kısa sürede kat eder. Bu hızlanma çoğu yem bitkisinde biyokütle akümülasyonu için ayrılan zamanı daraltabilir; aynı zamanda lignifikasyonu artırarak yapısal karbon birikimini hızlandırır. Sonuçta, özellikle biçim zamanı gecikirse, sindirilebilirlik düşme eğilimine girer ve ham lif fraksiyonları (NDF/ADF) yükselir (Augustine et al., 2018; Niderkorn et al., 2021).

İkincisi, yağış örüntülerinin bozulması ve flash drought sıklığındaki artış, toprak neminin mevcut olduğu dönemle bitkinin su talebinin tepe yaptığı dönem arasındaki eşleşmeyi bozar. Su stresi yaprak alan indeksi (LAI) gelişimini, stomatal iletkenliği ve fotosentezi sınırlar; bu da hektar başına yem verimini azaltır. Kuraklıkla birlikte artan buhar basıncı açığı (VPD), yapraklardan transpirasyon kaybını yükselterek karbon kazanımını daha da törpüler. Sulanan sistemlerde bile sulama suyu erişilebilirliği ve pompa maliyetleri yükseldiğinden, toplam yem arzı ve maliyet yapısı olumsuz etkilenir (Rosenzweig et al., 2013; IPCC, 2022).

Üçüncüsü, aşırı sıcak olayları (sıcak dalgaları) yalnızca ortalama sıcaklıktan bağımsız bir risk olarak öne çıkar. Kısa süreli ama kritik eşikleri aşan sıcak günler, örneğin sapa kalkma–başaklanma döneminde yemin kalitesini (protein yoğunluğu, şeker–nişasta dengesi, sindirilebilirlik) kalıcı biçimde aşağı çekebilir. Çok yıllık kaba yemlerde (ör. yonca, çok yıllık çayır) bu durum biçimler arası toparlanma süresini kısaltır; biçimler arası yenileme (regrowth) daha düşük hız ve kaliteyle gerçekleşir (Niderkorn et al., 2021).

Dördüncüsü, ürün/iklim çoklu-model ansamblları (AgMIP, GGCMI) sistemli olarak şunu gösterir:

- Mısır (C_4) verimi, ısınmanın ilerleyen kademelerinde (özellikle sıcak dalgası + kuraklık birlikteliğinde) belirgin biçimde negatif trenddedir; çiçeklenme ve dane doldurma evrelerinde ısı/su stresi tanelenme ve dane sayısı üzerinden güçlü kayıplar yaratır. Silajlık mısırda sap-yaprak biyokütlesi bir dereceye kadar korunabilse de enerji yoğunluğu ve sindirilebilirlik düşebilir (Rosenzweig et al., 2013; IPCC, 2022).
- Buğday (C_3) özelinde riskli bölgeye ve yönetim pratiklerine duyarlıdır: Yüksek enlemlerde sınırlı ısınma, sezonu uzatarak verimi destekleyebilirken (soğuk sınırlarının gevşemesi), orta-düşük enlemlerde artan ısı ve su kıtlığı çoğunlukla negatif sonuç verir. Ekim zamanı, çeşit seçimi ve sulama rejimi, ansambl yayılımını belirgin biçimde daraltabilen yönetim kaldıraçlarıdır.

Beşincisi, bu iklim sürücüleri biçim zamanlarını ve biçim sayısını doğrudan etkiler. Yonca benzeri çok yıllık sistemlerde ilk biçimin öne kayması ve son biçimin riskli hava koşullarına (geç yaz/erken sonbahar sıcak dalgası, erken don) yakalanması olasıdır. Bu durum yıllık toplam biçim sayısını azaltabilir veya biçimler arası kalite değişkenliğini artırabilir. Çayır-mera sistemlerinde fenolojik kayma, meranın taşıma kapasitesi ve otlatma zamanlaması üzerinde dalgalanma yaratır; aşırı otlatma riski artar, yenilenme yavaşlar (Augustine et al., 2018; Niderkorn et al., 2021).

Altıncısı, tarladaki bu dalgalanmalar tedarik zincirine fiyat oynaklığı olarak yansır. Bölgesel kuraklık veya sıcak dalgası dönemleri, yonca balyası/silaj gibi kaba yemlerde bölgesel kıtlıklar yaratabilir; işletmeler alternatif kaynaklara yöneldikçe nakliye mesafeleri ve lojistik emisyonlar artar. Yem değeri düşmüş partilerin rasyonda tolere edilebilmesi için enerji yoğunlaştırma, protein konsantresi ve tamponlayıcı kullanımı gerekebilir; bu da rasyon maliyeti ile ürün birimi başına GHG yoğunluğu (LCA'de yem bileşeni) üzerinde yukarı yönlü baskıdır (Rosenzweig et al., 2013; IPCC, 2022).

Son olarak, risk yönetimi açısından iki pratik çıkarım önemlidir:

1. Fenolojiye duyarlı izleme: Büyüme derecesi günleri, VPD, toprak nemi ve flash drought göstergeleriyle erken uyarı panelleri kurmak; böylece biçim tarihini ve sulama/biçim zamanı kararlarını dinamik yönetmek.

2. Uyarlanmış yönetim: Çeşit/karışım (ısı-kuraklığa dayanımlı genotip, derin kök yapısı), ekim-biçim takvimi optimizasyonu, su verimliliği (damla/yağmurlama iyileştirmeleri), toprak organik maddesini artıran uygulamalar (örtü bitkisi, minimum toprak işleme) ve kalite-odaklı hasat (fenolojik eşik + meteorolojik veri) ile hem verim hem kalite kayıplarını sınırlamak.

Özetle, ısınma, yağışta yeniden dağılım ve ani kuraklıkların birleşik etkisi, yem bitkilerinde daha kısa ve daha oynak bir üretim zamanı, daha düşük ve daha değişken kalite ve daha kırılgan bir tedarik zinciri anlamına geliyor. Çoklu-model bulguları, mısırda yaygın negatif, buğdayda bağlama duyarlı sonuçların altını çizerken; pratik düzeyde biçim zamanı yönetimi, su verimliliği ve kalite temelli hasat stratejileri, riskin işletme düzeyinde absorbe edilebilmesi için kritik hale geliyor.

2.2. Yükselen CO_2 (eCO_2) → Kalite ve besin yoğunluğu kaymaları

eCO_2, C_3 bitkilerinde fotosentezi artırırken yapısal olmayan karbonhidratların artışı ve azot seyreltmesi yoluyla protein ve mineral (Fe, Zn vb.) derişimlerinde düşüşe neden olabilir. Loladze'nin (2014) sentezi; 25'e yakın kritik mineralin bitkisel dokularda ortalama ~%8 azaldığını, karbonhidrat/mineral oranının yükseldiğini göstermiştir. Bu "gizli kayma", yem kalitesi açısından ham protein düşüşü ve sindirilebilirlikte azalma şeklinde rasyona yansır; mikrobiyal protein sentezi ve enerji-protein senkronu zayıflar. Sonuçta MUN artışı, NUE düşüşü ve daha yüksek ayak izli protein konsantrelerine yönelme eğilimi artar (Loladze, 2014; IPCC, 2022). PMC+1

eCO_2, özellikle C_3 bitkilerinde karboksilasyonu güçlendirerek net asimilasyonu ve yapısal olmayan karbonhidrat (WSC/TNC) birikimini artırırken, doku C:N oranını yükseltir; bunun tipik sonucu, azot seyreltmesi ve protein derişiminde düşüştür (IPCC, 2021). Bu etki yalnızca "seyreltme" ile sınırlı değildir: kontrollü çalışmalar, eCO_2'nin nitrat asimilasyonunu enzimatik

düzeyde baskılayabildiğini, yani kökten yaprağa taşınan NO_3^-'un organik N'ye dönüşümünün doğrudan inhibe edildiğini göstermektedir (Bloom ve ark., 2010). Sentez ve meta-analizler, C_3 tahıllar ve baklagillerde protein, çinko ve demir başta olmak üzere besin yoğunluklarında anlamlı azalmalar bulmuştur; örneğin bir derlemede eLife derlemesi yaklaşık 25 mineralde ortalama ~%8'lik düşüş bildirmekte, Tarla alan deneyleri de C_3 tanelerinde Fe/Zn ve proteinde düşüşleri doğrulamaktadır (Loladze, 2014). IPCC AR6, bu bulguları yüksek güvenle özetleyerek, tür/çeşit ve yetiştirme koşullarına bağlı değişkenlik olsa da protein ile Fe–Zn azalmasının tutarlı bir risk olduğunu vurgular (IPCC, 2022). Kaba yem özelinde, eCO_2 (+ sıklıkla eşlik eden ısınma) ham proteini düşürür, NDF/ADF'yi yükseltir ve in vitro sindirilebilirliği azaltır; bu tablo yonca için deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca eCO_2'nin su kullanımını azaltıcı stomatal kapanma etkisi, kök bölgesinde kütlesel akışla taşınan besin elementlerinin alımını da zayıflatabilir; ısınmayla birlikte görülen yüksek VPD koşulları bu baskıyı artırarak, doku N ve mikro besin yoğunluklarında ek düşüşlere yol açabilir (Niderkorn ve ark., 2021; Kizildeniz, 2024).

eCO_2 + kronik ısınmanın birlikte denendiği çalışmalar, N alımı ve N-asimilasyon proteinlerinin aktivitesinde ek daralmalarla toplam doku N'nin daha da gerilediğini göstermiştir; bu, ilerleyen on yıllarda ısınmanın eCO_2 ile eş-etkileşim içinde kaliteyi zayıflatabileceğine işaret eder (Jayawardena ve ark., 2017). Besleme açısından sonuçlar açıktır: daha yüksek lif ve daha düşük protein rasyonlarda enerji yoğunlaştırmayı ve by-pass (RUP) proteinin dikkatli dengesini gündeme getirir; mikrobiyal protein sentezi için gereken enerji–azot senkronu bozulduğunda, rumende amonyak ve üre döngüsü artar ve bu durum sütte üre azotu (MUN) ile azot kullanım etkinliği (NUE) göstergelerine yansır. Cambridge University Press & Assessment Nitekim büyük veri/meta-analizler MUN'un rasyon ham protein, kuru madde tüketimi ve idrarla N atımıyla ilişkili olduğunu; NUE'nin ise rasyonun N kaynağı ve rumen senkronuna duyarlı biçimde değiştiğini göstermektedir (Zhang ve ark., 2020; Zhao ve ark., 2025).

Kalite kaybını telafi için daha yüksek ayak izli protein konsantreleri devreye alındığında, enterik CH_4 sabit kalsa bile yem kaynaklı eCO_2 bileşeni artabilir; bu nedenle eCO_2'nin neden olduğu protein/mineral düşüşleri, LCA metriğiyle değerlendirilmelidir. IPCC PMC+1 notu: eCO_2 ve iklim baskılarının kaba yem kalitesi/genetiği üzerine ABD Ulusal Sağlık Enstitüsü'nün (NIH /

NLM) barındırdığı açık erişimli biyomedikal makale arşivi (PMC) kapsamlı bir derleme, baklagil kuru ollarında kaliteyi belirleyen genetik–çevre etkileşimlerini ve ıslah fırsatlarını ayrıntılandırır. (Kulkarni ve ark., 2018).

2.3. Kaba yem özelinde yonca

Yonca, ruminant rasyonlarının temel lif-protein kaynağı olup (özellikle süt sığırlarında) NDF/NDFd, RDP–RUP dengesi ve tamponlayıcı kapasite üzerinden performansı belirgin biçimde etkiler. eCO_2 + ısı koşullarında yoncada ham protein (HP) azalması, NDF/ADF'de artış ve in vitro sindirilebilirlikte düşüş gösteren kontrollü çalışmalar, yem değerindeki bu kaymanın pratikte enerji artırma ve by-pass (RUP) protein dengelemesini gerektirebileceğini ortaya koymaktadır (Sanz-Sáez ve ark., 2012). Bu bağlamda Sinorhizobium meliloti suşları arası farklılıklar kalite yanıtını kısmen modüle edebilmekte; bu da ısınan iklimde simbiyoz yönetimi/ıslah stratejileri için kullanılabilir bir kaldıraç olduğunu düşündürmektedir (Sanz-Sáez ve ark., 2012). Bu bulguların bir kısmı yapılan özgün çalışmalardda bildirilmektedir (Sanz-Sáez ve ark., 2012; Palmonari ve ark., 2014).

eCO_2'ye eşlik eden fizyolojik kaymalar (WSC/TNC birikimi, C:N artışı, nitrat asimilasyonunun kısmi baskılanması) doku N'yi ve mikrobesin yoğunluğunu düşürerek rasyonun enerji-azot senkronunu zayıflatır; sonuçta MUN eğiliminde artış ve NUE'de gerileme riski doğar; bu da süt sığırı rasyonlarında protein kaynağı kompozisyonu ile hasat/biçim zamanlamasının birlikte yönetilmesini gerektirir (Sanz-Sáez ve ark., 2012; Palmonari ve ark., 2014). Sahada, olgunluk ilerledikçe (ör. 21→35 gün kesim aralığı) HP düşüşü, indigestible NDF (iNDF) artışı ve NDF sindirilebilirliğinde gerileme gözlenmiş; bu da aynı KMT'de süt verimi potansiyelinin düşebileceğini göstermiştir (Palmonari ve ark., 2014). Bu nedenle yaz-sonu/erken sonbahar sıcak dalgası ve kuraklık dönemlerinde biçim zamanını öne almak (tomurcuk-ilk çiçek) ve rasyonda %2–3 KM düzeyinde güvenli yağ + RUP optimizasyonu gibi yoğunlaştırma tedbirleri, kalite kayıplarını dengelemeye yardımcı olabilir (Sanz-Sáez ve ark., 2012; Palmonari ve ark., 2014; Lee ve ark., 2017). eCO_2 altında kök-mikoriza ve *S. meliloti* etkileşimlerinin biyokütle ve kalite bileşenlerini etkileyebildiğini bildiren çalışmalar (AMF + eCO_2 senaryoları) genotip × simbiyoz × çevre etkileşimine işaret eder; pratikte bu, su/ısı stresinin

yoğun olduğu sezonlarda, inokulant seçimi ve çeşit-suş eşlemesi ile belirli kalite göstergelerinde (örn. HP, NDFd) kısmi iyileşme olasılığını gündeme getirir (Baslam ve ark., 2014). Türkiye koşullarına yakın genotipler üzerinde iklim simülasyon seraları ile yürütülen yeni çalışmalar da eCO_2'nin (600–1000 ppm) çeşit-spesifik büyüme ve kalite etkilerini doğrulamakta; tarla uygulamalarında yerel çeşit-suş kombinasyonlarının seçilmesi gereğine dikkat çekmektedir (Kizildeniz, 2024).

Özetle, eCO_2 + ısı altında yoncada beklenen kalite kayması rasyon mühendisliği gerektirir: (i) biçim zamanını fenolojiye duyarlı yönetimi (tomurcuk/ilk çiçek), (ii) RUP ve enerji yoğunlaştırma ile rumen senkronunun korunması, (iii) simbiyotik suş/AMF stratejileri ve çeşit seçimi; bunların her biri süt sığırlarında KMT, MUN, NUE ve sonuçta sütlerin enerji eşdeğerine göre standardize edilmiş süt (ECM) başına GHG yoğunluğu üzerinde marjinal fayda sağlayabilir (Sanz-Sáez ve ark., 2012; Palmonari ve ark., 2014; Lee ve ark., 2017).

2.4. Isı stresi (THI) → Alım, sağlık ve doğurganlık

Isı stresi; kuru madde alımı (KMT), rumen fonksiyonu, oksidatif stres ve endokrin denge üzerinden performansı baskılar; tipik yanıtlar daha az yem tüketimi, artan solunum/kalp atış hızı, rumende tamponlama kapasitesinde azalma ve enerji-protein yaralanımında kayma şeklinde görülür. Bu fizyolojik-davranışsal yanıtların bileşkesi süt verimi ve kompozisyonunda düşüşlerin yanı sıra üreme performansında bozulmalar doğurur (Rodríguez-Venegas ve ark., 2023; Stefańska ve ark., 2024; Oliveira ve ark., 2025).

Kritik THI eşiği yüksek verimli sürülerde daha düşük değerlere kayma eğilimindedir; çok sayıda saha ve derleme çalışması THI ≈ 68 bandında dahi süt verimi, davranış ve konfor göstergelerinde kötüleşmenin başlayabildiğini bildirmiştir. Örneğin Meksika'nın kurak-yarı kurak koşullarında 2.467 Holştayn üzerinde yapılan prospektif analizde THI yükseldikçe süt üretimi ve yatarak dinlenme süresi azalmış; bozulmalar THI 68–71 aralığında netleşmiştir. Buna paralel sentezler de THI≈68'i başlangıç eşiği olarak rapor eder (Rodriguez ve ark., 2023)

Aşırı sıcak günler sadece günlük ortalamalarla değil, ıslak wet-bulb gibi birleşik göstergelerin saatlik aşımıyla da verimi düşürür; yüksek frekanslı veriyle 12 yıllık >320 milyon günlük kayıt üzerinde yapılan analiz, tek bir şiddetli sıcak günün dahi günlük sütü ~%10'a varan oranlarda azaltabildiğini ve etkinin 10 günden fazla sürebildiğini göstermiştir. Bu bulgular, soğutma uygulamaları devredeyken bile ısı dalgalarının kalıcı "taşan etkiler" yaratabildiğini, dolayısıyla erken ve veri güdümlü soğutmanın önemini vurgular (Palandri ve ark., 2025).

Close-up (kuru dönemin son haftaları) maruziyeti, izleyen laktasyonda verim, fertilite ve immünometabolik profili olumsuz etkileyebilir; prospektif kohort izlemlerinde doğuma −21/−14/−7 günlerdeki THI artışlarıyla ilk laktasyon süt veriminde kg düzeyinde kayıplar ve fertilite gecikmeleri ilişkili bulunmuştur. Bu kanıt, barınak-mikroiklim ve rasyon optimizasyonunun kuru dönemden itibaren başlatılmasını destekler (Stefańska ve ark., 2024).

Bu nedenle "yaz rasyonu" uygulamaları için eşiklerin erken tanımlanması ve düşük THI'lardan itibaren önlemlerin devreye alınması önerilir: enerji yoğunlaştırma (stresli günde KMT düşüşünü telafi için), pozitif DCAD + elektrolit yönetimi (rumen-sistemik tamponlama), serinletme-su stratejileri (gölgelik, fan-püskürtme kombinasyonları, suya erişim) ve yakın dönem için ısı yükünü azaltan barınak pratikleri bu paketin çekirdeğini oluşturur. Güncel derleme ve senaryo çalışmalarında bu araçların bir arada kullanımı üretim kaybını anlamlı azaltabilse de, aşırı sıcak günlerde tam telafinin her zaman mümkün olmadığı vurgulanır (Oliveira ve ark., 2025)

2.5. Su ve hidrolojik kısıtlar → Tuzluluk, kalite ve hasat zamanı

Kuraklık, sulama kısıtı ve artan tuzluluk kaba yemlerde selüloz/lignin oranlarını ve kül içeriğini etkileyebilir; biçim zamanlaması uzadıkça sindirilmeyen NDF fraksiyonu yükselir, bu da rasyonda enerji yoğun girdilere bağımlılığı artırır. Hidrolojik baskıların mekânsal heterojenliği, bölgesel yem üretiminin kendi kendine yeterliliğini aşındırarak ithalat duyarlılığı ve fiyat oynaklığı yaratır (IPCC, 2022; FAO, 2023).

Kuraklık, su kıtlığı ve artan tuzluluk baskısı, hem bitkisel üretim sistemlerinin fizyolojik işleyişini hem de kaba yemlerin besleme değerini doğrudan etkileyen başlıca hidrolojik stres faktörleridir. Bitkiler, özellikle yarı kurak ve kurak ekosistemlerde, su potansiyelindeki azalmaya osmotik adaptasyon yoluyla yanıt verirken, hücre duvarı bileşenlerinde (selüloz, hemiselüloz, lignin) yeniden yapılanmalar meydana gelir. Bu süreç, yapısal karbonhidrat oranlarının artmasına ve sindirim açısından dirençli NDF fraksiyonunun yükselmesine neden olur (Constas ve ark., 2021; IPCC, 2022).

Sulama suyu kalitesindeki bozulma —özellikle sodyum ve klorür iyonlarının birikimiyle artan elektriksel iletkenlik (EC)—, yem bitkilerinde iyon dengesini bozarak fizyolojik stres yaratır. Bu da fotosentetik etkinliğin azalması, klorofil içeriğinde düşüş ve biyokütle veriminde gerileme gibi etkilerle sonuçlanır. Artan tuzlulukla birlikte kök bölgesinde suyun biyoyararlanımı düşer, bitki efektif olarak "fizyolojik kuraklık" yaşar (Ayers ve Westcot, 1985; Munns ve Tester, 2008).

Biçim zamanlaması (hasat zamanı) uzadıkça, bitki dokularında lignifikasyon süreci hızlanır; bu da sindirilebilir enerji oranlarının düşmesine ve rasyonlarda yüksek enerji yoğunluğuna sahip konsantre girdilere (tahıllar, yağlı tohum küspeleri) olan bağımlılığın artmasına yol açar. Sonuçta, rasyon maliyetleri yükselir, yem verim zincirinin enerji etkinliği azalır (Van Soest, 1994; NRC, 2021). Bölgesel düzeyde değerlendirildiğinde, hidrolojik baskıların mekânsal heterojenliği kaba yem üretiminde yerel arz dengesizlikleri yaratır. Bu durum, ülkelerin ve bölgelerin yem ithalatına duyarlılığını artırarak fiyat oynaklığı ve tedarik zinciri kırılganlıkları doğurur (FAO, 2023; IPCC, 2022).

Uzun vadede bu eğilim, tarımsal üretim sistemlerinde su verimliliği temelli stratejilerin (tuza toleranslı türlerin seçilmesi, damla sulama, zamanında biçim optimizasyonu) zorunluluk haline gelmesine neden olmaktadır. IPCC'nin Altıncı Değerlendirme Raporu'na göre, 2050 sonrasında Akdeniz havzası ülkelerinde tarımsal su mevcudiyetinin %10–30 oranında azalması, kaba yem üretiminin coğrafi desenini değiştirecek ve hayvansal üretim zincirlerinde bölgesel dengesizlikleri derinleştirecektir (IPCC, 2022).

2.6. LCA bağlamında "yem → ürün" emisyon zinciri

Yem kalitesindeki düşüşler (yoncada HP −2 puan), rasyon hedeflerini tutturmak için soya küspesi gibi daha yüksek emisyonlu girdilere kaymaya yol açabilir; bu, yem kaynaklı CO_2e bileşenini büyütür. Öte yandan besleme-temelli azaltımlar (3-NOP ile enterik CH_4'te ~%20–40; korunmuş yağlarla ~%5–10) net yoğunluğu aşağı çekebilir. Bu nedenle, iklim kaynaklı kalite/verim kaymalarını GLEAM 3.0 gibi araçlarla bütün sistem sınırları içinde değerlendirmek, politika ve işletme düzeyinde karşılaştırılabilir sonuçlar üretir (FAO 2022; IPCC, 2022).

Yem üretimi, hayvansal ürünlerin toplam karbon ayak izinde genellikle en yüksek paya sahip aşamalardan biridir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi LCA yaklaşımıyla bakıldığında, yem bileşenlerinin kalitesi ve formülasyonu, "çiftlikten sofraya" karbon yoğunluğunu belirleyen kritik değişkenlerdendir. Özellikle kuraklık, tuzluluk ve sıcaklık stresleri altında kaba yemlerde ham protein içeriğinin düşmesi rasyon dengesini bozar; bu durumda hayvanın besin gereksinimlerini karşılamak için soya küspesi, mısır gluten unu veya kanola küspesi gibi daha yüksek emisyonlu (embedded emissions) hammaddelere yönelim artar (FAO, 2023; Herrero ve ark., 2016).

Bu değişim zinciri, yem kaynaklı CO_2e emisyon bileşenini büyütür; çünkü yüksek proteinli ithal girdilerin üretimi ve taşınması, çoğunlukla yüksek arazi kullanımı değişimi (LUC) ve fosil yakıt tüketimiyle ilişkilidir. Dolayısıyla yem kalitesindeki küçük bir düşüş bile, sistemin toplam sera gazı profilinde orantısız bir artışa neden olabilir (Model, 2017; Caro ve ark., 2018).

Öte yandan, besleme-temelli azaltım stratejileri bu etkiyi kısmen dengeleyebilir. Örneğin, 3-NOP uygulamasıyla enterik metan salımı %20–40 oranında düşürülebilirken, korunmuş yağ veya doymuş yağ katkılarıyla bu oran ek olarak %5–10 civarında azaltılabilmektedir. Benzer biçimde, nitrifikasyon inhibitörleri ve rasyonel protein dengesi (amino asit temelli optimizasyon) stratejileri de, atık azotu (NH_3 ve N_2O) azaltarak karbon yoğunluğunu aşağı çeker (Hristov ve ark., 2022).

Bu nedenle, iklim kaynaklı kalite veya verim kaymalarını değerlendirirken yalnızca tek bir aşama yerine, bütün sistem sınırlarını dikkate almak gerekir. FAO'nun *Global Livestock Environmental Assessment Model* aracı olan GLEAM 3.0, üretim zincirinin her aşamasındaki (yem üretimi, enterik fermentasyon, gübre yönetimi, enerji kullanımı) emisyonları bütünleştirerek politika, yatırım ve işletme düzeyinde karşılaştırılabilir emisyon göstergeleri sağlar (FAO, 2023; IPCC, 2022).

Bu yaklaşım, hem ülke hem de çiftlik düzeyinde iklim uyum stratejilerinin (ör. düşük emisyonlu yem formülasyonu, yerel hammadde optimizasyonu, karbon ayak izi etiketleme) etkilerini nesnel biçimde kıyaslama olanağı sunar.

2.7. Yönetim çıktılarına köprü: Hassas besleme ve erken uyarı

Sensör verileri (mikroiklim, aktivite/ruminasyon), süt kayıtları (MUN, süt bileşimi) ve karar modelleri birleştirilerek THI tabanlı erken uyarılar verilebilir; pozitif DCAD, elektrolit desteği, su yönetimi ve soğutma kararları gerçek zamanlı optimize edilir. Bu altyapı, MRV ile uyumlu GHG/N giriş-çıkış takibini mümkün kılar ve LCA sonuçlarının pratik iyileştirilmesine hizmet eder (IPCC, 2022; FAO, 2023).

Hayvansal üretimde iklimsel streslerin yönetimi, artık yalnızca fizyolojik dayanıklılık veya altyapı yatırımlarıyla değil, veri tabanlı karar destek sistemleri aracılığıyla bütüncül biçimde yürütülmektedir. Bu kapsamda, hassas besleme (precision feeding) yaklaşımları ve erken uyarı algoritmaları, LCA ve GHG izleme altyapısının saha uygulamasına bağlanmasında kilit rol oynar (FAO, 2023; IPCC, 2022).

Sistem düzeyinde, sensör tabanlı veri akışları (mikroiklim sensörleri, ruminasyon/aktivite izleme yakalıkları, yem tüketim sensörleri) ile süt kayıtlarından türetilen biyobelirteçler (süt üre nitrojeni [MUN], süt bileşimi, somatik hücre sayısı) entegre edilerek ısı stresi ve metabolik dengesizlikler için erken uyarı sinyalleri üretilebilir. Bu sinyaller, özellikle ısı-nem indeksi (THI) eşiğine dayalı modellerle ilişkilendirildiğinde, sürü düzeyinde risk temelli

yönetim müdahalelerini zamanında başlatmayı sağlar (Giannone ve ark., 2023; Nam ve ark., 2024).

Erken uyarı çıktıları; pozitif DCAD rasyon formülasyonu, elektrolit ve tamponlayıcı destek planlaması, su tüketim yönetimi ve mekanik soğutma stratejilerinin (fan, sprinkler, sisleme vb.) otomatik veya operatör destekli biçimde optimize edilmesine olanak tanır. Böylece, üretim performansı korunurken aynı zamanda ısıl stres kaynaklı emisyon artışları ve verim kayıpları sınırlandırılır (Polsky ve von Keyserlingk, 2017).

Bu altyapı, yalnızca hayvan refahı ve üretim verimliliği açısından değil, aynı zamanda MRV çerçeveleriyle de uyumlu bir emisyon veri zinciri oluşturur. Bu sayede, azot (N) giriş-çıkış dengesi, CH_4/N_2O emisyon ölçütleri ve enerji kullanımı gerçek zamanlı olarak izlenebilir hale gelir. Elde edilen izlenebilir veriler, FAO'nun *GLEAM* veya IPCC Tier 2–3 metodolojileriyle bütünleştirildiğinde, LCA çıktılarının pratik olarak iyileştirilmesi ve çiftlik yönetim kararlarının iklim hedefleriyle hizalanması mümkün olur (FAO, 2023; IPCC, 2022).

Tablo 1. CO_2 → protein düşüş katsayıları (özet)

Ürün grubu	Tipik eCO_2 (≈ 550 ppm) etkisi	Not
C_3 Tahılları	Protein −%3–17	Birçok çalışmada Fe/Zn'de de düşüş; "karbon/mineral" oranı artışı. (Rosenzweig ve ark., 2013)
Soya	Protein ve bazı minerallerde düşüş; büyüklük ürüne/çeşide göre değişken	Tohum proteininde azalma raporları var ancak aralık tür/çevreye bağlı. (Myers ve ark., 2014)
Kaba yemler	HP'de düşüş eğilimi; NDF/ADF ↑; sindirilebilirlikte azalma bildirildi	Etki büyüklüğü; iklim senaryosu, kesim devresi, S. meliloti suşuna bağlı. (Sanz-Sáez ve ark., 2012)

Tablo 2. Adaptasyon/Azaltım seçenekleri (besleme odaklı)*

Müdahale	Primer hedef	Tipik etki büyüklüğü	Not
3-NOP	Enterik CH_4 ↓	−%22–35 (ortalama); bazı denemelerde ∼−%28–34	Verime olumsuz etkisiz; doz/diğer rasyon faktörlerine bağlı heterojenlik. (Hristov ve ark., 2022)
Korunmuş yağ (≈ %2–3 KM)	CH_4 ↓; enerji yoğunluğu ↑	−%5–10 tipik	Kaynak/katkı tipine ve toplam yağ düzeyine duyarlı. (Zhang ve ark., 2024)
Tane/nişasta dengesi	DMI ve enerji dengesi	Isı stresinde net enerji açığını sınırlar	CH_4/ECM üzerinde ikincil etkiler. (IPCC/derle (IPCC 2022)

Müdahale	Primer hedef	Tipik etki büyüklüğü	Not
DCAD/elektrolit optimizasyonu	Isı stresinde asit-baz/sıvı dengesi	DMI ve süt verimi kayıplarını sınırlayabilir	"THI ≈ 68" altındaki erken soğutma+DCAD birlikte planlanmalı. (Zhang ve ark., 2024)

*Varsayım: Yaz döneminde yonca HP'si %20'den %18'e düştü (−2 puan). Süt ineği TMR'ında HP hedefini tutturmak için soya küspesi +10 kg/ton KM arttırıldı; diğer bileşenler sabit. Ortalama ayak izi: yonca alanı 300 kg CO_2e/t KM, soya küspesi 600 kg CO_2e/t KM (nakliye/işleme dâhil) ve enterik CH_4 sabit. Sonuç (illüstratif): ton TMR başına ~+3 kg CO_2e artış (yaklaşık +%1–2), rasyon maliyetinde +%0,8–1,5; eğer aynı anda 3-NOP uygulanırsa, enterik CH_4'te −%25 ile birim süt GHG yoğunluğu net azalır. (Hesap mantığı GLEAM/LCA literatürü ve 3-NOP meta-analiz aralıklarıyla tutarlıdır.) (MaeLeod ve ark., 2018)

Tablo 3. Rasyon Bileşenlerinde Değişime Bağlı CO_2e Emisyon Farkı (kg/t KM)*

Girdi	Eski (kg/t KM)	Yeni (kg/t KM)	Fark	Emisyon faktörü (kg CO_2e/kg)	CO_2e farkı (kg/t)
Yonca	400	400	0	0,30	0
Soya küspesi	150	160	+10	0,60	+6
Diğer	450	440	−10	0,30 (varsayım)	−3
Toplam	1000	1000	0	—	+3 (~+%1–2)

*Emisyon faktörleri öncelikle GFLI veri tabanından (ülke/bölgeye özgü uygun veri setleri) alınmıştır; uygun veri bulunmayan kalemlerde Agri-footprint ve ecoinvent ile çapraz kontrol yapılmıştır. CO_2e hesapları GWP-100 (IPCC 2019 Refinement/AR6 listeleri) kullanılarak yapılmıştır. 'Diğer' için 0,30 kg CO_2e/kg varsayımı, LEAP yönergelerine uygun olarak benzer düşük işleme düzeyindeki kaba yem/yan ürün kategorilerinin aralığına dayanır (van Paassen ve ark., 2019; AF, 2025; GFLI, 2025).

Sonuç olarak, bu dijital–biyofiziksel entegrasyon hattı, saha verisinin iklim hesaplarına dönüşümünü sağlar; yani, "ölçülen davranıştan doğrulanabilir azaltım" zincirini kurar. Böylece LCA modelleri yalnızca retrospektif analiz araçları değil, canlı yönetim sistemlerinin sürdürülebilirlik pusulaları haline gelir.

3. Küresel iklim değişikliğinin etkilerine karşi farkli çözüm önerileri

Bu metin; ruminant sistemlerinde iklim baskıları altında sürdürülebilir üretimi desteklemek amacıyla, kuru madde tüketimi (KMT), protein ve selüloz/NDF, konsantre seviyesi, yağ ekleme, besleme sıklığı, katkı maddeleri ve metan azaltımı başlıklarını güncel literatür ışığında bütüncül bir çerçevede özetler. Odak; ürün-odaklı sera gazı yoğunluğunu (kg CO_2e/kg ECM) düşürürken üretim, refah ve ekonomik çıktıları korumaktır (IPCC, 2022; FAO, 2023; NASEM, 2021).

3.1. Kuru Madde Tüketimi (KMT)

Isı stresi KMT'yi anlamlı biçimde düşürür; mekanizma davranışsal (yem alma paterninin gece saatlerine kayması), endokrin (iştah düzenleyici sinyaller) ve rumen mikrobiyotasında asit yükü artışıyla ilişkilidir. THI ≈ 68–72 aralığında bile süt verimi ve KMT üzerinde olumsuz etkiler bildirilmiştir (Polsky ve von Keyserlingk, 2017; St-Pierre ve ark., 2003). Yönetim yanıtları arasında gölgeleme/soğutma, pozitif DCAD rasyonları, elektrolit–tampon desteği ve yüksek sindirilebilirlikte kuru madde kullanımı öne çıkar (NASEM, 2021). KMT'nin korunması, ürün başına emisyon yoğunluğunu azaltmada belirleyici olduğu için LCA sonuçlarına doğrudan yansır (FAO, 2023; IPCC, 2022).

3.2. Rasyon Protein Konsantrasyonu

Aşırı ham protein (HP) tüketimi MUN'u (süt üre azotu) yükseltir, idrar N kaybını artırır ve NUE'yi (azot kullanım verimliliği) düşürür; bu da N_2O emisyon potansiyelini yükseltir (NASEM, 2021). Sahada MUN'un 10–16 mg/dL aralığında tutulması, protein-enerji senkronizasyonu ve amino asit temelli dengeleme ile mümkündür (Spek ve ark., 2013; Wattiaux ve Karg, 2004). Gereksinime göre ayarlanmış HP formülasyonu, süt proteini ve verimi korunurken LCA'de yem kaynaklı CO_2e ve reaktif azot çıktılarını azaltır (Hristov ve ark., 2013).

3.3. Rasyon Selüloz/NDF İçeriği

NDF, geviş ve tükürük akışını uyararak rumen pH tamponlanmasını destekler; ancak aşırı NDF yem geçiş hızını düşürür ve enerji alımını sınırlar. Pik laktasyonda ~%28 düzeyi (rasyon yapısına bağlı değişkenlik) performans ve sağlık açısından avantaj bildirilmiştir; %25'in altı SARA (düşük pH + tekrarlayıcı asit yükü + sessiz verim kaybı) riskini, %34'ün üstü ise enerji kısıtını artırabilir. NDF'nin kaynağı da kritiktir: çayır/yonca temelli NDF, nişasta-yoğun mısır silajına kıyasla metan verimini farklı etkileyebilir (Hammond ve ark., 2016; Beauchemin ve ark., 2020).

3.4. Rasyonların Konsantre Yem Seviyesi

Konsantre artışı propiyonat oluşumunu artırarak enterik CH_4 verimini (g/kg KMT) düşürebilir; fakat toplam günlük CH_4 ve emisyon yoğunluğu, foraj sindirilebilirliği, nişasta kaynağı ve işlenme derecesi ile birlikte değerlendirilmelidir (Beauchemin ve ark., 2020). Aşırı konsantre kullanımında

SARA, tırnak sağlığı ve süt bileşimi riskleri artabilir; bu nedenle tamponlar ve etkin kaba yem NDF'siyle denge esastır (NASEM, 2021).

3.5. Rasyona Yağ Eklenmesi

Korunmuş yağlar ve belirli yağ asidi profilleri, enterik metanı genelde %5–10 azaltırken rasyonun enerji yoğunluğunu yükseltir; ısı stresinde KMT düşüşünün etkisini kısmen telafi edebilir (Hristov ve ark., 2013; Beauchemin ve ark., 2020). Doz/kompozisyon seçimi süt yağı ve proteinini etkileyebileceğinden, kaynak (palm, kalsiyum tuzları, by-pass lipidler) ve düzey titizlikle yönetilmelidir (NASEM, 2021).

3.6. Ruminantlarda Besleme Sıklığının Artırılması

TMR sunum sıklığının ve yem itmenin artırılması, rasyon ayrıştırmayı azaltarak rumen pH dalgalanmalarını sınırlayabilir; sıcak koşullarda süt verimi ve stabilitesine katkı sağlayabilir (DeVries ve ark., 2005; Hart ve ark., 2014). Etki büyüklüğü laktasyon evresi, otomatik sağım sistemleri ve rasyonun fiziksel efektifliği ile değişkendir.

3.7. Katkı Maddelerinin Kullanımı

• 3-NOP (3-nitrooxypropanol): Meta-analiz ve saha denemeleri enterik CH_4'te %20–40 azalma bildirmektedir; etkinlik doz, diyet NDF/yağ düzeyi ve uygulama süresine duyarlıdır (Hristov ve ark., 2022; Dijkstra ve ark., 2018). Performans etkisi çoğu koşulda nötr veya sınırlı düzeydedir.

- Deniz yosunu (Asparagopsis spp.): Bazı denemelerde %60–80'e varan CH_4 azalımı görülse de bromoform güvenliği, tedarik ve kalıcılık başlıkları araştırılmaktadır (Roque ve ark., 2021).
- Kondanse tanenler ve esansiyel yağlar: Metan ve azot atım paterni üzerinde olumlu etkiler bildirilebilir; ancak yem alımı/sindirilebilirlik etkileri kaynağa ve doza bağlı değişir (Jayanegara ve ark., 2012; Maia ve ark., 2022).
- Nitr at ve iyonoforlar: Uygun doz ve yönetimde CH_4 azaltımına katkı sağlayabilir; bütün çiftlik LCA'sında gübre ve enerji kullanımıyla birlikte değerlendirilmelidir (Beauchemin ve ark., 2020).

3.8. Metan Üretiminin Azaltılması: Bütüncül Yaklaşım ve Ürün Bazlı Yoğunluk

Güncel derlemeler, besleme (yüksek sindirilebilir foraj, dengeli konsantre, lipid ve hedeflenmiş katkılar) + yönetim (serinletme, yemleme

zamanı, gübre yönetimi) kombinasyonlarının ECM başına emisyon yoğunluğunu anlamlı düşürebildiğini göstermektedir (Beauchemin ve ark., 2020; FAO, 2023). GLEAM 3.0 ve IPCC Tier 2–3 çerçeveleri, enterik CH_4, gübre N_2O ve yem kaynaklı CO_2e bileşenlerini bir araya getirerek politika ve işletme düzeyinde karşılaştırılabilir sonuçlar üretir (Gerber ve ark., 2013; IPCC, 2022).

KAYNAKLAR

1. AF, (2025). *Tarım/gıda için kapsamlı LCI; yem bileşenleri dâhil.* Agri-footprint– Sürüm 5.0/6.0 https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/Agri-Footprint-5.0-Part-2-Description-of-data.pdf?utm_source=chatgpt.com (erişim tarihi 10/11/2025).
2. Augustine, D. J., Blumenthal, D. M., Wilmer, H., Porensky, L. M., & Derner, J. D. (2018). Elevated CO_2 induces substantial and persistent declines in forage quality irrespective of warming in mixedgrass prairie. *Ecological Applications,* 28(3), 721–735. https://doi.org/10.1002/eap.1673
3. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev.1). Food and Agriculture Organization. openknowledge.fao.org
4. Baslam, M., Antolín, M. C., Gogorcena, Y., Muñoz, F., & Goicoechea, N. (2014). Changes in alfalfa forage quality and stem carbohydrates induced by arbuscular mycorrhizal fungi and elevated atmospheric CO_2. *Annals of Applied Biology, 164*(2), 190–199. https://doi.org/10.1111/aab.12092 Wiley Online Library
5. 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. *Animal*, 14(S1), s2–s16. https://doi.org/10.1017/S1751731120001783
6. Bloom, A. J., Burger, M., Asensio, J. S. R., & Cousins, A. B. (2010). Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(19), 9409–9414. https://doi.org/10.1073/pnas.1004938107
7. Caro, D., Davis, S. J., Kebreab, E., & Mitloehner, F. (2018). Land-use change emissions from soybean feed embodied in Brazilian pork and poultry meat. *Journal of cleaner production*, *172*, 2646-2654.
8. Constas, M. A., d'Errico, M., Hoddinott, J. F., & Pietrelli, R. (2021). *Resilient food systems–A proposed analytical strategy for empirical applications: Background paper for The State of Food and Agriculture 2021. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 21–10*. Food & Agriculture Org..

9. Dijkstra, J., Bannink, A., France, J., Kebreab, E., & van Gastelen, S. (2018). Short-term strategies for reducing methane emission from ruminants: Modelling meta-analysis of dietary mitigation options. *Animal*, 12(S2), s272–s283. https://doi.org/10.1017/S1751731118001228
10. DeVries, T. J., von Keyserlingk, M. A. G., & Beauchemin, K. A. (2005). Frequency of feed delivery affects the behavior of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science,* 88(10), 3553–3562. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73039-8
11. Duru, S. (2018). Determination of starting level of heat stress on daily milk yield in Holstein cows in Bursa city of Turkey. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi,* 65(2), 193–198. https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/d8154eb2-5857-4345-aab7-3022ec2e4ae1/content
12. FAO. (2022). *Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) 3.0:* Model description. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gleam/docs/GLEAM_3.0_Model_description.pdf
13. FAO. (2023). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc8166en
14. Gerber, P. J., et al. (2013). Tackling climate change through livestock. Food and Agriculture Organization.
15. GFLI, (2025). (Global Feed LCA Institute) – *Yem hammaddeleri için standart LCA veri setleri.* https://globalfeedlca.org/branded-data-participants/ (erişim tarihi 10/11/2025).
16. Giannone, C., Bovo, M., Ceccarelli, M., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2023). Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals*, *13*(22), 3451.
17. Hart, K. D., McBride, B. W., & DeVies, T. J. (2014). Effect of frequency of feed delivery on the behavior and productivity of dairy cows. *Journal of Dairy Science,* 97(3), 1713–1724.
18. Hammond, K. J., et al. (2016). Review of nutritional strategies to reduce methane emissions from ruminants. *Animal Production Science,* 56(3), 469–485.

19. Herrero, M., Wirsenius, S., Henderson, B., Rigolot, C., Thornton, P. K., Havlík, P., de Boer, I., & Gerber, P. J. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change, 6*(5), 452–461. https://doi.org/10.1038/nclimate2925
20. Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., et al. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science,* 91(11), 5045–5069. https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583
21. Hristov, A. N., Kebreab, E., Niu, M., Oh, J., Bannink, A., Bayat, A. R., ... & Yu, Z. (2022). Global methane mitigation in livestock systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 6*, 951843. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.951843
22. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (WGII, Ch. 5: Food, Fibre and Other Ecosystem Products). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-5/ IPCC
23. Jayawardena, D. M., Heckathorn, S. A., Bista, D. R., Mishra, S., Boldt, J. K., & Krause, C. R. (2017). Elevated CO2 plus chronic warming reduce nitrogen uptake and levels or activities of nitrogen-uptake and-assimilatory proteins in tomato roots. *Physiologia Plantarum*, *159*(3), 354-365.
24. Jayanegara, A., et al. (2012). Meta-analysis on the use of tannins in ruminant diets to mitigate methane emissions. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,* 96, 365–375.
25. Kebreab, E., Bannink, A., Pressman, E. M., Walker, N., Karagiannis, A., van Gastelen, S., & Dijkstra, J. (2023). A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. *Journal of Dairy Science,* 106(2), 927–936. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22211
26. Kizildeniz, T. (2024). Assessing the growth dynamics of alfalfa varieties (*Medicago sativa* cv. Bilensoy-80 and Nimet) response to varied carbon dioxide concentrations. *Heliyon, 10*(7), e28975. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28975 (Açık erişim: PMC) PMC
27. 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. https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234

28. Kulkarni, K. P., Tayade, R., Asekova, S., Song, J. T., Shannon, J. G., & Lee, J. D. (2018). Harnessing the potential of forage legumes, alfalfa, soybean, and cowpea for sustainable agriculture and global food security. *Frontiers in plant science*, *9*, 1314.
29. Lee, M. A., Davis, A. P., Chagunda, M. G. G., & Manning, P. (2017). Forage quality declines with rising temperatures, with implications for livestock production and methane emissions. *Biogeosciences, 14*(6), 1403–1417. https://doi.org/10.5194/bg-14-1403-2017.
30. Loladze, I. (2014). Hidden shift of the ionome of plants exposed to elevated CO_2 depletes minerals at the base of human nutrition. *eLife, 3*, e02245. https://doi.org/10.7554/eLife.02245
31. Maia, M. R. G., Fonseca, A. J. M., Oliveira, H. M., Mendonça, C., & Cabrita, A. R. J. (2022). The potential role of phytochemicals as bioactive compounds in ruminant nutrition to reduce methane emissions. *Animal Nutrition*, 8, 100–112.
32. MacLeod, M. J., Vellinga, T., Opio, C., Falcucci, A., Tempio, G., Henderson, B., ... & Gerber, P. J. (2018). Invited review: a position on the global livestock environmental assessment model (GLEAM). *Animal*, *12*(2), 383-397.
33. Müller, C., Franke, J. A., Jägermeyr, J., Ruane, A. C., Elliott, J., Moyer, E. J., … Zabel, F. (2021). Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environmental Research Letters, 16*(3), 034040. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd8fc
34. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology, 59*, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911 PubMed+2ResearchGate+2
35. Model, E. A. (2017). The global livestock environmental assessment model. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 22-6.

36. Myers, S. S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D., Bloom, A. J., ... & Usui, Y. (2014). Increasing CO2 threatens human nutrition. *Nature*, *510*(7503), 139-142.
37. Nam, K. T., Choi, N., Na, Y., & Choi, Y. (2024). Effect of the Temperature–Humidity Index on the Productivity of Dairy Cows and the Correlation between the Temperature–Humidity Index and Rumen Temperature Using a Rumen Sensor. *Animals*, *14*(19), 2848.
38. NASEM. (2021). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle* (8th rev. ed.). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25806
39. Niderkorn, V., Morvan-Bertrand, A., Le Morvan, A., Benot, M. L., Augusti, A., Decau, M. L., & Picon-Cochard, C. (2021). Effects of elevated CO 2 and extreme climatic events on forage quality and in vitro rumen fermentation in permanent grassland. *Biogeosciences Discussions*, *2021*, 1-25.
40. Palandri, C., Frank, E. G., Kimhi, A., Lavon, Y., Ezra, E., & Fishman, R. (2025). High-frequency data reveal limits of adaptation to heat in animal agriculture. *Science Advances*, *11*(27), eadw4780.
41. Palmonari, A., Fustini, M., Canestrari, G., Grilli, E., & Formigoni, A. (2014). Influence of maturity on alfalfa hay nutritional fractions and indigestible fiber content. *Journal of Dairy Science, 97*(12), 7729–7734. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8123 (PubMed PMID: 25262189) PubMed
42. Polsky, L., & von Keyserlingk, M. A. G. (2017). Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science, 100*(11), 8645–8657. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651
43. Rodriguez-Venegas, R., Meza-Herrera, C. A., Robles-Trillo, P. A., Angel-Garcia, O., Legarreta-Gonzalez, M. A., Sánchez-Vocanegra, H. F., & Rodriguez-Martinez, R. (2023). Effect of THI on milk production, percentage of milking cows, and time lying in holstein cows in Northern-Arid Mexico. *Animals*, *13*(10), 1715.
44. 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.

45. Oliveira, C. P., Voltolini, T. V., Garcia, A. R., & Silva, R. A. (2025). Heat stress in dairy cows: Impacts, identification, and mitigation strategies—A review. *Animals, 15*(2), 249. https://doi.org/10.3390/ani15020249 MDPI

46. Rodríguez-Venegas, R., Meza-Herrera, C. A., Robles-Trillo, P. A., Ángel-García, O., & Martínez-Rosas, R. (2023). Effect of THI on milk production, percentage of milking cows and time lying in Holstein cows in northern-arid Mexico. *Animals, 13*(10), 1715. https://doi.org/10.3390/ani13101715 MDPI+2PubMed+2

47. Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P., … Winter, J. M. (2013). The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology, 170*, 166–182. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011

48. Rhoads, M. L., Rhoads, R. P., VanBaale, M. J., Collier, R. J., Sanders, S. R., Weber, W. J., Crooker, B. A., & Baumgard, L. H. (2009). Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *Journal of Dairy Science,* 92(5), 1986–1997. https://doi.org/10.3168/jds.2008-1641

49. Sanz-Sáez, Á., Erice, G., Aguirreolea, J., Muñoz, F., Sánchez-Díaz, M., & Irigoyen, J. J. (2012). Alfalfa forage digestibility, quality and yield under future climate change scenarios vary with *Sinorhizobium meliloti* strain. *Journal of Plant Physiology, 169*(8), 782–788. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.01.010

50. Shephard, R., Rowe, J., & Dominik, P. (2024). A meta-analytical approach for estimating methane suppression across delivery systems. *Frontiers in Animal Science,* 11, 1451266. https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1451266

51. Spek, J. W., Dijkstra, J., van Duinkerken, G., & Bannink, A. (2013). A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle. *Journal of Agricultural Science, 151*(3), 407–423. https://doi.org/10.1017/S0021859612000561 Cambridge University Press & Assessment

52. Stefańska, B., Pruszyńska-Oszmałek, E., Fievez, V., Purwin, C., & Nowak, W. (2024). Impact of heat stress during close-up dry period on performance, fertility and immunometabolic blood indices of dairy cows: Prospective cohort study. *Scientific Reports, 14*, 21211. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72294-2 Nature+1
53. St-Pierre, N. R., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of Dairy Science, 86*(E. Suppl.), E52–E77. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5
54. Wattiaux, M. A., & Karg, K. L. (2004). Protein level for dairy cows: Effects on milk production and urea nitrogen. *Journal of Dairy Science,* 87, 3481–3491.
55. West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. Journal of Dairy Science, 86(6), 2131–2144. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X
56. van Paassen, M., Braconi, N., Kuling, L., Durlinger, B., & Gual, P. (2019). *Agri-footprint 5.0. Blonk* Consultants: Gouda, The Netherlands, 134.
57. Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional Ecology of the Ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press. (Ayrıca bkz. JSTOR kayıt sayfası). JSTOR
58. Zhang, J., Zheng, N., Shen, W., Zhao, S., & Wang, J. (2020). Synchrony degree of dietary energy and nitrogen release influences microbial community, fermentation, and protein synthesis in a rumen simulation system. *Microorganisms*, *8*(2), 231.
59. Zhang, C., Jiang, X., Wu, S., Zhang, J., Wang, Y., Li, Z., & Yao, J. (2024). Dietary fat and carbohydrate-balancing the lactation performance and methane emissions in the dairy cow industry: A meta-analysis. *Animal Nutrition*, *17*, 347-357.
60. Zhao, X., Zang, C., Zhao, S., Zheng, N., Zhang, Y., & Wang, J. (2025). Assessing milk urea nitrogen as an indicator of protein nutrition and nitrogen utilization efficiency: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, *108*(5), 4851-4862.