BÖLÜM 8

BİYOAKTİF BİLEŞİKLER ARACILIĞIYLA ALTERNATİF YEMLERİN RASYON KALİTESİ VE SİNDİRİLEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ

Gürkan SEZMİŞ [1]

1. GİRİŞ

Hayvansal protein talebinin dünya genelinde artması, hayvan besleme biliminin önemini her geçen gün artırmaktadır. Nüfus artışı ve gelir düzeyindeki yükselmeyle birlikte et, süt ve yumurta tüketimi artarken, bu ürünleri üreten hayvanların beslenmesi için gereken yem hammaddesi de aynı oranda talep artmaktadır. Sorunun başında, hayvan beslemede kullanılan hammaddelerin önemli bir bölümünün insan gıdasıyla ortak kaynaklardan gelmesidir. Tahıl ve soya başta olmak üzere birçok yem bileşeni, doğrudan insan tüketimine de uygun olduğundan, "yem–gıda rekabeti" olarak adlandırılan bir gerilim ortaya çıkar. Bu rekabet yalnızca ekonomik bir mesele değildir; arazi kullanımı, su tüketimi, ormansızlaşma ve sera gazların çevreye salımı gibi çevresel boyutlarıyla da sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezine yerleşmiştir (1).

Son yıllarda yaşanan jeopolitik ve makroekonomik dalgalanmalar, tablonun kırılganlığını daha da görünür kılmıştır. Bölgesel çatışmalar, tedarik zincirlerindeki kopmalar ve enflasyondaki dalgalanmalar, geleneksel yem hammaddelerinin fiyatını ve erişilebilirliğini istikrarsızlaştırmaktadır (1). Bu koşullar altında, insan gıdasıyla rekabet etmeyen; tercihen atık ya da yan ürün niteliğindeki kaynaklardan elde edilen alternatif yemler hem ekonomik hem de ekolojik açıdan giderek daha stratejik bir konuma yükselmiştir. Batı Afrika'da yürütülen kapsamlı bir sistematik derleme, alternatif yem kaynaklarını altı ana grupta toplamıştır: agro-endüstriyel yan ürünler, yem amaçlı ağaçlar, ürün artıkları, böcekler, yem baklagilleri ve deniz yosunları. Aynı çalışmada agro-endüstriyel yan ürünler, incelenen kaynakların yaklaşık yarısını oluşturarak en yaygın kategori olarak öne çıkmıştır (2).

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Zootekni Bölümü, gurkan.sezmis@yobu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8114-2729

DOI: 10.37609/akya.4339.c20391

Ne var ki alternatif yemler çoğu zaman iki uçlu bir nitelik taşır. Bir yandan protein, enerji veya selüloz kaynağı olarak rasyona katkı sunarken, diğer yandan bünyelerinde barındırdıkları ikincil bitki metabolitleri nedeniyle hem fırsat hem de risk barındırırlar. İşte bu noktada biyoaktif bileşikler devreye girer. Tanenler, saponinler, esansiyel yağlar, flavonoidler ve alkaloidler gibi bitki kaynaklı metabolitler, bitkinin kendisini otçullara ve mikroorganizmalara karşı koruyan savunma molekülleridir; ancak hayvan beslemede bilinçli biçimde kullanıldıklarında rumen fermantasyonunu ve besin madde metabolizmasını yönlendirebilen güçlü araçlara dönüşürler (3). Bu bileşikler; protozoal yoğunluğun azaltılması, metanogenez baskılanması, protein metabolizmasının iyileştirilmesi ve ruminant ürünlerinde konjuge linoleik asit içeriğinin artırılması gibi çok sayıda hedefte etki gösterebilmektedir (3).

Biyoaktif bileşiklerin yem katkısı olarak öne çıkmasının ardında somut bir gereklilik yatmaktadır. Antibiyotik direncine ilişkin kaygılar ve kimyasal katkı maddelerinin hayvansal ürünlerde bıraktığı kalıntılara yönelik toplumsal duyarlılık, doğal alternatiflere olan ilgiyi belirgin biçimde artırmıştır (4). Bitki kaynaklı bu metabolitler; antimikrobiyal, antioksidan ve fermantasyonu düzenleyici özellikleriyle, sentetik katkı maddelerinin yerini alabilecek doğal adaylar olarak konumlanmaktadır. Öte yandan literatürdeki tablo tek yönlü bir başarı öyküsü değildir. Aynı bileşiğin dozuna, kaynağına ve hayvan türüne bağlı olarak faydalı ya da antinutrisyonel etki gösterebilmesi, sonuçların tutarsız ve kimi zaman çelişkili olmasına yol açmaktadır (3). Örneğin tanenler uzun süre yalnızca antinutrisyonel bileşikler olarak görülmüş; yem tüketimi ve besin madde kullanımı üzerindeki olumsuz etkileriyle anılmıştır. Yalnızca son dönemde, uygun düzeyde kullanıldıklarında rumen fermantasyonunu olumlu yönde düzenleyebilen yararlı fitokimyasallar olarak yeniden değerlendirilmeye başlanmışlardır (5).

Bu bölümün amacı, alternatif yemler ile biyoaktif bileşikler arasındaki ilişkiyi kanıta dayalı bir çerçevede ele almaktır. İzleyen kısımlarda önce alternatif yemler ve içerdikleri başlıca biyoaktif bileşik grupları kavramsal olarak tanımlanacak; ardından bu bileşiklerin etki mekanizmaları, rasyon kalitesi ve sindirilebilirlik üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenecektir. Değerlendirme, ruminant, monogastrik ve kanatlı hayvanlar başta olmak üzere tür bazında farklılıkları da kapsayacak biçimde yürütülecek; bölüm, mevcut bilgi boşluklarına ve araştırma önceliklerine dair bir değerlendirmeyle sonlandırılacaktır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE: ALTERNATİF YEMLER VE BİYOAKTİF BİLEŞİKLER

2.1. Alternatif Yemlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Alternatif yem kaynakları, geleneksel yem hammaddelerine kıyasla daha az yaygın kullanılan, ancak belirli koşullar altında bunların yerini kısmen ya da tamamen alabilen

materyaller olarak tanımlanmaktadır. Bu kaynakların ortak niteliği, önemli bir bölümünün tarımsal veya endüstriyel süreçlerin yan ürünü olması ve insan gıdasıyla doğrudan rekabet etmemesidir. Literatürde en sık başvurulan sınıflandırma, materyalin biyolojik kökenini esas alır ve alternatif yemleri agro-endüstriyel yan ürünler, yem amaçlı ağaç ve çalı yaprakları, ürün artıkları, yem baklagilleri, böcek kaynaklı protein ve deniz kaynaklı biyokütle (deniz yosunları, mikroalgler) gibi gruplara ayırır (2).

Bu köken temelli sınıflandırma pratik bir başlangıç noktası sunmakla birlikte, bir materyalin besleme değerini tek başına belirlemekte yetersiz kalmaktadır. Aynı gruba dahil edilen materyaller arasında, hatta aynı materyalin farklı kaynaklarından elde edilen örnekler arasında dahi, kimyasal kompozisyon ve sindirilebilirlik bakımından belirgin farklılıklar bulunmaktadır (6). Bu değişkenlik, alternatif yemlerin değerlendirilmesinde kökenin yanı sıra materyalin rasyondaki işlevsel rolünün de dikkate alınmasını gerekli kılar. Bir yem hammaddesi, temelde enerji, protein veya selüloz kaynağı olarak besin madde ikamesi sağlayabileceği gibi, içerdiği ikincil metabolitler aracılığıyla rumen fermantasyonunu doğrudan yönlendiren fonksiyonel bir bileşen olarak da işlev görebilmektedir. İşte alternatif yemler ile biyoaktif bileşikler arasındaki bağlantı da bu ikinci işlevde kurulmaktadır.

2.2. Biyoaktif Bileşiklerin Kimyasal Sınıflandırması

Biyoaktif bileşikler, bitkinin fotosentez, solunum ve büyüme gibi temel yaşamsal süreçleriyle doğrudan ilişkili olmayan, ikincil metabolizma ürünü moleküllerdir. Bu bileşikler, kimyasal yapılarına göre başlıca üç sınıf altında incelenmektedir: flavonoidler, terpenoidler ve alkaloidler (7). Bu sınıfların bilinen fitokimyasallar içindeki oransal dağılımı belirgin biçimde asimetriktir; Tedeschi ve ark. (7), terpenoidlerin toplam bileşiklerin yaklaşık %55'ini, alkaloidlerin %36'sını, flavonoidlerin ise yalnızca %9'unu oluşturduğunu bildirmektedir.

Flavonoidler sınıfı içinde yer alan tanenler, hidrolize olabilen tanenler ve kondanse tanenler olmak üzere iki temel alt gruba ayrılır. Sayısal olarak sınırlı bir grubu temsil etmelerine rağmen tanenler, ruminant besleme araştırmalarında en yoğun incelenen bileşik grubunu oluşturmaktadır. Bunun başlıca nedeni, tanenlerin metan üretiminin azaltılması, ruminal protein degradasyonunun (yıkımının) yavaşlatılması ve gastrointestinal (mide-bağırsak kanalında) nematodların baskılanması gibi üretim performansıyla doğrudan ilişkilendirilebilen etkiler göstermesidir (7). Terpenoid sınıfı içinde ise saponinler ve esansiyel yağlar öne çıkmakta; her iki bileşik grubu da özellikle metan azaltımı ve rumen mikrobiyal popülasyonunun modülasyonu bağlamında araştırılmaktadır. Buna karşılık alkaloidler, sayıca ikinci büyük grup olmalarına rağmen yem katkısı olarak en az değerlendirilen sınıftır. Bu durum, hem alkaloidlerin kimyasal olarak sınıflandırılmasındaki güçlükten hem de bu bileşiklerin taşıdığı toksisite riskinden kaynaklanmaktadır; Tedeschi ve ark. (7), alkaloidleri bitkide diğer fitokimyasallarla birlikte bulunan, ancak

etkileri çoğunlukla izole edilemeyen "gölge bileşikler" (ghost compounds) olarak nitelendirmektedir.

Bu üç kimyasal sınıf, yalnızca oransal dağılımları bakımından değil, moleküler yapıları ve bitkideki dağılımları bakımından da birbirinden ayrılmaktadır. Ramdani ve ark. (8), ruminant beslemede en sık kullanılan üç bileşik grubunun yapısal özelliklerini şu biçimde özetlemektedir: tanenler, bitkilerin yaprak, kök, gövde ve kabuğu başta olmak üzere çeşitli dokularında bulunan, suda çözünebilen polifenolik bileşiklerdir ve hidrolize olabilen ile kondanse formlar olmak üzere iki yapısal grupta toplanır. Saponinler ise düşük molekül ağırlıklı, glikozidik yapıda bileşikler olup, bir veya daha fazla şeker zincirinin hidrofobik bir aglikona (sapogenin) bağlanmasıyla oluşur; aglikonun triterpenoid ya da steroid yapıda olmasına göre triterpenoid ve steroidal saponinler biçiminde ayrılır ve bunlardan triterpenoid formlar doğada daha yaygın dağılım gösterir. Esansiyel yağlar ise diğer iki gruptan farklı olarak tek bir kimyasal sınıfa değil, bitkinin çeşitli dokularından damıtma yoluyla elde edilen, başta terpenoidler ve fenolik bileşikler olmak üzere uçucu moleküllerin karmaşık karışımlarına karşılık gelir (8). Bu yapısal çeşitlilik, aynı bileşik sınıfı içinde dahi farklı kaynakların neden farklı biyolojik etkiler gösterebildiğini kısmen açıklamaktadır.

2.3. Hayvan Besleme ve Alternatif Yem Modellerinin Sinerjisi

Biyoaktif bileşiklerin ruminant beslemedeki konumu, tarihsel olarak iki karşıt değerlendirme arasında kalmıştır. Bu bileşikler uzun süre yalnızca yem tüketimini ve besin madde kullanımını olumsuz etkileyen antinutrisyonel faktörler olarak görülmüş; ancak son yıllarda uygun düzeylerde kullanıldıklarında rumen fermantasyonunu olumlu yönde düzenleyebildikleri anlaşılmıştır (7). Bu ikili niteliğin belirleyici değişkeni dozdur. Düşük ve orta düzeydeki konsantrasyonlarda seçici bir modülasyon sağlayan bileşikler, doz yükseldikçe geniş spektrumlu antimikrobiyal etkileri nedeniyle fermantasyonu ve sindirilebilirliği baskılayabilmektedir.

Alternatif yem kaynakları ile fonksiyonel biyoaktif bileşiklerin bir arada değerlendirilmesindeki asıl kazanım, tek tek etkilerin toplamının ötesine geçebilen sinerjik yanıtlarda ortaya çıkar. Farklı etki mekanizmalarına sahip bileşiklerin birlikte kullanılması, düşük dozlarda dahi belirgin bir modülasyon sağlayabilmekte ve böylece her bileşiğin tek başına yüksek dozda yol açacağı sindirilebilirlik kaybı riskini azaltmaktadır. Jayanegara ve ark. (9), tanence zengin *Swietenia mahogani* yaprağı ile saponince zengin *Sapindus rarak* meyvesi ekstraktlarını farklı oranlarda birleştirdikleri *in vitro* çalışmalarında, iki bileşik grubunun metan ve amonyak oluşumunu azaltmadaki etkilerinin çoğunlukla eklemeli, kimi durumlarda ise sinerjik olduğunu bildirmiştir. Bu etkinin ardında, tanenlerin protein kompleksleri oluşturması ile saponinlerin protozoa popülasyonunu baskılaması gibi birbirini tamamlayan iki farklı mekanizmanın eş zamanlı işlemesi yatmaktadır. Boğa ve

ark., (2021) Bu amaçla metal salınımının azaltılması amacıyla hayvan beslemede tanen kullanımı ile çevreye metan salınımının ve buradaki enerji kayıplarının azaltılması da sağlanabileceği belirtilmiştir (26).

Bu duruma paralel sinerjik yaklaşımın en dikkat çekici örneklerinden biri, farklı sınıflardan bileşiklerin üçlü kombinasyonlarıdır. Patra ve Yu (10), sarımsak yağı (esansiyel yağ), nitrat (alternatif elektron alıcısı) ve quillaja saponinini tekli, ikili ve üçlü kombinasyonlar halinde *in vitro* rumen kültürlerine ekleyerek test etmiş; üçlü kombinasyonun metan üretimini kısa vadede %65, uzun vadeli adaptasyon sonrasında ise %40 oranında baskıladığını göstermiştir. Bu bileşiklerin her biri farklı bir hedefe yöneldiğinden- saponin protozoayı, nitrat hidrojeni, sarımsak yağı ise metanojenleri doğrudan etkilediğinden- bir arada kullanıldıklarında hidrojen akışını çok yönlü biçimde yönlendirebilmektedir. Bu bulgu, tamamlayıcı etki mekanizmalarına sahip bileşiklerin birleştirilmesinin, tek bir bileşiğin dozunu artırmaya kıyasla daha güvenli ve etkili bir strateji olabileceğine işaret etmektedir.

Ancak bileşik kombinasyonlarının her zaman olumlu sonuç vermediği, sinerjinin yanı sıra antagonizmanın da mümkün olduğu unutulmamalıdır. Akanmu ve ark. (11), altı farklı tıbbi bitki ekstraktını ikili kombinasyonlar halinde düşük kaliteli *Eragrostis curvula* otu üzerinde test ettikleri çalışmalarında, bazı kombinasyonların (örneğin *Aloe vera* + *Carica papaya*) organik madde sindirilebilirliğini bileşenlerin tek tek etkisinden daha fazla düşürdüğünü, yani antagonistik davrandığını bildirmiştir. Araştırmacılar bu olumsuz etkileşimi, saponinlerin yağ asitlerinin emülsifiye edici etkisini bozması ya da tananlerin protein ve enzimlerle kompleks oluşturarak mikrobiyal aktiviteyi engellemesi gibi çakışan fitokimyasal etkilere bağlamıştır. Dolayısıyla yem modelleri ile biyoaktif bileşiklerin birlikte tasarlanmasında, bileşiklerin yalnızca eklemeli ya da sinerjik davranacağı varsayımından kaçınılmalı; kombinasyonların kimyasal uyumluluğu ayrı ayrı doğrulanmalıdır.

Yukarıda ifade edildiği gibi doz-yanıt bağımlılığı, biyoaktif bileşik içeren alternatif yemlerin değerlendirilmesini daha kompleks bir hale getirmektedir. Bir materyalin rasyona katılma düzeyi; bileşiğin kimyasal sınıfı, konsantrasyonu, rasyonun bileşimi ve hedef hayvan türünün fizyolojik yanıtı ile birlikte belirlenmek durumundadır. Bu çok değişkenli yapı, bölümün ilerleyen kısımlarında detaylıca ele alınacaktır.

3. BAŞLICA BİYOAKTİF BİLEŞİKLER GRUPLARI VE ETKİ MEKANİZMALARI

Biyoaktif bileşiklerin rasyon kalitesi ve sindirilebilirlik üzerindeki etkileri, büyük ölçüde bu bileşiklerin rumen mikrobiyal ekosistemiyle kurdukları etkileşime dayanır. Bu bölümde başlıca bileşik grupları- tananler, saponinler, esansiyel yağlar, flavonoidler ve alkaloidler- etki mekanizmaları temelinde ayrı ayrı ele alınmaktadır.

3.1. Tanenler

Tanenler, proteinlerle geri dönüşümlü kompleksler oluşturabilme kapasiteleri nedeniyle rumen metabolizmasını çok yönlü biçimde etkileyen polifenolik bileşiklerdir. Kondanse tanenlerin metan üretimini azaltıcı etkisi başlıca üç mekanizmayla açıklanmaktadır: fermente olabilen makromoleküller ve mikrobiyal enzimlerle kompleks oluşturarak substrat erişilebilirliğini düşürmek, mikroorganizmalarla doğrudan etkileşime girmek ve rumende parçalanarak hidrojen tüketen bir yutak (hydrogen sink) işlevi görmek (7). Bu mekanizmaların göreli katkısı tanenin kimyasal yapısına bağlı olarak değişmekte; yapısal olarak dirençli tanenlerin fermantasyonu değiştirmede ve metanı azaltmada daha etkili olduğu bildirilmektedir (7). Boğa ve ark. (2021) Ruminant hayvanlarda metan gazının doğaya salınımı yemle alınan brüt enerjinin % 2-12 aralığında kaybına sebep olabildiğini belirtmiştir. Metan salınımı cevreye verdiği zararın yanında enerji kaybı ile de verim kayıplarına neden olmaktadır (26).

Tanenlerin belki de en değerli özelliği, protein metabolizması üzerindeki yönlendirici etkisidir. Rumende proteinlerle bağlanan tanenler, proteinin mikrobiyal degradasyondan korunmasını sağlayarak amonyak kaybını azaltır; abomasumun asidik ortamında ise bu kompleksler çözülerek proteinin ince bağırsakta emilime yönlendirilmesine (bypass protein etkisi) olanak tanır (5). Patra ve Saxena (5), bu etkinin yönü ve şiddetinin tanenin tipine, polimerizasyon derecesine, konsantrasyonuna ve rasyonun bileşimine bağlı olarak belirgin biçimde değiştiğini; dolayısıyla tutarlı bir yarar elde edebilmek için yapı-aktivite ilişkisinin kurulması gerektiğini vurgulamaktadır. Nitekim aynı derlemede, tanenlerin sindirilebilirlik ve yem tüketimi üzerindeki olumsuz etkileriyle uzun süre yalnızca antinutrisyonel bileşikler olarak görüldüğü, ancak orta düzeylerde kullanıldıklarında rumen fermantasyonunu olumlu yönde düzenleyebildikleri belirtilmektedir (5).

3.2. Saponinler

Saponinler, esas etkilerini rumen protozoaları üzerinden gösteren yüzey aktif glikozitlerdir. Etki mekanizmalarının temelinde, protozoa hücre membranındaki sterollerle kompleks oluşturarak membran bütünlüğünü bozmaları ve hücre lizisine yol açmaları yatar (4). Protozoa popülasyonunun baskılanması, dolaylı bir sonuç doğurur: rumende üretilen metanın önemli bir bölümü, protozoalarla simbiyotik ilişki içindeki metanojenler tarafından oluşturulduğundan, protozoa yoğunluğunun azalması metanojen aktivitesini de düşürür (4). Patra ve Saxena (4), bu etkinin saponin kaynağına, dozuna ve kimyasal yapısına göre değiştiğini; kimi durumlarda protozoa popülasyonunun zamanla adaptasyon gösterebildiğini bildirmektedir.

Saponinlerin bir diğer önemli özelliği, azot kullanım etkinliği üzerindeki olumlu etkileridir. Protozoaların bakteriyel proteini tüketmesini sınırlayarak mikrobiyal proteinin rumenden çıkışını artırabilir, böylece azotun daha verimli kullanılmasına katkıda buluna-

bilirler (4). Ancak bu etkilerin de doza bağımlı olduğu, yüksek konsantrasyonlarda saponinlerin fermantasyonu genel olarak baskılayabildiği unutulmamalıdır.

3.3. Esansiyel Yağlar

Esansiyel yağlar, lipofilik yapıları sayesinde mikrobiyal hücre membranlarına nüfuz ederek seçili mikrobiyal grupları etkileyen uçucu bileşik karışımlarıdır. Calsamiglia ve ark. (12), bu bileşiklerin rumen fermantasyonunu iyonoforlara benzer biçimde modüle edebildiğini; başta Gram-pozitif bakteriler olmak üzere belirli mikrobiyal popülasyonları hedef alarak protein ve nişasta degradasyonunu yavaşlatabildiğini, amonyak üretimini azaltabildiğini ve metanojenezi baskılayabildiğini bildirmektedir. Etki mekanizmasının temelinde, esansiyel yağların hücre membranının geçirgenliğini bozarak iyon sızıntısına ve nihayetinde hücre içi enerji kaybına yol açması yer alır.

Bununla birlikte esansiyel yağların etkinliği doza ve rasyon tipine göre büyük değişkenlik gösterir. Calsamiglia ve ark. (12), düşük dozlarda seçici ve faydalı bir modülasyon sağlanabildiğini, ancak optimal dozun *in vivo* koşullarda etkin bileşen cinsinden belirlenmesi, mikrobiyal adaptasyon olasılığının göz önünde bulundurulması ve ürünlerdeki (süt veya et) olası kalıntıların incelenmesi gerektiğini özellikle vurgulamaktadır. Bu durum, esansiyel yağların dikkatli bir doz ayarlaması olmaksızın uygulanmasının, geniş spektrumlu antimikrobiyal etkileri nedeniyle toplam fermantasyonu baskılama riski taşıdığını göstermektedir (12).

Kılıç ve Boğa (2021) çalışmalarında, rasyon yağı, konsantrelerin aksine rumen pH'sını düşürmeden ruminal metanojenezi baskılamakta olduğunu belirtmiştir. Uçucu yağların etki şekli esansiyel yağlara göre farklılık göstermekte ve tüm uçucu yağlar güçlü antimikrobiyal özelliğe sahip olan terpenoidler, fenolik ve fenoller gibi kimyasal bileşenler içerdiğini belirtmişlerdir. Metanojenez, uçucu yağın uygulanmasıyla, özellikle mikrobiyal popülasyonları azaltarak CH_4 salınımını azalttığını belirtmişlerdir (27).

3.4. Flavonoidler

Flavonoidler, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleriyle rumen fermantasyonunu etkileyen polifenolik bileşiklerdir; ancak rumen mikroorganizmaları üzerindeki etki mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Oskoueian ve ark. (13), yedi farklı saf flavonoidi (flavon, mirisetin, naringin, kateşin, rutin, kersetin ve kaempferol) *in vitro* koşullarda test ettikleri çalışmalarında, bu bileşiklerin metan üretimini anlamlı biçimde baskıladığını göstermiştir. Ne var ki etki, flavonoidin türüne göre belirgin biçimde farklılaşmıştır: flavon, mirisetin ve kaempferol gaz üretimini ve toplam uçucu yağ asidi konsantrasyonunu düşürürken kuru madde degradabilitesini de gerilemiştir; buna karşın naringin ve kersetin, protozoa ve metanojen popülasyonunu baskılamalarına rağmen rumen mikrobiyal fermantasyonunu olumsuz etkilememiştir (13).

Bu bulgu, flavonoidlerin metan azaltım potansiyelinin sindirilebilirlikten ödün verilip verilmediğine bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koyar. Oskoueian ve ark. (13), naringin ve kersetinin, %4,5 düzeyinde kullanıldığında sindirilebilirliği bozmadan metan üretimini azaltabilen umut verici bileşikler olduğu sonucuna varmıştır. Flavonoidlerin bir başka önemli mekanizması, rumen pH dengesi üzerindeki düzenleyici etkileridir. Özellikle yüksek konsantre içeren rasyonlarla beslenen hayvanlarda, hızlı fermente olan karbonhidratların laktat birikimine ve pH düşüşüne yol açması, subklinik ya da akut asidoz riskini artırır. Balcells ve ark. (22), yüksek konsantre rasyonlarla beslenen düvelerde flavonoid ekstraktı kullanımının, laktat üreten *Streptococcus bovis* popülasyonunu baskılarken laktat kullanan *Megasphaera elsdenii* gibi bakterilerin sayısını artırdığını; bunun sonucunda indüklenmiş asidoz koşullarında rumen pH'ının kontrol grubuna kıyasla anlamlı biçimde yükseldiğini (6,29'a karşı 5,98) bildirmiştir. Bu bulgu, flavonoidlerin yalnızca metan azaltımı ya da antioksidan etkiyle sınırlı kalmayıp, rumen mikrobiyal dengesini laktat metabolizması üzerinden düzenleyerek asidoz riskini azaltma potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

3.5. Alkaloidler

Alkaloidler, bitkiler tarafından savunma amacıyla üretilen azot içerikli bileşiklerdir ve ruminant beslemede en az anlaşılan biyoaktif grubu oluşturmaktadır. Tedeschi ve ark. (7), alkaloidlerle yürütülen çalışmaların büyük çoğunluğunun bu bileşiklerin yem katkısı olarak potansiyelinden çok, hayvanlar üzerindeki toksikolojik etkilerine odaklandığını belirtmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda alkaloid içeren yem bitkileri, merkezi sinir sistemi hasarı, karaciğer toksisitesi ve hatta ölüme varan akut ve kronik etkiler nedeniyle toksik kabul edilmektedir (7).

Bununla birlikte alkaloidlerin antioksidan, antidiyabetik ve anti-inflamatuar gibi çeşitli faydalı biyolojik aktiviteler gösterdiği de bilinmektedir; ancak bu özelliklerden ruminant üretiminde nasıl yararlanılabileceği yeterince araştırılmamıştır (7). Tedeschi ve ark. (7), polifenol ve terpenoidlerin faydalı etkileri için incelenen birçok bitki ekstraktının aynı zamanda alkaloid içerdiğini ve bu alkaloidlerin gözlenen biyolojik aktiviteye katkıda bulunabildiğini; dolayısıyla alkaloidlerin çoğu zaman bilinen diğer fitokimyasalların yanında etkisi ayrıştırılamayan "gölge bileşikler" olarak kaldığını vurgulamaktadır. Bu belirsizlik, alkaloidlerin rasyon kalitesi ve özellikle sindirilebilirlik üzerindeki etkilerine dair sistematik verinin son derece sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Diğer biyoaktif bileşik gruplarının aksine, alkaloidlerin sindirilebilirlik parametreleri üzerindeki net katkısı ya da olumsuz etkisi henüz güvenilir biçimde ortaya konabilmiş değildir. Bu nedenle bu bölümde alkaloidler, yem katkısı olarak işlevsel bir grup olmaktan çok, mevcut bilgi boşluğunun altını çizen bir kategori olarak ele alınmaktadır.

4. RASYON KALİTESİ ÜZERİNE ETKİLER

Biyoaktif bileşiklerin ruminant beslemedeki değeri, yalnızca rumen fermantasyonunu düzenlemekle sınırlı değildir; bu bileşikler aynı zamanda rasyonun besleyici niteliğini, elde edilen hayvansal ürünlerin kalitesini ve raf ömrünü de etkileyebilmektedir. Bu bölümde söz konusu etkiler; besin madde profiline katkı, protein kullanım etkinliği, lipit metabolizması ve ürün kalitesi ile antioksidan/oksidatif stabilite başlıkları altında ele alınmaktadır.

4.1. Besin Madde Profili ve Yem Değerlendirme Etkinliği

Biyoaktif bileşik taşıyan alternatif yemlerin rasyona katılması, çoğu zaman iki yönlü bir katkı sağlar: bir yandan protein, enerji veya lif kaynağı olarak besin madde ikamesi işlevi görürken, diğer yandan içerdikleri ikincil metabolitler aracılığıyla rumen ekosistemini modüle eder. Priyashantha ve ark. (14), otlar, baklagiller ve agro-endüstriyel yan ürünlerden elde edilen fitokimyasalların ruminant üretim sistemlerinde rumen modülatörü, antimetanojenik ajan, büyüme destekleyici ve biyokoruyucu gibi çok yönlü işlevler üstlenebildiğini; böylece yem değerlendirme etkinliğini, besin madde kullanımını ve azot tutulumunu iyileştirebildiğini bildirmektedir. Bu çok işlevlilik, biyoaktif bileşiklerin rasyon kalitesine katkısının yalnızca kimyasal kompozisyonla değil, fonksiyonel etkilerle de ölçülmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2. Protein Kullanım Etkinliği

Rasyon kalitesinin en kritik bileşenlerinden biri, rasyon proteininin ne ölçüde verimli kullanıldığıdır. Ruminantlar, tükettikleri proteinin önemli bir bölümünü rumende amonyak olarak kaybettiklerinden, proteini bu kayıptan koruyan mekanizmalar rasyon kalitesi açısından doğrudan değer taşır. Tanenler bu noktada belirleyici bir rol oynar. Bu doğrultuda rumende proteinlerle kompleks oluşturarak degradasyonu yavaşlatır, ardından abomasumun asidik ortamında bu kompleksin çözülmesiyle proteinin ince bağırsakta emilime yönlendirilmesini sağlar (5). Bu bypass protein etkisi, idrarla azot atımını azaltırken bağırsakta emilen amino asit miktarını artırma potansiyeli taşır. Benzer biçimde saponinler de protozoaların bakteriyel proteini tüketmesini sınırlayarak mikrobiyal proteinin rumenden çıkışını artırabilir ve azot kullanım etkinliğine katkıda bulunabilir (4). Ancak her iki bileşiğin de bu olumlu etkileri doza bağımlıdır; yüksek konsantrasyonlarda sindirilebilirliğin genel olarak gerilemesi riski göz ardı edilmemelidir.

4.3. Lipit Metabolizması ve Ürün Yağ Asidi Profili

Biyoaktif bileşiklerin belki de en dikkat çekici katkısı, süt ve etin yağ asidi profili üzerindeki yönlendirici etkileridir. Rumende gerçekleşen biyohidrojenasyon süreci, rasyonla alınan çoklu doymamış yağ asitlerini doymuş forma dönüştürür; tanenler bu süreci seçici

biçimde etkileyerek insan sağlığı açısından değerli ara ürünlerin birikmesini sağlayabilir. Priyashantha ve ark. (14), tanenlerin, vaksenik asidin stearik aside dönüşümünden sorumlu belirli bakteri gruplarını inhibe ederek biyohidrojenasyonun son basamağını yavaşlattığını; bunun sonucunda konjuge linoleik asit ve *trans*-11 18:1 gibi faydalı ara ürünlerin süt ve ette birikebildiğini bildirmektedir. Aynı çalışmaya göre hidrolize olabilen tanenler, kondanse tanenlere kıyasla daha çok modülatör bir etki göstererek bu faydalı ara ürünlerin kontrollü birikimine olanak tanır; iki tanen tipi arasındaki bu fark, kimyasal yapılarındaki ve mikrobiyal substratlarla bağlanma eğilimlerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (14).

Bu etkinin pratik sonuçları, konu üzerine yürütülen meta-analizlerde de görünür hale gelmektedir. Torres ve ark. (15), küçükbaş ruminant rasyonlarında tanen kullanımının et yağ asidi profili üzerindeki etkisini derledikleri meta-analizlerinde, tanenlerin konjuge linoleik asit ve n-3 çoklu doymamış yağ asitlerinin ette birikimini artırma eğiliminde olduğunu; bu değişikliklerin ise tüketici sağlığı açısından kardiyovasküler faydalarla ilişkilendirildiğini bildirmiştir. Ancak aynı analizde bu etkilerin tutarsız olabildiği, tanenin kimyasal tipine, kaynağına ve katılım düzeyine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği de vurgulanmaktadır.

Saponinlerin ürün kalitesi üzerindeki katkısı, tanenlere kıyasla daha sınırlı ve kaynağa özgü bir tablo çizmektedir. Yanza ve ark. (17), 66 *in vivo* çalışmayı derledikleri meta-analizlerinde, test edilen saponin kaynakları arasında yalnızca çay saponininin (*Camellia sinensis*) süt yağı içeriğini anlamlı biçimde düşürebildiğini; buna karşın *Quillaja saponaria*, *Yucca schidigera* gibi diğer yaygın kaynakların süt bileşimi üzerinde tutarlı bir etki göstermediğini bildirmiştir. Araştırmacılar bu bulguyu, çay saponininin fibrolitik bakterileri seçici biçimde desteklemesine bağlamakta; ancak bu etkinin laktasyon performansına, özellikle süt üretimine olumlu yansımadığını da vurgulamaktadır. Bu tablo, saponinlerin ürün kalitesi üzerindeki etkisinin tanenlerdeki kadar tutarlı ve öngörülebilir olmadığını; kaynak bazında değerlendirilmesi gereken, daha mütevazı bir katkı sunduğunu göstermektedir.

4.4. Antioksidan Kapasite ve Oksidatif Stabilite

Biyoaktif bileşiklerin ürün kalitesine bir başka katkısı, antioksidan özellikleri üzerinden gerçekleşir. Polifenolik yapıdaki tanenler ve flavonoidler, reaktif oksijen türlerini süpürme ve lipit oksidasyonunu geciktirme kapasitesine sahiptir. Priyashantha ve ark. (14), fitogenik yemlerin süt ve eti konjuge linoleik asit, omega-3 yağ asitleri ve antioksidan bileşiklerce zenginleştirerek hem besin değerini hem de oksidatif stabiliteyi artırabildiğini bildirmektedir. Bu antioksidan katkı, özellikle çoklu doymamış yağ asitlerince zenginleştirilmiş ürünlerde önem kazanır; çünkü bu yağ asitleri oksidasyona daha yatkın olduğundan, doğal antioksidanların varlığı ürünün raf ömrünü ve duyusal kalitesini korumaya yardımcı olur.

Torres ve ark. (15) da tanenlerin antioksidan özellikleri sayesinde ette lipit oksidasyonunu önleyebildiğini ve renk stabilitesini iyileştirebildiğini; ancak bu etkinin katılım düzeyine bağlı olarak değiştiğini, bazı durumlarda ise anlamlı bir fark yaratmadığını bildirmektedir. Bu değişkenlik, antioksidan katkının da diğer biyoaktif etkiler gibi doz ve kaynak temelli olarak değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Esansiyel yağlar da antioksidan özellikleri sayesinde ürün kalitesine katkı sağlayan bir diğer önemli bileşik grubudur. Dorantes-Iturbide ve ark. (23), küçükbaş ruminantlarda rasyon esansiyel yağı takviyesinin etkilerini derledikleri meta-analizde, bu bileşiklerin yalnızca büyüme performansını ve süt üretimini değil, aynı zamanda etin oksidatif stabilitesini ve serum antioksidan enzim aktivitesini de anlamlı biçimde iyileştirdiğini bildirmiştir. Aynı çalışmada esansiyel yağ takviyesinin enterik metan emisyonunu azalttığı da gösterilmiş; böylece bu bileşiklerin ürün kalitesi ile çevresel sürdürülebilirlik açısından çift yönlü bir katkı sunabileceği ortaya konmuştur. Bununla birlikte araştırmacılar, esansiyel yağların güçlü aromatik yapıları nedeniyle yüksek dozlarda yem tüketimini sınırlayabildiğini vurgulamakta; dolayısıyla ürün kalitesine yönelik faydanın, tıpkı tanen ve saponinlerde olduğu gibi, dikkatli bir doz ayarlamasıyla elde edilebileceğini belirtmektedir.

5. SİNDİRİLEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLER

Biyoaktif bileşiklerin sindirilebilirlik üzerindeki etkisi, bölümün en kritik ve aynı zamanda en çelişkili konusudur. Bu bileşiklerin rasyon kalitesine sağladığı katkılar (metan azaltımı, azot koruması, ürün zenginleştirmesi) çoğu zaman sindirilebilirlikten ödün verme riskiyle bir arada gelir. Bu bölümde söz konusu ilişki; doz-yanıt bağımlılığı, protein ve selüloz sindirilebilirliği ile antinutrisyonel ikilik başlıkları altında ele alınmaktadır.

5.1. Doz-Yanıt Bağımlılığı ve Antinutrisyonel Eşik

Biyoaktif bileşiklerin sindirilebilirlik üzerindeki etkisini belirleyen en temel değişken dozdur. Literatürdeki geniş uzlaşı, bu bileşiklerin düşük ile orta düzeydeki katılım oranlarında nötr ya da yararlı etki gösterdiği, ancak belirli bir eşiğin üzerinde sindirilebilirliği net biçimde baskıladığı yönündedir. Tanenler özelinde bu eşik nispeten iyi tanımlanmıştır: genellikle rasyon kuru maddesinin %3'ünün altındaki düzeyler yem tüketimi, rumen fermantasyonu ve azot kullanımı üzerinde nötr ya da olumlu etkilerle ilişkilendirilirken, %5'in üzerindeki oranlar sindirilebilirliği bozmakta, yem tüketimini düşürmekte ve azot etkinliğini azaltmaktadır (7). Bu doza bağımlı yanıt, tanenlerin "faydalı katkı" ile "antinutrisyonel faktör" arasındaki konumunun sabit değil, tümüyle uygulama düzeyine bağlı olduğunu göstermektedir.

Bu sınır etkisi meta-analitik verilerle de desteklenmektedir. Al Rharad ve ark. (16), 97 çalışmayı kapsayan meta-analizlerinde, küçükbaş ruminant rasyonlarında tanen kullanı-

mının kuru madde ve besin madde tüketimini artırabildiğini, azot metabolizmasını olumlu yönde düzenlediğini; ancak besin madde sindirilebilirliğini ve amonyak-azot düzeyini olumsuz etkileyebildiğini bildirmiştir. Aynı çalışmada tanenlere verilen yanıtın hayvanın yaşına, türüne, tanenin tipi ve düzeyine, besleme süresine ve temel rasyonun bileşimine göre değiştiği vurgulanmakta; bu da tek bir "optimal doz" önermenin güçlüğünü ortaya koymaktadır.

Saponinler için de benzer bir doz-güvenlik ilişkisi geçerlidir. Yanza ve ark. (17), 26 makale ve 66 *in vivo* çalışmayı derledikleri meta-analizlerinde, 40 g/kg kuru maddeye kadar saponin katkısının yem tüketimi üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını; artan saponin düzeyinin süt üretimini doğrusal biçimde azaltıp rumen fermantasyon profilini değiştirmesine karşın sindirilebilirlik oranlarını anlamlı biçimde etkilemediğini bildirmiştir. Bu bulgu, saponinlerin sindirilebilirlik açısından tanenlere kıyasla nispeten daha geniş bir güvenlik aralığına sahip olabileceğine işaret etmektedir; ancak aynı çalışma, etkinin saponin kaynağına ve hayvan türüne göre değiştiğini de kaydetmektedir.

5.2. Protein Sindirilebilirliği ve Azot Metabolizması

Biyoaktif bileşiklerin sindirilebilirlik üzerindeki en iyi tanımlanmış etkisi, protein metabolizması üzerinden gerçekleşir. Tanenlerin proteinle kompleks oluşturarak ruminal degradasyonu yavaşlatması, bir yandan mikrobiyal amonyak üretimini azaltıp azotun idrar yerine dışkıya kaymasına yol açar; bu da çevresel açıdan avantajlı, ancak proteinin görünür sindirilebilirliğini düşüren bir sonuçtur. Al Rharad ve ark. (16), tanen katkısının dışkı azotunu artırırken idrar azotunu azalttığını, yani azotun atılım yolunu değiştirdiğini göstermiştir. Bu değişim, bypass protein etkisiyle birleştiğinde bağırsakta emilen amino asit miktarını artırma potansiyeli taşısa da etkinin net yönü tanenin düzeyine ve rasyonun protein içeriğine bağlıdır.

Saponinler ise protein metabolizmasını farklı bir mekanizmayla etkiler. Protozoa popülasyonunu baskılayarak bakteriyel proteinin protozoalar tarafından tüketilmesini sınırlar ve mikrobiyal proteinin rumenden çıkışını artırabilir (17). Bu etki, azot kullanım etkinliği açısından olumlu olmakla birlikte, sindirilebilirlik parametrelerine yansıması yine kaynağa ve doza bağlıdır.

5.3. Selüloz Sindirilebilirliği ve Doz Aşımının Riskleri

Biyoaktif bileşiklerin sindirilebilirlik üzerindeki en hassas etki alanı selüloz fraksiyonudur. Tanenler yüksek düzeylerde kullanıldığında selülolitik bakterileri ve selüloz parçalayıcı enzimleri inhibe ederek nötrde çözünmeyen lifin (NDF) sindirilebilirliğini düşürebilir. Ancak bu etkinin de eşiğe bağlı olduğu, düşük-orta düzeylerde selüloz sindirilebilirliğinin çoğu zaman korunduğu bildirilmektedir. Örneğin kondanse tanen ekstraktının rasyon

kuru maddesinin %4,5'i düzeyinde kullanıldığı bir besi sığırı çalışmasında NDF ve asitte çözünmeyen lifin (ADF) sindirilebilirliğinin etkilenmediği, buna karşın tanenin daha yüksek düzeylerde ya da saponin gibi diğer fitokimyasallarla birlikte bulunduğu durumlarda selüloz sindirilebilirliğinin gerilediği gözlenmiştir (7).

Bu tablo, sindirilebilirlik açısından kritik ilkeyi bir kez daha ortaya koymakta; biyoaktif bileşiklerin selüloz üzerindeki olumsuz etkisi, kaçınılmaz bir sonuç değil, doz aşımına bağlı bir risktir. Uygun düzeyde kullanıldıklarında selüloz sindirilebilirliği büyük ölçüde korunabilirken, eşik aşıldığında hem selüloz hem de toplam organik madde sindirilebilirliği baskılanmaktadır. Dolayısıyla sindirilebilirliği koruyarak fonksiyonel fayda sağlamanın anahtarı, her bileşik ve kaynak için antinutrisyonel eşiğin altında kalan bir doz penceresinin belirlenmesidir.

6. TÜR BAZINDA GENEL DEĞERLENDİRME

Biyoaktif bileşiklerin sindirim fizyolojisi üzerindeki etkisi, hayvan türünün sindirim sistemi anatomisine ve mikrobiyal fermantasyonun gerçekleştiği bölgeye göre belirgin biçimde farklılaşır. Çok mideli (ruminant) ve tek mideli (monogastrik) türlerde fermantasyonun konumu, kapsamı ve zamanlaması değiştiğinden, aynı bileşik farklı türlerde farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu bölümde biyoaktif bileşiklerin etkileri; ruminant, kanatlı ve tek mideli otçullar (at, eşek, tavşan) özelinde ele alınacaktır.

6.1. Ruminantlar

Ruminantlar, ön midelerindeki yoğun mikrobiyal ekosistem sayesinde biyoaktif bileşiklerin etkilerinin en kapsamlı biçimde incelendiği hayvan grubudur. Bu türlerde bileşiklerin başlıca hedefi rumen fermantasyonu olup, tanenler proteini ruminal indirgemeden koruyarak bypass protein akışını artırır. Saponinler ise protozoa popülasyonunu baskılayarak azot kullanımını iyileştirir, esansiyel yağlar ve diğer fitokimyasallar ise mikrobiyal popülasyonu seçici biçimde modüle eder. Bu mekanizmalar, önceki bölümlerde ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Ruminantlara özgü olan husus, etkinin büyük ölçüde rumende, yani besinlerin ince bağırsağa ulaşmasından önce ortaya çıkmasıdır; bu da biyoaktif bileşiklerin hem fermantasyon ürünlerini (uçucu yağ asitleri, metan) hem de bağırsağa geçen besin madde profilini doğrudan etkileyebilmesi anlamına gelir.

Ruminantlarda dikkat edilmesi gereken temel nokta, tür içi çeşitliliktir. Al Rharad ve ark. (16) meta-analizinde de gösterildiği üzere, küçükbaş ruminantların (koyun, keçi) tanenlere verdiği yanıt, hayvanın yaşına ve fizyolojik durumuna göre değişmekte; genç hayvanlarda yüksek tanen düzeyleri büyüme performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Büyükbaş ve küçükbaş ruminantlar arasında da tolerans farkları bulunmaktadır; Yanza ve ark. (17), büyük ruminantların saponinlerin neden olduğu acılığı ve fermantasyon de-

ğişikliklerini küçük ruminantlara kıyasla daha iyi tolere edebildiğini bildirmiştir. Bu bulgular, ruminantlarda "tek tip" bir biyoaktif bileşik stratejisinin uygun olmadığını, tür ve fizyolojik duruma göre uyarlama gerektiğini göstermektedir.

6.2. Kanatlılar

Kanatlılarda biyoaktif bileşiklerin kullanımı, ruminantlardan temelde farklı bir gerekçeye dayanır. Tek mideli sindirim sistemine sahip kanatlılarda mikrobiyal fermantasyon sınırlı ve ağırlıklı olarak sindirim kanalının son bölümlerinde gerçekleştiğinden, fitojenik yem katkılarının (PFA) başlıca hedefi rumen modülasyonu değil, bağırsak sağlığı ve besin madde emiliminin iyileştirilmesidir. Abdelli ve ark. (18), esansiyel yağlar, tanenler, saponinler ve flavonoidler gibi bitki kaynaklı bileşiklerin kanatlılarda sindirim salgılarının üretimini artırarak, patojen yükünü azaltarak ve antioksidan etki göstererek yem etkinliğini iyileştirebildiğini bildirmektedir. Bu bileşikler, antibiyotik büyütme faktörlerinin yasaklanmasının ardından kanatlı üretiminde doğal alternatifler olarak özellikle önem kazanmıştır.

Bu doğrultuda kanatlılarda biyoaktif bileşiklerin etki mekanizması temelde bağırsak morfolojisi ve enzim aktivitesi üzerinden işler. Uygun düzeyde kullanıldıklarında villus yüksekliğini artırıp kript derinliğini azaltarak emilim yüzeyini genişletebilir, sindirim enzimlerinin salgısını uyararak besin madde sindirilebilirliğini iyileştirebilirler (18). Örneğin karvakrol, timol ve limonen içeren mikroenkapsüle esansiyel yağların düşük düzeylerde (100 mg/kg) broyler rasyonlarına eklenmesinin, performansı ve besin maddelerinin görünür sindirilebilirliğini artırdığı bildirilmiştir (18). Bununla birlikte Abdelli ve ark. (18), literatürdeki sonuçların çelişkili olabildiğini; etkinliğin fitojenik preparatın bileşimine, katılım düzeyine, kuş genotipine ve temel rasyonun yapısına bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Bu da kanatlılarda, tıpkı ruminantlarda olduğu gibi, doz ve formülasyonun sonucu belirleyen kritik değişkenler olduğunu göstermektedir.

Mevcut içeriğe bağlı bu değişkenlik, farklı fitokimyasal gruplarının broyler performansı üzerindeki zıt etkilerinde de somut biçimde görülmektedir. Esansiyel yağlar en olumlu profili çizen grup olarak öne çıkar; Irawan ve ark. (24), broylerlerde esansiyel yağların büyümeyi teşvik edici katkı olarak kullanımını değerlendirdikleri meta-analizde, bu bileşiklerin canlı ağırlık artışını ve yem değerlendirme etkinliğini iyileştirdiğini, besin madde sindirilebilirliğini artırdığını ve sekal mikrobiyal dengeyi olumlu yönde düzenlediğini bildirmiştir. Tanenler ise kanatlıda çoğunlukla bunun tersi bir tablo ortaya koyar. Hidayat ve ark. (25), 22 çalışmayı kapsayan meta-analizlerinde, yüksek düzeydeki rasyon tanenlerinin broylerlerde günlük canlı ağırlık artışını ve yem tüketimini doğrusal biçimde düşürdüğünü, izolösin, lösin ve metiyonin gibi amino asitlerin ileal sindirilebilirliğini gerilettiğini ve lenfoid organ ağırlıklarını azalttığını göstermiş; bu nedenle tanenlerin broyler rasyonlarına katılmasını önermemiştir. Bu karşıtlık, tek mideli kanatlılarda tanenlerin protein bağlama özelliğinin, ruminantlardaki bypass protein avantajına dönüşemeden doğrudan bir sindirilebilirlik engeline yol açtığını ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde kanatlılara özgü bir başka husus, biyoaktif bileşiklerin lipofilik yapısının bağırsağa etkin biçimde ulaştırılmasında yarattığı güçlüktür. Bu sorunun aşılmasında mikroenkapsülasyon ve bileşiklerin birbiriyle kombinasyonu öne çıkan çözümlerdir. Bu yenilikçi teknolojiler, etkin maddenin sindirim kanalında hedeflenen bölgeye kadar korunmasını sağlayarak fitojeniklerin etkinliğini artırmaktadır (18).

6.3. Monogastrik Otçullar

Tek mideli otçullar, sindirim fizyolojisi bakımından ruminantlar ile klasik tek midelilerin arasında bir konumda yer alır. At, eşek ve tavşan gibi türlerde selüloz sindirimi, kalın bağırsak ya da sekumdaki mikrobiyal fermantasyona dayanır; dolayısıyla biyoaktif bileşiklerin bu türlerdeki etkisi, ağırlıklı olarak sindirim kanalının arka bölümündeki mikrobiyal ekosistem üzerinden gerçekleşir. Bu durum, söz konusu bileşiklerin fermantasyon üzerindeki etkilerini ruminantlara kısmen benzer, ancak zamanlama ve konum bakımından farklı kılar.

Atlarda biyoaktif bileşiklerin sekal fermantasyon üzerindeki etkisi son dönemde araştırılmaya başlanmıştır. Dehghan ve ark. (19), atların sekal ortamını simüle eden bir *in vitro* modelde, *Ferula asafoetida* ekstraktı ile üzüm posasından elde edilen kondanse tanenlerin bireysel ve kombine etkilerini incelemiş; özellikle iki bileşiğin birlikte kullanımının fermantasyon kinetiğini iyileştirdiğini, substrat degradasyonunu hızlandırdığını ve besin madde sindirilebilirliğini artırırken sekal pH'ı stabil tuttuğunu bildirmiştir. Bu bulgular, atların sekumunda dysbiosis ve asidoz gibi sorunların önlenmesinde fitojenik bileşiklerin potansiyel taşıdığına işaret etmektedir; ancak araştırmacılar, *in vivo* doğrulama ve doz optimizasyonunun gerekli olduğunu vurgulamaktadır.

Tavşanlarda ise tanenlerin etkisi doğrudan *in vivo* koşullarda değerlendirilmiştir. Yang ve ark. (20), tannik asidin farklı düzeylerde (0,75–3 g/kg) tavşan rasyonlarına eklenmesinin büyüme performansı, sindirilebilirlik, antioksidan durum ve sekal fermantasyon üzerindeki etkilerini incelemiş; 3 g/kg düzeyindeki tannik asidin serum toplam antioksidan kapasitesini artırdığını, propiyonik ve bütirik asit konsantrasyonlarını yükselttiğini ve sekal mikrobiyotayı olumlu yönde düzenlediğini bildirmiştir. Aynı çalışmada bu düzeyin günlük yem tüketimini bir miktar düşürmesine karşın besin madde sindirilebilirliğinde anlamlı bir değişiklik yaratmadığı gözlenmiştir. Bu bulgular, tavşanlarda tanenlerin uygun düzeyde kullanıldığında sindirilebilirliği bozmadan bağırsak sağlığına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Domuzlarda tanenler geleneksel olarak antinutrisyonel faktör kabul edilmiş olsa da uygun düzeylerde kullanıldıklarında bağırsak mikrobiyal ekosistemini iyileştirebildikleri ve sütten kesim döneminde bağırsak sağlığına katkı sağlayabildikleri bildirilmektedir (21). Su ürünlerinde ise fitojenik bileşikler, büyüme performansını ve hastalıklara karşı direnci artırma potansiyelleri nedeniyle giderek daha fazla araştırılan bir yem katkısı grubu haline gelmektedir; ancak bu alandaki bulgular henüz sistematik bir çerçeveye oturmuş değildir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, tek mideli otçullarda biyoaktif bileşiklerin etkisi hem sindirim fizyolojisinin kendine özgü yapısı hem de tür bazındaki farklılıklar nedeniyle ruminant ve kanatlılardan ayrışmaktadır. Bu alandaki çalışmaların görece sınırlı olması, özellikle at ve eşek gibi türlerde daha fazla *in vivo* araştırmaya duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

7. SONUÇ VE GELECEĞE YÖNELİK BAKIŞ

Bu bölümde, alternatif yem kaynaklarının bünyesinde barındırdığı biyoaktif bileşiklerin ruminant ve monogastrik hayvanlarda rasyon kalitesi ve sindirilebilirlik üzerindeki etkileri, mekanizma temelinden tür bazlı yanıtlara uzanan bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir. Ele alınan literatürün ortaya koyduğu en belirgin sonuç, tanenler, saponinler, esansiyel yağlar, flavonoidler ve alkaloidler gibi ikincil metabolitlerin tekil ve değişmez bir işlevle tanımlanamayacağıdır. Bu bileşikler, aynı anda hem besleyici değeri destekleyen fonksiyonel katkılar hem de belirli koşullarda sindirimi kısıtlayan antinutrisyonel faktörler olarak davranabilmekte; bu ikili özellik, onların hayvan beslemedeki konumunu sabit bir kategoriye değil, çok değişkenli bir denge durumuna oturtmaktadır.

Bölüm boyunca yinelenen ve tüm bileşik sınıflarını bağlayan temel ilke, doz-yanıt bağımlılığıdır. Düşük ve orta düzeydeki katılım oranlarında biyoaktif bileşikler; proteini ruminal parçalanmadan koruyarak bağırsakta emilime yönlendirme, azotun atılım yolunu idrardan dışkıya kaydırarak çevresel yükü azaltma, süt ve et yağ asidi profilini konjuge linoleik asit ve n-3 çoklu doymamış yağ asitlerince zenginleştirme ve ürünlerde oksidatif stabiliteyi artırma gibi çok yönlü katkılar sunmaktadır (5, 14, 15). Ancak bileşik konsantrasyonu türe ve kaynağa özgü bir eşiği aştığında, aynı moleküller selülolitik aktiviteyi, lif sindirilebilirliğini ve yem tüketimini baskılayan bir yöne dönüşmektedir (7, 16). Bu bağlamda "biyoaktif bileşik" ile "antinutrisyonel faktör" arasındaki ayrım, molekülün kimliğinden çok uygulama düzeyi tarafından belirlenen, geçişken bir sınır olarak anlaşılmalıdır. Dolayısıyla pratik hedef, mümkün olan en yüksek biyoaktif etkiyi elde etmek değil; sindirilebilirliği koruyan bir doz penceresi içinde anlamlı bir fonksiyonel fayda sağlamaktır.

İşte tam da bu noktada bileşiklerin tekil değil, bir arada değerlendirilmesi de bu dengenin kurulmasında belirleyici bir boyut oluşturmaktadır. Farklı etki mekanizmalarına sahip bileşiklerin birlikte kullanımı, her birinin tek başına yüksek dozda yol açacağı sindirilebilirlik kaybını sınırlayarak düşük konsantrasyonlarda dahi belirgin bir modülasyon sağlayabilmekte; nitekim tanen-saponin ve esansiyel yağ-nitrat-saponin kombinasyonlarının eklemeli ya da sinerjik yanıtlar verdiği gösterilmiştir (9, 10). Bununla birlikte kombinasyonların her zaman olumlu sonuç vermediği, bazı fitokimyasal etkileşimlerin antagonistik biçimde sindirilebilirliği daha da düşürebildiği de kaydedilmiştir (11). Bu durum, çok bileşenli formülasyonların tasarımında sinerji varsayımının test edilmeden

benimsenmemesi ve her kombinasyonun kimyasal uyumluluğunun ayrı ayrı doğrulanması gereğini ortaya koymaktadır.

Tür bazında yürütülen değerlendirme, biyoaktif bileşiklerin etkisinin sindirim sistemi anatomisiyle ve mikrobiyal fermantasyonun konumuyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Ruminantlarda etki ağırlıklı olarak ön midede, besinlerin ince bağırsağa ulaşmasından önce ortaya çıkmakta; bu da hem fermantasyon ürünlerini hem de bağırsağa geçen besin madde profilini eş zamanlı biçimde şekillendirmektedir (16, 17). Kanatlılarda ise sınırlı mikrobiyal fermantasyon nedeniyle bileşiklerin başlıca etkisi rumen modülasyonu değil, bağırsak morfolojisinin ve enzim aktivitesinin iyileştirilmesi üzerinden gerçekleşmekte; villus gelişimini destekleyerek ve sindirim salgılarını uyararak besin madde emilimini artırmaktadır (18). Tek mideli otçullarda (at, eşek, tavşan) ise etki, sindirim kanalının arka bölümündeki sekal fermantasyon düzeyinde ortaya çıkmakta ve ruminantlara kısmen benzer, ancak zamanlama ve konum bakımından farklı bir işleyiş sergilemektedir (19, 20). Bu fizyolojik ayrışma, tek bir dozaj ya da uygulama protokolünün türler arasında genellenemeyeceğini; her türün sindirim fizyolojisine ve hatta tür içindeki yaş ve fizyolojik duruma göre uyarlanmış stratejiler geliştirilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir.

Metodolojik açıdan, bu alandaki bulguların önemli bir bölümünün *in vitro* sistemlerden elde edildiği ve bu sistemlerin kendine özgü sınırları bulunduğu göz ardı edilmemelidir. Kapalı fermantasyon düzenekleri, çok sayıda muamelenin hızlı, düşük maliyetli ve etik açıdan avantajlı biçimde taranmasına imkân tanısa da; emilim, geçiş hızı ve konak kaynaklı düzenleyici süreçlerin yokluğu nedeniyle gözlenen etkilerin canlı hayvana doğrudan aktarılmasını güçleştirmektedir. Özellikle at gibi sekal fermantasyona dayanan türlerde mevcut kanıtların büyük ölçüde *in vitro* modellerle sınırlı kalması (19), bu bulguların *in vivo* koşullarda doğrulanmasını vazgeçilmez kılmaktadır. Bu nedenle laboratuvar temelli tarama, güçlü ve gerekli bir ilk basamak olmakla birlikte, nihai besleme önerilerine dönüştürülmeden önce hayvan düzeyinde teyit edilmesi gereken bir yönlendirme aracı olarak konumlandırılmalıdır.

Bu teknik değerlendirmelerin ötesinde, alternatif yemlerdeki biyoaktif bileşiklerin taşıdığı potansiyel, giriş bölümünde ele alınan daha geniş bir alana, yani yem–gıda rekabetine ve döngüsel ekonomiye bağlanmaktadır. Turunçgil posası, üzüm ve şarap endüstrisi artıkları, ağaç yaprakları ve çeşitli agro-endüstriyel yan ürünler, hem geleneksel yem hammaddelerine olan bağımlılığı azaltan besin kaynakları hem de değerli biyoaktif bileşiklerin taşıyıcıları olarak çift yönlü bir görev üstlenmektedir (1, 2). Bu materyallerin rasyonlara kazandırılması, atık niteliğindeki kaynakların katma değere dönüştürülmesi yoluyla üretim maliyetlerini düşürme ve çevresel ayak izini azaltma potansiyeli taşımakta; böylece biyoaktif bileşiklerin işlevsel katkısı, sürdürülebilir hayvancılık hedefleriyle örtüşen bir boyut kazanmaktadır. Bu perspektif, özellikle yerel kaynakların bölgesel ölçekte değerlendirilmesi bakımından, ülkemiz gibi tarımsal yan ürün çeşitliliği fazla olan coğrafyalarda ayrıca önem taşımaktadır.

Bu tablo ışığında, gelecekteki araştırmalar için birkaç öncelikli yön öne çıkmaktadır. Öncelikle, at ve eşek gibi görece az çalışılmış türlerde *in vitro* bulguların *in vivo* denemelerle doğrulanmasına, doz optimizasyonuna ve uzun süreli mikrobiyota etkilerinin izlenmesine ihtiyaç vardır. İkinci olarak, farklı bileşik sınıflarının birlikte kullanıldığı kombinasyonların sinerjik ve antagonistik etkilerinin sistematik biçimde haritalanması, güvenli ve etkili formülasyonların geliştirilmesi açısından kritik önemdedir. Üçüncü olarak, tür, kaynak ve fizyolojik duruma özgü optimal doz aralıklarının standardize edilmesi ve bu doğrultuda *in vitro–in vivo* korelasyonunu güçlendiren yöntemsel çalışmaların artırılması, alanın güvenilirliğini pekiştirecektir. Son olarak, biyoaktif bileşiklerin yapı-aktivite ilişkilerinin moleküler düzeyde aydınlatılması, gözlenen tutarsız sonuçların açıklanması ve öngörülebilir uygulama stratejilerinin geliştirilmesi bakımından belirleyici olacaktır.

Bu bağlamda, hayvan beslemede kullanım olanağı ile alternatif yemlerdeki biyoaktif bileşikler, rasyon kalitesini ve sindirilebilirliği iyileştirme potansiyeli taşıyan, ancak bu potansiyeli yalnızca uygun koşullar altında açığa çıkaran çok boyutlu araçlardır. Bu bileşiklerin etkin ve güvenli kullanımı; tek bir "en iyi" çözümün aranmasıyla değil, kaynağın kimyasal yapısına, uygulama dozuna, hedef türün sindirim fizyolojisine ve rasyonun bütününe duyarlı, kanıta dayalı ve bütünleşik bir yaklaşımla mümkün olacaktır. Bu yaklaşım hem hayvansal üretimin verimliliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini birlikte değerlendiren bir besleme anlayışının temelini oluşturmaktadır.

8. KAYNAKLAR

1. Pexas G, Doherty B, Kyriazakis I. The future of protein sources in livestock feeds: implications for sustainability and food safety. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023; 7, 1188467. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1188467
2. Alimi N, Assani AS, Worogo HS. Livestock feed resources used as alternatives during feed shortages and their impact on the environment and ruminant performance in West Africa: a systematic review. *Frontiers in Veterinary Science*, 2024; 11, 1352235. https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1352235
3. Patra AK, Saxena J. Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of the effects on microbial populations. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2009; 96(4), 363–375. https://doi.org/10.1007/s10482-009-9364-1
4. Patra AK, Saxena J. The effect and mode of action of saponins on the microbial populations and fermentation in the rumen and ruminant production. *Nutrition Research Reviews*, 2009; 22(2), 204–219. https://doi.org/10.1017/S0954422409990163
5. Patra AK, Saxena J. Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism and ruminant nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011; 91(1), 24–37. https://doi.org/10.1002/jsfa.4152
6. Boudalia S, Smeti S, Dawit M. Alternative approaches to feeding small ruminants and their potential benefits. *Animals*, 2024; 14(6), 904. https://doi.org/10.3390/ani14060904
7. Tedeschi LO, Muir JP, Naumann HD, Nutritional aspects of ecologically relevant phytochemicals in ruminant production. *Frontiers in Veterinary Science*, 2021; 8, 628445. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.628445

8. Ramdani D, Yuniarti E, Jayanegara A. Roles of essential oils, polyphenols, and saponins of medicinal plants as natural additives and anthelmintics in ruminant diets: a systematic review. *Animals*, 2023; 13(4), 767. https://doi.org/10.3390/ani13040767
9. Jayanegara A, Yogianto Y, Wina E. Combination effects of plant extracts rich in tannins and saponins as feed additives for mitigating in vitro ruminal methane and ammonia formation. *Animals*, 2020; 10(9), 1531. https://doi.org/10.3390/ani10091531
10. Patra AK, Yu Z. Effects of adaptation of in vitro rumen culture to garlic oil, nitrate, and saponin and their combinations on methanogenesis, fermentation, and abundances and diversity of microbial populations. *Frontiers in Microbiology*, 2015; 6, 1434. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01434
11. Akanmu AM, Hassen A, van Marle-Köster E. Synergistic effects of bioactive plant extract mixtures on methane reduction and rumen fermentation of Eragrostis curvula hay in vitro. *Scientific Reports*, 2025; 15, 34878. https://doi.org/10.1038/s41598-025-16544-x
12. Calsamiglia S, Busquet M, Cardozo PW. Invited review: Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science*, 2007; 90(6), 2580–2595. https://doi.org/10.3168/jds.2006-644
13. Oskoueian E, Abdullah N, Oskoueian A. Effects of flavonoids on rumen fermentation activity, methane production, and microbial population. *BioMed Research International*, 2013; 2013, 349129. https://doi.org/10.1155/2013/349129
14. Priyashantha H, Jayathissa IS, Vidanarachchi JK. Phytochemicals in ruminant diets: mechanistic insights, product quality enhancement, and pathways to sustainable milk and meat production—invited review. *Animals*, 2026; 16(3), 425. https://doi.org/10.3390/ani16030425
15. Torres RNS, Paludo CG, Paschoaloto J. Effects of tannins supplementation to sheep diets on their performance, carcass parameters and meat fatty acid profile: a meta-analysis study. *Small Ruminant Research*, 2021; 206, 106585. https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106585
16. Al Rharad A, El Aayadi S, Avril C. Meta-analysis of dietary tannins in small ruminant diets: effects on growth performance, serum metabolites, antioxidant status, ruminal fermentation, meat quality, and fatty acid profile. *Animals*, 2025; 15(4), 596. https://doi.org/10.3390/ani15040596
17. Yanza YR, Irawan A, Jayanegara A. Saponin extracts utilization as dietary additive in ruminant nutrition: a meta-analysis of in vivo studies. *Animals*, 2024; 14(8), 1231. https://doi.org/10.3390/ani14081231
18. Abdelli N, Solà-Oriol D, Pérez JF. Phytogenic feed additives in poultry: achievements, prospective and challenges. *Animals*, 2021; 11(12), 3471. https://doi.org/10.3390/ani11123471
19. Dehghan H, Moghaddaszadeh-Ahrabi S, Hashemzadeh-Farhang H. Synergistic effects of Ferula asafoetida extract and condensed tannins from raisin pomace on in vitro cecal fermentation kinetics and nutrient digestibility in horses. *Veterinary World*, 2026; 19(3), 905-919. https://doi.org/10.14202/vetworld.2026.905-919
20. Yang K, Chen Y, Wang K. Evaluating the effects of tannic acid on rabbit growth performance, digestibility, antioxidant status, intestinal morphology and caecal fermentation and microbiota. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2024; 108(2), 414–422. https://doi.org/10.1111/jpn.13903
21. Hassan ZM, Manyelo TG, Selaledi L. The effects of tannins in monogastric animals with special reference to alternative feed ingredients. *Molecules*, 2020; 25(20), 4680. https://doi.org/10.3390/molecules25204680
22. Balcells J, Aris A, Serrano A. Effects of an extract of plant flavonoids (Bioflavex) on rumen fermentation and performance in heifers fed high-concentrate diets. *Journal of Animal Science*, 2012; 90(13), 4975–4984. https://doi.org/10.2527/jas.2011-4955
23. Dorantes-Iturbide G, Orzuna-Orzuna JF, Lara-Bueno A. Essential oils as a dietary additive for small ruminants: a meta-analysis on performance, rumen parameters, serum metabolites, and

product quality. *Veterinary Sciences*, 2022; 9(9), 475. https://doi.org/10.3390/vetsci9090475
24. Irawan A, Hidayat C, Jayanegara A. Essential oils as growth-promoting additives on performance, nutrient digestibility, cecal microbes, and serum metabolites of broiler chickens: a meta-analysis. *Animal Bioscience*, 2021; 34(9), 1499–1513. https://doi.org/10.5713/ab.20.0668
25. Hidayat C, Irawan A, Jayanegara A. Effect of dietary tannins on the performance, lymphoid organ weight, and amino acid ileal digestibility of broiler chickens: a meta-analysis. *Veterinary World*, 2021; 14(6), 1405–1411. https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1405-1411
26. Boğa, M., Kocadayıoğulları, F., Erkan Can, M. Tanenlerin ruminant hayvan beslemede kullanımı. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 2021; *4*(4), 217-225. https://doi.org/10.34248/bsengineering.937301.
27. Kılıç, H. N., Boğa, M. Reducing Methane Emissions with Animal Feeding Strategies. *Turkish Journal of Agriculture- Food Science and Technology*, 2021; *9*(9), 1700–1713. https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i9.1700-1713.4446