



Sığırlarda Enterik Metan Emisyonlarının Azaltılmasında Makroalg ve 3-Nitrooksipropanol'un Etkinliği

Habip MURUZ* Zeynep Tuğçe SERTKAYA

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi Veteriner Fakültesi Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları Ana Bilim Dalı, Samsun, Türkiye
²Dokuz Eylül Üniversitesi Veteriner Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Veterinerlik Fizyolojisi Anabilim Dalı, Samsun, Türkiye

Geliş Tarihi: 26.09.2022

Kabul Tarihi: 07.12.2022

Basım Tarihi: 31.12.2022

Atf yapmak için: Muruz, H. & Sertkaya, Z.T. (2022). Sığırlarda Enterik Metan Emisyonlarının Azaltılmasında Makroalg ve 3-Nitrooksipropanol'un Etkinliği. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 7(4), 516-522.

How to cite: Muruz, H. & Sertkaya, Z.T. (2022). The Effectiveness of Macroalgae and 3-Nitrooxypropanol for Mitigation of Enteric Methane Emissions in Cattle. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 7(4), 516-522.

*ID: <https://orcid.org/0000-0002-1975-4545>
ID: <https://orcid.org/0000-0002-1307-6480>

*Sorumlu yazarın:

Habip MURUZ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Veteriner Fakültesi
Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları Ana
Bilim Dalı, Samsun, Türkiye
✉: habip.muruz@omu.edu.tr

Öz: Ruminantlarda özellikle sığırlarda enterik fermantasyondan kaynaklanan metan (CH₄), hem oneli bir sera gazıdır ve hem de yemin brüt enerjisinde %12'lik bir kayba neden olur. Bu nedenle, ruminant üretim sistemlerinde metajenezi azaltmak için uygun maliyetli stratejilere ihtiyaç vardır. Son çalışmalar, kimyasal olarak sentezlenen bileşik 3-Nitrooksipropanol (3-NOP), enterik CH₄ üretimini %30'a kadar azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. *Asparagopsis taxiformis*'in, süt verimini veya besin madde kullanımını etkilemeksizin güçlü bir enterik CH₄ inhibitörü olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, deniz yosununun geviş getiren hayvanlara verilmesinin, süt ve/veya et bromoform içeriğinde tüketici sağlığı üzerinde potansiyel etkileri olan bir artışa yol açabileceğine dair bazı endişeler vardır. Bu derlemenin amacı, 3-NOP ve kırmızı makroalglerin etkinlik durumlarını gösteren in vivo ve in vitro çalışmaların genel bulgularını incelemektir.

Anahtar kelimeler: Enterik metan, makroalg, 3-nitrooksipropanol, sığır.

The Effectiveness of Macroalgae and 3-Nitrooxypropanol for Mitigation of Enteric Methane Emissions in Cattle

*Corresponding author's:

Habip MURUZ
Ondokuz Mayıs University, Faculty of
Veterinary Medicine, Department of Animal
Nutrition and Nutritional Diseases, Samsun,
Türkiye
✉: habip.muruz@omu.edu.tr

Abstract: Methane (CH₄) originating from enteric fermentation in ruminants, especially in cattle, is both an important greenhouse gas and causes a 12% loss in adult gross energy. Therefore, cost-effective strategies are needed to reduce metagenesis in the ruminant production system. Recent studies have shown that the chemically synthesized compound 3-Nitrooxypropanol (3-NOP) has the potential to reduce enteric CH₄ production by up to 30%. *Asparagopsis taxiformis* has proven to be a potent enteric CH₄ inhibitor without affecting milk yield or nutrient utilization. However, there are some concerns that feeding seaweed to ruminants may lead to a spike in milk and/or meat bromoform content with potential implications for consumer health. The purpose of this review is to examine the general findings of in vivo and in vitro studies showing the efficacy of 3-NOP and red macroalgae.

Keywords: Cattle, enteric methane, macroalgae, 3-nitrooxypropanol.

GİRİŞ

Sera gazlarının içerisinde metan (CH₄), küresel ısınma ve iklim değişikliği üzerinde oynadığı rol açısından, karbondioksitten (CO₂) sonra ikinci sırada gelmektedir (Arndt vd., 2022). Küresel CH₄ emisyonunun yaklaşık %16'sından ruminantlar, özellikle de süt ve besi sığırları

sorumludur (Tseten vd., 2022). Bu hayvanlardan kaynaklanan CH₄ emisyonlarının %88'i, yemlerin fermentasyon sürecinin bir parçası olarak üretilen ve geçirme ile atmosfere salınan enterik kaynaklıdır (Caro vd., 2016). Yetişkin bir sığır kuru madde (KM) tüketimine bağlı olarak 250-500 L/gün, koyunlar ise 20-55 L/gün CH₄ üretir (Eckard vd., 2010). CH₄, aynı zamanda

ruminantlarda yemin brüt enerjisinde %12'ye kadar (CH₄'ün enerji içeriği 55.22 MJ/kg) bir kayba neden olmaktadır (Johnson & Johnson, 1995). Bu nedenle, etkili rumen CH₄ azaltma stratejileri geliştirmek hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemlidir. Bu amaçla yem katkı maddelerinin kullanımına, rasyon manipülasyonuna ve kaba yem kalitesine odaklanan çeşitli yaklaşımlar vardır (Hristov vd., 2013).

Rumende mikrobiyal metanojenizin inhibisyonu yoluyla enterik CH₄ emisyonunu azaltmak için yem katkı maddelerinin etkinliği üzerine kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür (Patra vd., 2017). İnhibitörler, iyonoforlar, elektron reseptörleri, bitki biyoaktif bileşikler, rasyon lipidleri, eksojen enzimler ve probiyotikler de dahil olmak üzere çok sayıda yem katkı maddesinin etkinliği test edilmiştir. Bu bileşiklerin birçoğunun rumen metanojenizini inhibe ettiği gösterilmiş olsa da, bazılarının uçucu yağ asitleri (UYA) üretimini azalttığı (Machado vd., 2016) ve dolayısıyla hayvansal üretim üzerinde istenmeyen bir yan etki oluşturdukları gösterilmiştir. Çalışmalar göstermiştir ki sentetik inhibitör 3-nitrooksipropanol (3-NOP; BovaerTM, DSM Nutritional Products, Basel, İsviçre) CH₄ üretimini genel olarak %30'a kadar azalttığını ortaya koymuştur (Alemu vd., 2021; Hristov vd., 2015; Yu vd., 2021). Ek olarak, bazı makroalg türlerinin de özellikle kırmızı deniz yosunu *Asparagopsis taxiformis*, hem in vitro hem de in vivo olarak güçlü anti-metanojenik özelliklere sahip olduğu ve CH₄ üretimini %95'in üzerinde azalttığı gösterilmiştir (Roque vd., 2021; Terry vd., 2022).

Bu derlemenin amacı, 3-nitrooksipropanol (3-NOP) ve kırmızı deniz makroalglerin etki şekilleri ve biyogüvenirlikleri hakkındaki bilgileri özetlemektir. Bu katkıların, rasyon sindirilebilirliği, ruminal mikroorganizmalar, ruminal fermentasyon ve hayvansal performans, değişkenleri üzerindeki etkileri bu derlemenin kapsamı dışındadır.

Metanojen Arkeler Ve Rumen Metanojenizi:

Rumende mikrobiyal fermentasyon, konakçı tarafından sindirilemeyen bitki biyokütlesinin parçalanmasını kolaylaştırarak asetat, propiyonat ve butirat üretimi yoluyla hayvanın enerji gereksinimlerinin %70'ini karşılar (Bergman, 1990). Bununla birlikte, asetat ve butirat sentezi, rumen mikrobiyal biyokütlesi içinde küçük bir grup olan metanojenik arkeler tarafından CH₄'e dönüştürülen ve geçirme yoluyla salınan önemli miktarlarda hidrojen gazı (H₂) üretir (Leahy vd., 2013). Arkealar, kendi kofaktörleri (koenzimler M, F420 ve F430) ve lipide (izopren-gliserol esterleri) sahip bakterilerden farklı hidrojenotrofik ve anaerobik mikrobiyal bir gruptur (Attwood vd., 2011). Metanojenler çoğunlukla hidrojenotroftir ve metabolizmaları için birincil enerji kaynağı olarak rumendeki H₂ gibi elektron vericileri

kullanırlar. Metanojenler CO₂, asetat ve metillenmiş bileşikler olan üç farklı substrat türünden CH₄ sentezleyebilir. Bu reaksiyonun son dan bir önceki adımında, metil grubu koenzim M metiltransferaz (bir kobalamin prostetik grubu) tarafından koenzim M'ye (etantiolsülfonat) aktarılır ve son adımında ise koenzim M redüktaz (MCR; protez grubu olarak nikel tetrapirrol; sinonimi, kofaktör F430) ile CH₄'e indirgenir (Matthews, 2009).

Metanojenizin bu son iki adımı, enterik CH₄ üretiminin azaltılmasına yönelik araştırmalarda ilgi çekicidir. Özellikle MCR enzimini inhibe eden katkıların, rumende CH₄ üretimini azalttığı kanıtlanmıştır (Beauchemin vd., 2020).

Metan oluşumunun fizyolojik işlevi, H₂ birikimini önlemek ve rumende hidrojenin kısmi basıncını düşük tutmak ve stabil bir rumen ortamının devamlılığı sağlamaktır (Janssen, 2010). Aksi halde, enterik fermentasyon sırasında büyük hacimlerde üretilen H₂'nin rumende birikerek rumen mikroorganizmaları ve fermentatif sindirim süreçleri olumsuz etkiler.

Rumen İnhibitörleri: Ruminantlarda CH₄ emisyonunu azaltmak için en umut verici stratejilerden biri rumen inhibitörlerinin kullanımınıdır. CH₄ inhibitörleri, rumende yaşayan metanojenlerdeki kritik enzimatik yolları bloke eden, onların büyümelerini ve CH₄ üretme yeteneklerini kısıtlayan kimyasal bileşiklerdir (Henderson vd., 2016). Rumen inhibitörlerin çoğu, CH₄ analogları veya metanojeniz sırasında metil transferinde rol oynayan bir yardımcı faktör olan metil-koenzim M'nin analogları olarak sınıflandırılabilir. 3-NOP ve kırmızı makroalgler, umut verici CH₄ inhibitörleridir.

3-Nitrooxypropanol (3NOP):

Metanogenezi engelleyen ve böylece rumende CH₄ üretimini azaltan kimyasal olarak sentezlenmiş inhibitörler önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır (Beauchemin vd., 2020). Kimyasal madde 3-NOP, metanojenizin son adımı katalize eden MCR'nin aktif bölgesini hedefleyen bir katkı maddesidir. 3-NOP'un arkelerde MCR enzimini inaktive ederek rumende metanojenizi azalttığı düşünülmektedir (Duin vd., 2016). 3-NOP moleküler yapısı nedeniyle yüksek oranda çözünür ve rumende çok düşük nitrat, nitrit ve 1,3-propandiol konsantrasyonlarına hızla metabolize olur (Yu vd., 2021). Duin vd., (2016) 3-NOP'un rumen sıvısında düşük toksisiteye sahip bir bileşik olan 1,3-propandiol'e hidrolize olduğunu ve daha sonra 3-hidroksipropiyonik aside (HPA) dönüştürüldüğünü bildirmiştir. Thiel vd. (2019) ise 3-NOP'un önce 3-nitrooksipropiyonik aside (NOPA) oksitlendiğini, bunun daha sonra HPA ve inorganik nitrata hidrolize olduğunu göstermiştir. 3-NOP, pelet veya toz formunda TMR'ye karıştırılabildiği gibi rasyonun yüzeyine de serpilebilir. 3-NOP katkısı içeren rasyonun

gün boyunca tüketime sunulması önerilmektedir (Van Wesemael vd., 2019).

3-NOP'nin ruminant rasyonlarına dahil edilmesi, enterik CH₄ emisyonlarını doz-yanıt şeklinde azaltmaktadır (Dijkstra vd., 2018; Kim vd., 2020). Dijkstra vd., (2018), rasyona katılan 3-NOP'nin miktarının besi sığırlarda 50-345 mg/kg KM (ortalama 144 mg/kg KM) ve süt sığırlarında ise 27-135 mg/kg KM arasında (ortalama 81 mg/kg KM) değiştiğini bildirmiştir. Birkaç meta-analiz çalışmasında, rasyona eklenen 3-NOP'nin miktarının artması ile enterik CH₄ emisyonlarının doğrusal olarak azaldığı bildirilmektedir (Dijkstra vd., 2018; Kim vd., 2020). Romero-Perez vd., (2014), 3-NOP'nin rasyona katılma düzeyinin (47, 144 ve 305 mg/kg KM) hayvan başına toplam CH₄ emisyonları (g/gün) üzerinde doğrusal bir etkisi olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, besi sığırları rasyonlarına 100-200 mg/kg KM (Vyas vd., 2016) ve orta ve geç laktasyondaki süt ineği rasyonlarına ise 40-80 mg/kg KM (Hristov vd., 2015), arasında eklenen 3-NOP'nin uygulama miktarının artması ile CH₄ üretiminin azaldığı bildirilmiştir. Van Wesemael vd., (2019) tarafından süt ineklerinde 3-NOP'un 6 farklı düzeyinin (40, 60, 80, 100, 150 ve 200 mg/kg KM) değerlendirildiği bir çalışmada, 150 mg/kg'da CH₄ üretiminde maksimum azalma olduğunu fakat 100, 150 ve 200 mg/kg arasında istatistiksel farklılık olmadığı saptanmıştır. Buna karşılık, Alemu vd. (2021) tarafından sığırlarda 3-NOP konsantrasyonuna doğrusal bir yanıt gözlenmemiştir.

Yayınlanmış çalışmalar incelendiğinde, 3-NOP'nin CH₄ emisyonlarını azaltmadaki etkinliğinin aynı dozda besi sığırlarına kıyasla süt sığırlarında daha fazladır (Dijkstra vd., 2018; Kim vd., 2020). Kim vd., (2020), 100 mg 3-NOP/kg KM dozunun, rasyon türleri ve KM tüketim düzeyindeki farklılıklardan dolayı enterik CH₄ emisyonlarının süt sığırlarında %36,4 ve besi sığırlarında %17,3 azaldığını gözlemlemişlerdir. Kim vd., (2020)'nin meta-analizindeki denklemlere göre, süt ineklerinde 60-80 mg 3-NOP/kg KM ve besi sığırlarında 150-200 mg arasındaki 3-NOP/kg KM dozunun enterik CH₄ üretimini %30 azaltacağı öngörülmektedir. Başka bir meta-analiz çalışmasında Dijkstra vd., (2018), 3-NOP katkısına yanıtın, 3-NOP'nin uygulama dozunun yanı sıra hayvan cinsi ve rasyonun besin madde kompozisyonundan etkilendiğini göstermiştir. Rasyonun artan nötr deterjan lifi (NDF) düzeyinin 3-NOP'nin anti-metanojenik etkisini olumsuz etkilediği gösterilmiştir (rasyon NDF'inde 10 g/kg KM artışı, 3-NOP'nin CH₄ üretimini azaltma etkinliğini %1.64-0.33 düşürür). Bu nedenle, aynı sığır cinsinde, 3-NOP'un CH₄ üretimini azaltma etkisi, yüksek konsantrasyonlarda daha fazla (Romero-Perez vd., 2014; Vyas vd., 2016; Vyas vd., 2018) ve yüksek lifli diyetlerde daha azdır (Alemu vd., 2021; Dijkstra vd., 2018). Örneğin, 3-NOP'yi yem katkı maddesi olarak kullanan birkaç

çalışmada, besi yeri sığır beslenen tahıla dayalı rasyonlarından kaynaklanan CH₄ emisyonlarında çok yüksek düşüşler bildirilmiştir (McGinn vd., 2019: %80; Vyas vd., 2016: %82). Lif açısından zengin bir rasyonun metil-koenzim M konsantrasyonunu artırdığı ve dolayısıyla metanojenizi azaltmak için 3-NOP'nin dozunun artırılması önerilmiştir (Dijkstra vd., 2018). Bununla birlikte, düşük kaliteli kaba yemle beslenen sığırlarda bileşiğin etkinliği hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

3-NOP'a verilen yanıtın uzun vadede korunup korunmadığını belirlemek için 10 haftalık (Van Wesemael vd., 2019), 12 haftalık (Hristov vd., 2015), 15 haftalık (Vyas vd., 2018), 16 haftalık (Remore-Perez vd., 2015) ve 34 haftalık (Vyas vd., 2016) gibi 5 farklı sürede yürütülen çalışmalarda, genel olarak, uzun vadeli araştırmalardaki yanıtın kısa vadeli çalışmalarda gözlemlenenlere benzer olduğu görülmüştür. Hristov vd., (2015), 12 hafta boyunca 40-80 mg 3-NOP/kg KM katkısının laktasyondaki süt ineklerinde CH₄ (g/gün) üretimini ortalama %30 azaldığını bulmuştur. 3-NOP (40 ve 80 mg/kg yem KM) ile süt sığırlarında 10 (Van Wesemael vd., 2019) ve 15 hafta (Melgar vd., 2021) süreli çalışmalarda, CH₄ (g/gün) üretimi deneme boyunca ortalama %26 ve 28 oranında azaldığı ve 3-NOP'nin etkisinde zamanla bir azalma görülmemiştir. Buna karşın, Melgar vd., (2020), 3-NOP'nin etkinliğinin deneme süresince (15 hafta) azaldığını bildirmiştir. Benzer şekilde McGinn vd., (2019)'nın besi sığırlarında yürüttükleri çalışmada, CH₄ emisyon azaltımında küçük, sürekli bir düşüş olması (mikrometeorolojik yöntemler kullanılarak 90 gün boyunca %80'den %60'a düşüş) muhtemelen rumen mikrobiyomunun 3-NOP'ye bir adaptasyonunu göstermektedir. Alemu vd., (2021), düşük dozda (100 mg/kg KM) 16 haftalık beslemede, besi sığırlarda 3-NOP'un CH₄ üretimini (g/kg KM) düşürme etkinliğinde %22'lik bir azalma bildirmiştir. Ancak, çalışmada daha yüksek dozlar kullanıldığında (125 ve 150 mg/kg KM) zaman içinde azalma saptanmamıştır. 3-NOP'un azaltma etkisinin kalıcı olmasını sağlamak için, besi sığırları için besleme periyodu boyunca ve birden fazla yıl ve süt inekleri için çoklu laktasyonlarda tekrarlanan ölçümleri kapsayan çalışmalara ihtiyaç vardır

Yukarıda ifade edildiği gibi 3-NOP'un ruminantlarda CH₄ emisyonlarını azalttığına dair çok güçlü bilimsel kanıtlar vardır. Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesinin bilimsel panelinde, 3-NOP'nin tüketici güvenliği ve çevre için herhangi bir endişe yaratmadığı ve rasyona 60 mg/kg KM düzeyinde katılmasının güvenli ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır (EFSA vd., 2021). Şubat 2022'de 3-NOP'un pazarlanması AB üye ülkeleri tarafından onaylanarak Bovaer® adı altında piyasaya sunulmuştur. Katkı maddesi, AB pazarında bulunan türünün ilk örneğidir (Avrupa Komisyonu, 2022a).

Makroalgler: Makroalgler, dünya çapında kıyı bölgelerine dağılmış 6000-10000 farklı deniz türünden oluşur ve pigmentasyonlarına göre kahverengi, kırmızı ve yeşil olmak üzere üç tipe ayrılır (Makkar vd., 2016). Makroalgler, karmaşık ve stresli bir deniz suyu ortamı ve çeşitli mikrobiyal enfeksiyonlarla başa çıkmalarına yardımcı olan bir dizi biyoaktif bileşikler üretme yeteneklerine ek olarak, karbonhidratlar, lipidler ve proteinler gibi bir besin madde kaynağı sağlar (Machado vd., 2016). Çoğu deniz yosunu türünün, rumen fermentasyonunu etkileyerek enterik CH₄ üretimini çeşitli derecelerde azalttığı gösterilmiştir (Machado vd., 2016). Enterik CH₄'ün azaltılmasında en umut verici ve etkili deniz yosunu türleri, enterik CH₄ üretimini sırasıyla %98,9 ve %92,2 azaltma potansiyeline sahip *Asparagopsis* (kırmızı makroalg) ve *Dictyot* (kahverengi makroalg)'dır (Machado vd., 2014). *A. taxiformis* gibi alglerin anti-metanojenik özelliği, bir halojen olan yüksek bromoform içeriğinden kaynaklanmaktadır (Machado vd., 2016). *A. taxiformis*'in CH₄ üretimi üzerindeki inhibitör etkisi ayrıca saf bromoform'dan daha fazladır. Bu da deniz yosunlarında bulunan çoklu biyoaktiflerin metanojenezin inhibisyonu için sinerjik çalıştıklarını göstermektedir (Machado vd., 2018). Bu halojenli bileşikler, CH₄ ve diğer metanojenik ara maddelerinin yapısal analoglarıdır (Glasson vd., 2022) ve metajenezin sondan bir önceki adımında, koenzim M metiltransferaz'ın işlevi için gerekli olan kobalaminler (B₁₂) ile reaksiyona girerek bu enzimi bloke eder ve sonuçta CH₄ sentezi inhibe olur (Wood vd., 1968). Bununla birlikte, bazı makroalg türleri yem olarak kullanıldığında, yüksek kül içeriği ve rumende yıkılım oranı düşük kompleks karbonhidratlar nedeniyle rumen fermentasyonunu ve toplam sindirilebilirliği olumsuz etkileyebilirler (Bikker vd., 2020). Bu durum, özellikle yüksek düzeyde makroalg içeren rasyonlarla beslemede hayvan performansını azaltabilir (Bikker vd., 2020). Bu nedenle, makroalglerin anti-metanojenik etkileri, yem tüketimi, sindirilebilirlik ve hayvan performansı üzerindeki genel etkilerine dayalı olarak değerlendirilmelidir. Öte yandan, deniz yosununun süt ve/veya ette bromoform kalıntısına neden olabileceğine dair bazı endişeler vardır (Abbott vd., 2020; Muizelaar vd., 2021).

Yüksek tahıllı bir rasyona %0.1-0.2 (OM'de) *A. taxiformis* eklenerek besi sığırlarında yem tüketimi, yemden yararlanma, rumen fonksiyonu ve ette herhangi bir kalıntı veya değişiklik oluşturmadan CH₄ emisyonunda %40-98'lik bir azalmanın sağlanabileceği bildirilmiştir (Kinley vd., 2020). Besi sığırlarında yürütülen benzer bir çalışmada, düşük (%0,25) ve yüksek (%0,5) katılım oranlarında CH₄ üretiminde sırasıyla %45 ve %68'lik bir düşüş saptanmıştır (Roque vd., 2021). Benzer şekilde, yüksek oranda lif içeren TMR'ye (%3 OM'de) katılan aynı

makroalglerin 72 günlük bir besleme denemesinde, koyunlarda enterik CH₄ üretiminde %80 'lik bir azalmaya yol açmıştır (Li vd., 2018). Bu, farklı substratlarla birlikte bu makroalglerin %0,5-5 (OM'de) eklenmesinin 72 saatlik bir inkübasyon süresi boyunca CH₄ oluşumunda ~%74-99 düşüşle sonuçlandığı birkaç in vitro fermentasyon çalışmasının sonuçlarıyla tutarlıdır (Brooke vd., 2018; Machado vd., 2016; Roque vd., 2019b). Aynı cinse ait başka bir kırmızı makroalg türü olan *A. armata*'nın rasyon OM'sine %1 oranında katılmasının süt sığırlarında CH₄ üretimini ~%67 oranında baskıladığı gösterilmiştir (Roque vd., 2019a). Stefenoni vd., (2021)'nin çalışmasında ise %0.5 (KM'de) biyoaktif *Asparagopsis taxiformis*'in katkısının süt ineklerinde CH₄ üretimini %55-80 azalttığı saptanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak ruminant rasyonlarına minimum düzeyde katılan *Asparagopsis* spp.'nin enterik CH₄ üretimini önemli ölçüde azaltabilen etkili bir yem katkı maddesi olduğu söylenebilir. Buna ilaveten kırmızı deniz yosununun sığırlara verilmesinin CH₄ emisyonlarını azaltma açısından uzun vadede etkilerini ortaya koyacak çalışmalara ihtiyaç vardır. Sığır endüstrisinde *Asparagopsis*'in hem araştırmasını hem de kullanımını genişletmedeki tek sınırlayıcı faktör, deniz yosununa erişimdir. Bu nedenle, *Asparagopsis taxiformis*'in kapalı sistemlerde veya kıyı veya açık deniz çiftliklerinde kültürlenmesi için tekniklerin ve en iyi uygulamaların geliştirilmesine ihtiyaç vardır

SONUÇ

3-NOP, ruminantlarda enterik CH₄ üretimini %20-30 azaltmasının yanı sıra hayvanlar ve insanlar için biyo-güvenlik riskleri minimum düzeyde bir bileşik olduğu değerlendirilmektedir. *A. taxiformis* ve *A. armata* gibi kırmızı makroalgler, %5'in (rasyon OM'de) altında bir katılım oranında umut verici anti-metanojenik yem katkı maddesidir. Ancak, her iki rumen inhibitörünün rumen fermentasyon ürünleri ve hayvan performansına etkileri üzerine daha fazla çalışma yürütülmelidir.

KAYNAKLAR

- Abbott, D.W., Aasen, I.M., Beauchemin, K.A., Grondahl, F., Gruninger, R., Hayes, M. & Xing, X. (2020).** Seaweed and seaweed bioactives for mitigation of enteric methane: Challenges and opportunities. *Animals*, **10**(12), 2432.
- Abdela, N. (2016).** Sub-acute ruminal acidosis (SARA) and its consequence in dairy cattle: A review of past and recent research at global prospective. *Achievements in the Life Sciences*, **10**(2), 187-196.

- Alemu, A.W., Pekrul, L.K., Shreck, A.L., Booker, C.W., McGinn, S.M., Kindermann, M. & Beauchemin, K.A. (2021).** 3-Nitrooxypropanol decreased enteric methane production from growing beef cattle in a commercial feedlot: implications for sustainable beef cattle production. *Frontiers in Animal Science*, **2**, 641590.
- Arndt, C., Hristov, A.N., Price, W.J., McClelland, S.C., Pelaez, A.M., Cueva, S.F. & Yu, Z. (2022).** Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5° C target by 2030 but not 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**(20), e2111294119.
- Attwood, G.T., Altermann, E., Kelly, W.J., Leahy, S.C., Zhang, L. & Morrison, M. (2011).** Exploring rumen methanogen genomes to identify targets for methane mitigation strategies. *Animal Feed Science and Technology*, **166**, 65-75.
- Beauchemin, K.A., Ungerfeld, E.M., Eckard, R.J. & Wang, M. (2020).** Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, **14**(S1), s2-s16.
- Bergman, E.N. (1990).** Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological reviews*, **70**(2), 567-590.
- Bikker, P., Stokvis, L., Van Krimpen, M.M., Van Wikselaar, P.G. & Cone, J.W. (2020).** Evaluation of seaweeds from marine waters in Northwestern Europe for application in animal nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, **263**, 114460
- Brooke, C.G., Roque, B.M., Najafi, N. Gonzalez, M., Pfefferlen, A., DeAnda, V., Ginsburg, D.W., Harden, M.C., Nuzhdin, S.V. & Salwen, J.K. (2018).** Evaluation of the potential of two common pacific coast macroalgae for mitigating methane emissions from ruminants. *bioRxiv.*, 434480
- Caro, D., Kebreab, E. & Mitloehner, F.M. (2016).** Mitigation of enteric methane emissions from global livestock systems through nutrition strategies. *Climatic Change*, **137**(3), 467-480.
- Chen, H., Gan, Q. & Fan, C. (2020).** Methyl-coenzyme M reductase and its post-translational modifications. *Frontiers in Microbiology*, **11**, 578356.
- Dijkstra, J., Bannink, A., France, J., Kebreab, E. & Van Gastelen, S. (2018).** Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *Journal of Dairy Science*, **101**(10), 9041-9047.
- Duin, E.C., Wagner, T., Shima, S., Prakash, D., Cronin, B., Yáñez-Ruiz, D.R. & Kindermann, M. (2016).** Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **113**(22), 6172-6177.
- Eckard, R.J., Grainger, C. & De Klein, C.A.M. (2010).** Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock science*, **130**(1-3), 47-56.
- EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP), Bampidis, V., Azimonti, G., Bastos, M. D. L., Christensen, H., Dusemund, B. & Pizzo, F. (2021).** Safety and efficacy of a feed additive consisting of 3-nitrooxypropanol (Bovaer® 10) for ruminants for milk production and reproduction (DSM Nutritional Products Ltd). *EFSA Journal*, **19**(11), e06905.
- European Commission. (2022).** Daily News 23/02/2022. European Commission - European Commission. [Text]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/mex_22_1304 [2022-03-29]
- Glasson, C.R., Kinley, R.D., de Nys, R., King, N., Adams, S.L., Packer, M.A. & Magnusson, M. (2022).** Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. *Algal Research*, **64**, 102673.
- Henderson, G., Cook, G.M. & Ronimus, R.S. (2016).** Enzyme- and gene-based approaches for developing methanogen-specific compounds to control ruminant methane emissions: a review. *Animal Production Science*, **58**(6), 1017-1026.
- Hristov, A.N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T.W., Harper, M.T., Weeks, H.L. & Duval, S. (2015).** An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**(34), 10663-10668.
- Hristov, A.N., Ott, T., Tricarico, J., Rotz, A., Waghorn, G., Adesogan, A. & Firkins, J.L. (2013).** Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *Journal of Animal Science*, **91**(11), 5095-5113.
- Janssen, P.H. (2010).** Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances

- through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Animal Feed Science and Technology*, **160**(1-2), 1-22.
- Johnson, K.A. & Johnson, D.E. (1995).** Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, **73**(8), 2483-2492.
- Kim, H., Lee, H.G., Baek, Y.C., Lee, S. & Seo, J. (2020).** The effects of dietary supplementation with 3-nitrooxypropanol on enteric methane emissions, rumen fermentation, and production performance in ruminants: a meta-analysis. *Journal of Animal Science and Technology*, **62**(1), 31.
- Kinley, R.D., Martinez-Fernandez, G., Matthews, M.K., de Nys, R., Magnusson, M. & Tomkins, N.W. (2020).** Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, **259**, 120836.
- Leahy, S.C., Kelly, W.J., Ronimus, R.S., Wedlock, N., Altermann, E. & Attwood, G.T. (2013).** Genome sequencing of rumen bacteria and archaea and its application to methane mitigation strategies. *Animal*, **7**(s2), 235-243.
- Li, X., Norman, H.C., Kinley, R.D., Laurence, M., Wilmot, M., Bender, H. & Tomkins, N. (2016).** *Asparagopsis taxiformis* decreases enteric methane production from sheep. *Animal Production Science*, **58**(4), 681-688.
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N.A., de Nys, R. & Tomkins, N. (2014).** Effects of marine and freshwater macroalgae on in vitro total gas and methane production. *PLoS One*, **9**(1), e85289.
- Machado, L., Magnusson, M., Paul, N.A., Kinley, R., de Nys, R. & Tomkins, N. (2016).** Dose-response effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium* sp. on in vitro fermentation and methane production. *Journal of Applied Phycology*, **28**(2), 1443-1452.
- Machado, L., Tomkins, N., Magnusson, M., Midgley, D.J., de Nys, R. & Rosewarne, C.P. (2018).** In vitro response of rumen microbiota to the antimethanogenic red macroalga *Asparagopsis taxiformis*. *Microbial Ecology*, **75**(3), 811-818.
- Makkar, H.P., Tran, G., Heuzé, V., Giger-Reverdin, S., Lessire, M., Lebas, F. & Ankers, P. (2016).** Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, **212**, 1-17.
- Martínez-Fernández, G., Abecia, L., Arco, A., Cantalapiedra-Hijar, G., Martín-García, A. I., Molina-Alcaide, E. & Yáñez-Ruiz, D.R. (2014).** Effects of ethyl-3-nitrooxy propionate and 3-nitrooxypropanol on ruminal fermentation, microbial abundance, and methane emissions in sheep. *Journal of Dairy Science*, **97**(6), 3790-3799.
- Matthews, R.G. (2009).** Cobalamin-and corrinoid-dependent enzymes. *Metal Ions in Life Sciences*, **6**, 53.
- McGinn, S.M., Flesch, T.K., Beauchemin, K.A., Shreck, A. & Kindermann, M. (2019).** Micrometeorological Methods for Measuring Methane Emission Reduction at Beef Cattle Feedlots: Evaluation of 3-Nitrooxypropanol Feed Additive. *Journal of environmental quality*, **48**(5), 1454-1461.
- Melgar, A., Harper, M. T., Oh, J., Giallongo, F., Young, M. E., Ott, T.L. & Hristov, A. N. (2020).** Effects of 3-nitrooxypropanol on rumen fermentation, lactational performance, and resumption of ovarian cyclicity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **103**(1), 410-432.
- Melgar, A., Lage, C.F.A., Nedelkov, K., Räisänen, S.E., Stefanoni, H., Fetter, M.E. & Hristov, A.N. (2021).** Enteric methane emission, milk production, and composition of dairy cows fed 3-nitrooxypropanol. *Journal of Dairy Science*, **104**(1), 357-366.
- Muizelaar, W., Groot, M., van Duinkerken, G., Peters, R. & Dijkstra, J. (2021).** Safety and transfer study: Transfer of bromoform present in *Asparagopsis taxiformis* to milk and urine of lactating dairy cows. *Foods*, **10**(3), 584.
- Patra, A., Park, T., Kim, M. & Yu, Z. (2017).** Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, **8**(1), 1-18.
- Romero-Perez, A., Okine, E.K., McGinn, S. M., Guan, L.L., Oba, M., Duval, S. M. & Beauchemin, K.A. (2014).** The potential of 3-nitrooxypropanol to lower enteric methane emissions from beef cattle. *Journal of animal science*, **92**(10), 4682-4693.
- Roque, B.M., Brooke, C.G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L.J., Najafi, N. & Hess, M. (2019b).** Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome*, **1**(1), 1-14.
- Roque, B.M., Salwen, J.K., Kinley, R. & Kebreab, E. (2019a).** Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *Journal of Cleaner Production*, **234**, 132-138.
- 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), p.e0247820.
- Stefenoni, H.A., Räisänen, S.E., Cueva, S.F., Wasson, D.E., Lage, C.F.A., Melgar, A. & Hristov, A.N. (2021).** Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **104**(4), 4157-4173.
- Terry, S., Krüger, A., Lima, P.D.M.T., Gruninger, R., Abbott, W. & Beauchemin, K. (2022).** Evaluation of Rumen Fermentation and Microbial Adaptation to Three Red Seaweeds Using the Rumen Simulation Technique. DOI: [10.20944/preprints202208.0186.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202208.0186.v1)
- Thauer, R.K., Kaster, A.K., Seedorf, H., Buckel, W. & Hedderich, R. (2008).** Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature Reviews Microbiology*, **6**(8), 579-591.
- Thiel, A., Rübelen, R., Mair, P., Yeman, H. & Beilstein, P. (2019).** 3-NOP: ADME studies in rats and ruminating animals. *Food and Chemical Toxicology*, **125**, 528-539.
- Tseten, T., Sanjorjo, R.A., Kwon, M. & Seon-Won Kim, T.T. (2022).** Strategies to mitigate enteric methane emissions from ruminant animals. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **32**(3), 269-277.
- Van Wesemael, D., Vandaele, L., Ampe, B., Catrysse, H., Duval, S., Kindermann, M. & Peiren, N. (2019).** Reducing enteric methane emissions from dairy cattle: Two ways to supplement 3-nitrooxypropanol. *Journal of Dairy Science*, **102**(2), 1780-1787.
- Villar, M.L., Hegarty, R.S., Nolan, J. V., Godwin, I.R. & McPhee, M. (2020).** The effect of dietary nitrate and canola oil alone or in combination on fermentation, digesta kinetics and methane emissions from cattle. *Animal Feed Science and Technology*, **259**, 114294.
- Vyas, D., Alemu, A.W., McGinn, S.M., Duval, S.M., Kindermann, M. & Beauchemin, K.A. (2018).** The combined effects of supplementing monensin and 3-nitrooxypropanol on methane emissions, growth rate, and feed conversion efficiency in beef cattle fed high-forage and high-grain diets. *Journal of Animal Science*, **96**(7), 2923-2938.
- Vyas, D., McGinn, S. M., Duval, S.M., Kindermann, M. & Beauchemin, K.A. (2016).** Effects of sustained reduction of enteric methane emissions with dietary supplementation of 3-nitrooxypropanol on growth performance of growing and finishing beef cattle. *Journal of Animal Science*, **94**(5), 2024-2034.
- Wood, J.M., Kennedy, F.S. & Wolfe, R.S. (1968).** Reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B12. *Biochemistry*, **7**(5), 1707-1713.
- Yu, G., Beauchemin, K.A. & Dong, R. (2021).** A review of 3-Nitrooxypropanol for enteric methane mitigation from ruminant livestock. *Animals*, **11**(12), 3540.