

https://domesticj.ut.ac.ir/article_107079.html

مقاله علمی - ترویجی

ارزیابی چرخه حیات راهبردهای کاهش متان در تولید گوشت گاو: رویکردی سیستمی به پایداری زیست محیطی

امیرحسین احمدپور سامانی^۱، محمدحسین پاک روح^۱، پریسا عالی^۱ و محمدامین سعادت‌زاده^۱ ^۱ دانشجوی دکتری عمومی دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران<https://doi.org/10.22059/domesticj.2026.394676.1193>

چکیده

تولید گوشت گاو به عنوان یکی از ارکان اصلی دامپروری جهانی، ضمن تأمین نیازهای تغذیه‌ای رو به رشد، به دلیل انتشار متان (CH₄)، گازی با پتانسیل گرمایشی بالا، چالش‌های زیست محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کند که عمدتاً از تخمیر شکمبه‌ای، مدیریت کود دامی و کاربری زمین ناشی می‌شود. این مقاله با بهره‌گیری از ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment: LCA) به عنوان یک روش علمی جامع، راهبردهای کاهش متان در تولید گوشت گاو را از منظر سیستمی بررسی می‌کند که فراتر از رویکردهای سنتی تغذیه‌ای است. هدف از ارائه این مطالعه علمی - ترویجی، ارزیابی اثرات زیست محیطی این راهبردها، شناسایی منابع اصلی متان و پیامدهای آن، و تحلیل تعادل بین کاهش متان و سایر عوامل مانند جذب کربن، مصرف آب و تنوع زیستی است. یافته‌ها نشان می‌دهند که افزودنی‌های خوراکی مانند مشتقات جلبک دریایی می‌توانند متان شکمبه‌ای را تا ۱۵ درصد کاهش دهند، اما LCA جامع، ضرورت توجه به اثرات زنجیره تأمین و تجزیه کود را برجسته می‌کند. راهبردهای یکپارچه نظیر چرای تطبیقی در استرالیا، با جبران متان از طریق ذخیره کربن خاک و کاهش ضایعات غذایی با تأثیر ۱۰ درصد بر ردپای زیست محیطی، پتانسیل بالایی دارند، اما موفقیت آن‌ها به هماهنگی مراحل بالادستی و پایین‌دستی بستگی دارد. این مطالعه همچنین ابعاد اقتصادی و اجتماعی را بررسی کرده و نشان می‌دهد که هزینه‌های اولیه و نقش سیاست‌های تشویقی، پذیرش این راهکارها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکاف‌های پژوهشی موجود شامل محدود بودن مدلهای ارزیابی چرخه حیات، کمبود داده‌های بومی و منطقه‌ای، و همچنین نیاز به نوآوری‌هایی مانند حسگرهای سنجش متان و خوراک‌های زیستی مهندسی شده است. پرداختن به این مسائل مستلزم تحقیقات میان رشته‌ای است تا بتوان تعادلی پایدار میان جنبه‌های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی برقرار کرد. این مطالعه، چارچوبی مبتنی بر شواهد علمی برای بهینه‌سازی تولید پایدار گوشت گاو در مواجهه با چالش‌های اقلیمی و امنیت غذایی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: ارزیابی چرخه حیات، پایداری زیست محیطی، تولید گوشت گاو، کاهش گازهای گلخانه‌ای، متان

*نویسنده مسئول: amirhosseinahmadpoursamani@gmail.com

بخش: تغذیه دام دبیر تخصصی: دکتر پروین شورنگ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

فرانس‌دهی: احمدپور سامانی، ا.ح.، پاک روح، م.ح.، عالی، پ.، سعادت‌زاده، م.ا. ارزیابی چرخه حیات راهبردهای کاهش متان در تولید گوشت گاو: رویکردی سیستمی به پایداری زیست محیطی. علمی - ترویجی (حرفه‌ای) دامستیک، ۱۴۰۴؛ ۲۵(۴): ۱۴-۲۱.



AnimSSAUT

مقدمه

تولید گوشت گاو نقشی اساسی در دامپروری جهانی ایفا می‌کند، زیرا علاوه بر تأمین نیازهای تغذیه‌ای رو به افزایش، تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست دارد، به ویژه از طریق انتشار گاز متان (CH₄). متان، به عنوان یک گاز گلخانه‌ای با پتانسیل گرمایشی بسیار بیشتر از دی‌اکسید کربن، عمدتاً از تخمیر شکمبه‌ای در گاوها منشا می‌گیرد، در حالی که مدیریت کود دامی و استفاده از زمین برای تولید خوراک نیز منابع ثانویه آن محسوب می‌شوند. تشدید سیستم‌های تولید گوشت گاو برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده جهانی، نیاز به راهکارهای مؤثر کاهش انتشار را بیش از پیش برجسته کرده است؛ راهکارهایی که فراتر از اصلاحات تغذیه‌ای سنتی باشند (Beauchemin et al., 2011). یک رویکرد جامع در سطح سیستم، که چرخه کامل حیات تولید گوشت گاو را دربرگیرد، به طور فزاینده‌ای به عنوان روشی ضروری برای مدیریت این انتشارات شناخته می‌شود، چرا که می‌تواند تعاملات در سراسر زنجیره تأمین و پیامدهای زیست محیطی گسترده‌تر آن‌ها را به طور کلی مورد بررسی قرار دهد (Beauchemin et al., 2011; Beauchemin et al., 2010).

ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment: LCA)

روش علمی و دقیق برای سنجش ردپای زیست محیطی تولید گوشت گاو ارائه می‌دهد که از مراحل کشت خوراک و پرورش دام تا فرآوری و مصرف را شامل می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، با استفاده از داده‌های با وضوح بالا و مدل‌سازی‌های پویا، میزان انتشار متان و امکان کاهش آن را در سیستم‌های مختلف تولید بررسی کرده و بینش‌های کلیدی درباره تأثیرات سیستماتیک این فرآیندها ارائه داده است. برای مثال، در حالی که افزودنی‌های خوراکی مانند مشتقات جلبک‌های دریایی توانسته‌اند انتشار متان ناشی از تخمیر شکمبه‌ای را در شرایط کنترل شده تا ۱۵ درصد کاهش دهند، یک ارزیابی جامع چرخه حیات نشان می‌دهد که این راهکار ممکن است پیامدهای دیگری به همراه داشته باشد، مانند افزایش انتشارات مرتبط با زنجیره تأمین خوراک یا تغییر در الگوی تجزیه کود دامی و گازهای حاصل از آن. این دیدگاه سیستمی برای شناسایی راهکارهای مؤثر کاهش انتشار، مانند بهبود روش‌های چرای دام یا کاهش ضایعات، که فراتر از مداخلات در سطح مزرعه هستند و به اثرات بالادستی و پایین‌دستی نیز می‌پردازند، ضروری است (Cusack et al., 2021).

تحقیقات نوظهور، بر کارآمدی راهبردهای یکپارچه که با استفاده از شاخصه‌های چرخه حیات ارزیابی می‌شوند، تأکید دارند. این راهبردها شامل سیستم‌های چرای تطبیقی، ادغام گاوهای شیری در تولید گوشت و استفاده از انرژی کم کربن در

فرآوری است که همگی در کاهش شدت کربنی تولید گوشت گاو مؤثر هستند. به عنوان نمونه، سیستم‌های چرای تناوبی در مناطقی مانند استرالیا نشان داده‌اند که می‌توانند با افزایش ذخیره کربن در خاک، انتشار متان را جبران کرده و همزمان از تخریب اراضی جلوگیری کنند؛ مزیتی که اغلب در تجزیه و تحلیل‌های محدودتر نادیده گرفته می‌شود (Beauchemin et al., 2011). در همین راستا، کاهش ضایعات غذایی در سطح مصرف‌کننده به عنوان یک اهرم قدرتمند برای کاهش اثرات زیست محیطی مطرح شده و بر اساس ارزیابی‌های جهانی اخیر، می‌تواند این تأثیرات را تا ۱۰ درصد در دسته‌بندی‌های مختلف کاهش دهد. این مطالعه علمی- ترویجی، یافته‌های نوین را گردآوری کرده و با ارائه یک چارچوب ارزیابی چرخه حیات در سطح سیستم، راهکارهای کاهش انتشار متان در تولید گوشت گاو را از دیدگاهی مبتنی بر شواهد بررسی می‌کند، به گونه‌ای که پایداری زیست محیطی را با واقعیت‌های متغیر سیستم غذایی متعادل سازد (Beauchemin et al., 2011; Cusack et al., 2021)؛ فخرالدین و همکاران، (۱۹۸۲).

انتشار متان در تولید گوشت گاو: منابع و پیامدها

انتشار متان، یکی از چالش‌های زیست محیطی اساسی در تولید گوشت گاو محسوب می‌شود که عمدتاً از دو منبع اصلی ناشی می‌شود: تخمیر شکمبه‌ای و مدیریت کود دامی. تخمیر شکمبه‌ای، که یک فرآیند طبیعی در دستگاه گوارش نشخوارکنندگان مانند گاو است، متان را به عنوان محصول جانبی تجزیه میکروبی خوراک‌های فیبری در شکمبه تولید می‌کند و براساس برآوردهای جهانی اخیر، تقریباً ۷۰ تا ۸۰ درصد از کل انتشار متان در سیستم‌های تولید گوشت گاو را شامل می‌شود (Dick et al., 2015b). مدیریت کود دامی که به ذخیره‌سازی و تجزیه فضولات گاو مربوط می‌شود، ۱۰ تا ۲۰ درصد دیگر را تشکیل می‌دهد و میزان انتشار آن بسته به عواملی مانند دما، رطوبت و روش‌های مدیریتی (مانند استفاده از تالاب‌های بی‌هوای در مقابل ذخیره‌سازی جامد) متغیر است. تحقیقات پیشرفته بر نقش ترکیب خوراک و ویژگی‌های ژنتیکی دام در کاهش متان تولیدی تأکید داشته و نوآوری‌هایی در زمینه مدیریت کود دامی از جمله استفاده از اصلاحات زیستی مانند افزودن بیوجار، روش‌های جدیدی را برای مهار انتشار این گاز ارائه داده‌اند که اهمیت یک دیدگاه سیستمی را در درک این منابع برجسته می‌کند (Dick et al., 2015b).

سهام تولید گوشت گاو در انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) قابل توجه است و آن را به یکی از بخش‌های پُر انتشار در صنعت غذا تبدیل کرده است. براساس تجزیه و تحلیل‌های اخیر، سیستم‌های تولید گوشت گاو تقریباً ۱۵ تا ۲۰ درصد از انتشار

بی‌هواری می‌توانند انتشار متان را تا ۶۰ درصد کاهش دهند و همزمان بیوگاز، یک منبع انرژی تجدیدپذیر، تولید کنند (Jebari et al., 2025). تحقیقات نوظهور تا اوایل سال ۲۰۲۵ به مهارکننده‌های میکروبی و تغذیه دقیق (Precision Feeding) به عنوان ابزارهای امیدوارکننده برای سرکوب متانوژنز شکمبه اشاره دارد، در حالی که استراتژی‌های یکپارچه کود، مانند کمپوست‌سازی با هوادهی، به دلیل مزایای دوگانه کاهش انتشار و بهبود خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده تغییر به سمت راه‌حل‌های سیستمی است که هر دو منبع اصلی را به طور همزمان هدف قرار می‌دهد (Chin et al., 2024; Jebari et al., 2025).

اهمیت جهانی متان ناشی از گوشت گاو، رویکرد جامع LCA را برای کمی‌سازی تأثیرات آن و هدایت راهبردهای کاهش ضروری می‌سازد. تعامل با سایر آلاینده‌ها، مانند اکسید نیتروژن (N_2O) از کشت خوراک کوددهی‌شده، پروفایل انتشار را پیچیده‌تر می‌کند و هم‌افزایی‌ها ممکن است اثر گرمایشی خالص را ۱۰-۵ درصد افزایش دهند. این مطالعه با تلفیق جدیدترین داده‌ها درباره منابع و تأثیرات، بنیانی برای درک نقش متان در تولید گوشت گاو فراهم می‌کند و زمینه را برای نوآوری‌های سیستمی آماده می‌سازد که تعادل بین الزامات زیست‌محیطی و واقعیت‌های کشاورزی را برقرار کند (Dorca-Preda et al., 2024).

چارچوب ارزیابی چرخه حیات در تولید گوشت گاو

روش‌شناسی ارزیابی چرخه حیات، یک چارچوب نظام‌مند و جامع برای ارزیابی اثرات زیست محیطی تولید گوشت گاو فراهم می‌کند و به ویژه در ارزیابی استراتژی‌های کاهش متان حائز اهمیت است. ارزیابی چرخه حیات با رعایت پروتکل‌های استاندارد مانند ISO ۱۴۰۴۴/۱۴۰۴۰، ورودی‌های منابع، میزان انتشار گازها و پیامدهای زیست‌محیطی را در سراسر زنجیره تولید کمی‌سازی می‌کند. مزیت اصلی این روش، توانایی آن در یکپارچه‌سازی داده‌های متنوع، از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای گرفته تا داده‌های ماهواره‌ای مربوط به تغییرات کاربری زمین است که دیدگاهی جامع از میزان انتشار متان و پتانسیل کاهش آن را ارائه می‌دهد. پیشرفت‌های ارزیابی چرخه حیات شامل مدل‌سازی دینامیک و استفاده از یادگیری ماشین برای افزایش دقت شده است، که به محققان امکان می‌دهد کارایی استراتژی‌های نوظهوری مانند تغذیه دقیق یا شیوه‌های مرتع‌داری با قابلیت جذب کربن را ارزیابی کنند. این رویکرد سیستمی برای عبور از مداخلات تغذیه‌ای تقلیل‌گرایانه ضروری است و امکان بررسی هم‌افزایی‌ها و چالش‌های مرتبط با ردپای زیست‌محیطی خالص تولید گوشت گاو را فراهم می‌کند (Kang et al., 2025).

گازهای گلخانه‌ای انسانی را در سطح جهانی تشکیل می‌دهند که متان به دلیل پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) بالا، سهم قابل توجهی از آن را به خود اختصاص می‌دهد. برخلاف دی‌اکسید کربن (CO_2) که در بخش‌های انرژی بیشترین سهم را در انتشار دارد، متان با عمر کوتاه مدت در جو (حدود ۱۲ سال) و تأثیر گرمایشی قوی، ۲۸ تا ۳۴ برابر CO_2 در یک بازه ۱۰۰ ساله نقش برجسته‌تری در تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. مطالعاتی که از ارزیابی چرخه حیات بهره می‌برند، نشان می‌دهند که شدت انتشار در سیستم‌های مختلف تولید بسیار متغیر است (Beauchemin et al., 2010; Dick et al., 2015b). برای مثال، در سیستم‌های مبتنی بر مرتع، انتشار گازهای گلخانه‌ای معمولاً ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشتر از سیستم‌های صنعتی (مانند پرواربندی در جایگاه‌های بسته) است، زیرا سرعت رشد دام کمتر است و دوره تخمیر شکمبه‌ای طولانی‌تر می‌شود. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تولید گوشت گاو تأثیر قابل توجهی در تشدید تغییرات اقلیمی دارد و به راهبردهای کاهش هدفمند نیازمند است.

اثرات زیست محیطی متان فراتر از نقش آن در گرمایش جهانی است و این گاز در تغییرات شیمیایی جو و آلاینده‌های دیگر نیز نقش دارد. متان، پیش ماده ازن تروپوسفری (O_3) است که یک آلاینده ثانویه محسوب می‌شود و می‌تواند به اکوسیستم‌ها آسیب برساند، عملکرد محصولات زراعی را کاهش دهد و مشکلات تنفسی در انسان ایجاد کند. مدل‌سازی‌های اخیر نشان داده‌اند که متان ناشی از تولید گوشت گاو می‌تواند سطح آزون را در مناطق با انتشار بالا تا ۱۰ درصد افزایش دهد و تأثیرات زیست محیطی غیرمستقیم آن را تشدید کند. علاوه بر این، اثر تشعشعی متان، ذوب یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی را تسریع می‌کند که با آزادسازی کربن ذخیره شده، حلقه‌های بازخوردی ایجاد کرده و تغییرات اقلیمی را تشدید می‌کند (De Vries et al., 2015; Dick et al., 2015b). این اثرات زنجیره‌ای که اغلب در تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر مزرعه نادیده گرفته می‌شوند، ارزش رویکرد LCA را در بررسی کامل اثرات زیست محیطی متان در سیستم‌های تولید گوشت گاو برجسته می‌سازد (Beauchemin et al., 2011).

تخمیر شکمبه‌ای هر چند که از نظر بیولوژیکی اجتناب‌ناپذیر است، شدت آن براساس رژیم غذایی، نژاد دام و شیوه‌های مدیریتی متغیر است و نقاط اهرمی برای کاهش ارائه می‌دهد. رژیم‌های غذایی با فیبر بالا، که در سیستم‌های مبتنی بر علوفه رایج است، معمولاً بازده متان بیشتری به ازای هر واحد انرژی قابل‌هضم نسبت به رژیم‌های مبتنی بر غلات دارند و آزمایش‌های اخیر تفاوت ۲۵-۲۰ درصدی را نشان می‌دهند. در همین حال، انتشار ناشی از مدیریت کود دامی به شرایط ذخیره‌سازی بسیار حساس است؛ برای مثال، سیستم‌های هضم

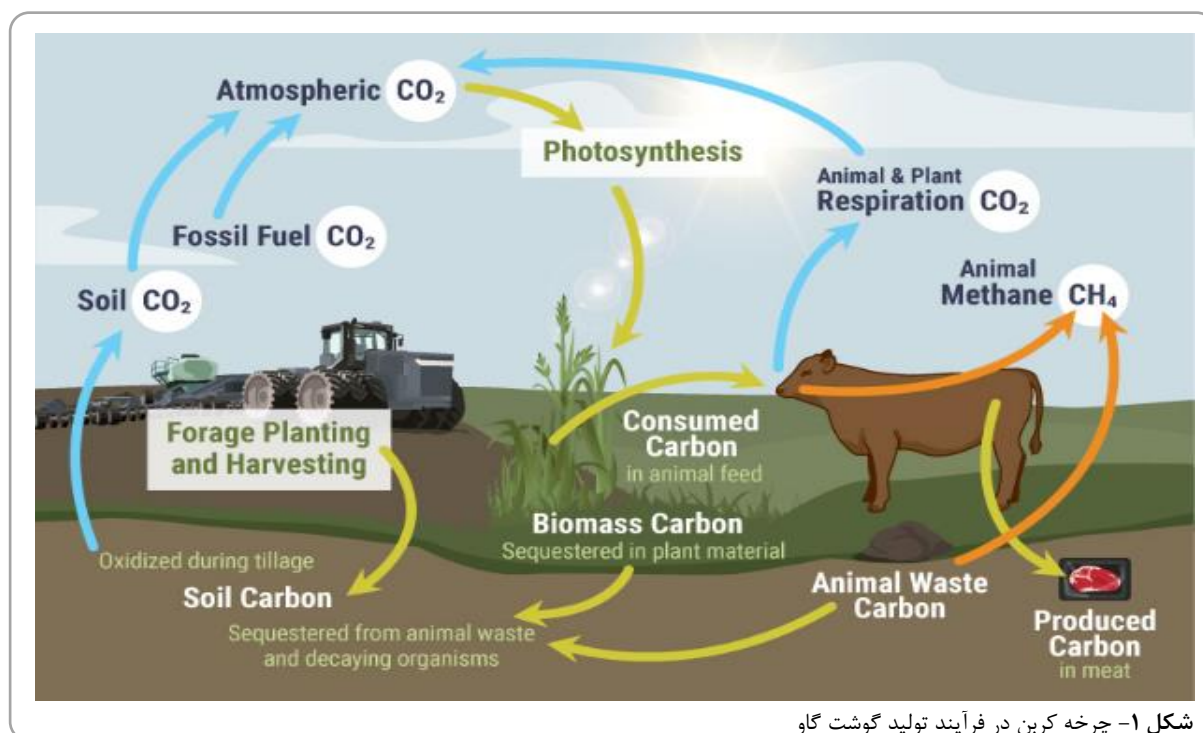
داشته باشد. پویایی‌های زمانی، مانند تغییرات فصلی در کیفیت خوراک یا میزان انتشار متان، اغلب در مدل‌های ارزیابی چرخه حیات ایستا نادیده گرفته می‌شوند، هر چند تلاش‌های اخیر در ادغام داده‌های سری‌زمانی امید بخش بوده است. علاوه بر این، پیچیدگی تخصیص انتشار در سیستم‌های یکپارچه (مانند عملیات ترکیبی گاو شیری و گوشتی) چالش‌های روش‌شناختی ایجاد می‌کند که ممکن است نتایج را تا ۱۵-۱۰ درصد تحت تأثیر قرار دهد (Huerta *et al.*, 2016). این محدودیت‌ها بر ضرورت بهبود مستمر ابزارهای ارزیابی چرخه حیات تأکید می‌کنند تا این روش در سال ۲۰۲۵ همچنان قابل انطباق با پیشرفت‌های علمی حوزه کاهش متان باشد و بتواند اطلاعات لازم را برای تولید پایدار گوشت گاو در مقیاس جهانی فراهم کند.

استراتژی‌های کاهش متان در تولید گوشت گاو

کاهش متان در تولید گوشت گاو به عنوان راهکاری مهم برای کاهش اثرات زیست محیطی این بخش پُر انتشار، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. طیف وسیعی از استراتژی‌های فعلی و نوظهور، منابع کلیدی انتشار متان را در سراسر سیستم تولید هدف قرار داده‌اند. مداخلات تغذیه‌ای همچنان یکی از رویکردهای اساسی محسوب می‌شوند و شامل افزودنی‌هایی مانند ۳-نیتروکسی‌پروپانول (۳-NOP) و جلبک قرمز (*Asparagopsis taxiformis*) هستند که طبق آزمایش‌های کنترل شده، کاهش متان را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد نشان داده‌اند (Pelletier *et al.*, 2010).

مراحل کلیدی تولید گوشت گاو که در چارچوب ارزیابی چرخه حیات گنجانده می‌شوند شامل تولید خوراک، تخمیر شکمبه‌ای، مدیریت کود، فرآوری و حمل و نقل هستند که هر یک به طور منحصر به فردی در انتشار متان و اثرات زیست محیطی کلی نقش دارند. تولید خوراک، که معمولاً پُر مصرف‌ترین مرحله است، شامل استفاده از زمین برای کشت محصولات یا مراتع، کاربرد کودهای شیمیایی و انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) و دی‌اکسید کربن (CO_2) است که به طور غیرمستقیم اثرات آب و هوایی متان را تشدید می‌کند. تخمیر شکمبه‌ای، که منبع اصلی انتشار متان محسوب می‌شود، بسته به نوع جیره غذایی و راندمان حیوان متغیر است، در حالی که میزان انتشار ناشی از مدیریت کود بستگی به روش‌های ذخیره‌سازی و پردازش، مانند هضم بی‌هوازی یا کمپوست، دارد. مراحل پایین‌دستی، شامل فرآوری و حمل و نقل، انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با مصرف انرژی را به دنبال دارند و مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این مراحل در صورت وابستگی به شبکه‌های انرژی فسیلی، بین ۵ تا ۸ درصد از کل ردپای کربنی را تشکیل می‌دهند (Arcila *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

با وجود مزایای فراوان، کاربرد ارزیابی چرخه حیات در سیستم‌های تولید گوشت گاو با چالش‌ها و محدودیت‌هایی روبه‌رو است که اجرای آن را پیچیده می‌سازد. تغییرپذیری داده‌ها در مناطق و روش‌های مختلف تولید -مانند سیستم‌های چرای آزاد در مقابل پروراندی صنعتی- باعث ایجاد عدم قطعیت در نتایج می‌شود، به طوری که ضریب انتشار گازها می‌تواند بسته به اقلیم محلی، شرایط خاک و شیوه‌های مدیریتی تا ۳۰ درصد تفاوت



شکل ۱- چرخه کربن در فرآیند تولید گوشت گاو

نیاز به ارزیابی‌های چرخه حیات متناسب با هر محل دارد (فتاحیان و همکاران، ۲۰۲۰).

مدیریت چرای دام و استراتژی‌های کاربری زمین نیز به عنوان رویکردهایی جامع برای کاهش انتشار متان مورد توجه قرار گرفته‌اند و از خدمات اکوسیستمی برای کاهش میزان انتشار خالص گازهای گلخانه‌ای بهره می‌برند. روش چرای چند پادوک تطبیقی (AMP)، که در کشورهایمانند برزیل و ایالات متحده تحت بررسی قرار دارد، ذخایر کربن آلی خاک (SOC) را افزایش می‌دهد و طبق داده‌های سال ۲۰۲۵، در شرایط بهینه می‌تواند بین ۲۰ تا ۵۰ درصد از متان تولیدی شکمبه را جبران کند. سیستم‌های سیلوپاستورال (ترکیب درختان با مراتع)، این اثر را تقویت کرده و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای را از طریق بهبود کیفیت خوراک و ایجاد مخازن کربن، بین ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهند. اگرچه این استراتژی‌ها در سیستم‌های گسترده عملکرد مطلوبی دارند، اما اثربخشی آن‌ها وابسته به دسترسی به زمین و شدت مدیریت است و ارزیابی‌های چرخه حیات نشان داده‌اند که ممکن است پیامدهایی مانند افزایش مصرف آب یا اثرات بر تنوع زیستی به همراه داشته باشند (فخرالدین و همکاران، ۱۹۸۲). در مجموع، این رویکردهای تغذیه‌ای، ژنتیکی، مبتنی بر مدیریت کود و مرتبط با زمین، ظرفیت کاهش متان را در محدوده ۱۰ تا ۷۰ درصد در شرایط مختلف نشان می‌دهند، اما موفقیت آن‌ها وابسته به بکارگیری یکپارچه و ارزیابی دقیق به منظور تضمین پایداری سیستم در کل زنجیره تولید است.

ابعاد اقتصادی و اجتماعی کاهش متان

از نظر اقتصادی، اجرای استراتژی‌های کاهش متان چالش‌ها و فرصت‌هایی را در سراسر زنجیره تأمین گوشت گاو به همراه دارد. افزودنی‌های خوراکی و برنامه‌های اصلاح‌نژاد ژنتیکی، هر چند مؤثر هستند، اما هزینه‌های اولیه‌ای را به همراه دارند که در بازار جهانی سال ۲۰۲۵، برای افزودنی‌های خوراکی بین ۱۰ تا ۳۰ دلار به ازای هر رأس و برای انتخاب ژنومی بین ۵۰ تا ۱۰۰ دلار به ازای هر دام تخمین زده شده است و این هزینه‌ها می‌توانند بدون ارائه بارانه‌ها، فشار مالی بر دامداران خرد وارد کنند. در مقابل، هضم بی‌هوازی از طریق فروش بیوگاز، بازگشت سرمایه‌ای را ایجاد می‌کند که می‌تواند در عملیات‌های بزرگ مقیاس طی ۳ تا ۵ سال هزینه‌های اولیه را جبران کند، هر چند سرمایه‌گذاری اولیه همچنان مانعی برای تولیدکنندگان کوچک‌تر محسوب می‌شود (Hollas et al., 2024).

از نظر اجتماعی، این استراتژی‌ها بر دامداران تأثیر می‌گذارند، زیرا ممکن است نیازهای نیروی کار را تغییر دهند (مانند نیاز به نظارت بیشتر در مدیریت چرا) و بر مصرف‌کنندگان نیز اثر بگذارند، زیرا ممکن است قیمت گوشت گاو را بین ۵ تا

بهبود کیفیت علوفه از طریق استفاده از عوفه‌ای با قابلیت هضم بالاتر یا ترکیب گیاهان لگومینه، نیز کاهش انتشار متان را تا ۱۵ درصد امکان‌پذیر می‌سازد، زیرا کارایی تخمیر شکمبه‌ای را افزایش داده و میزان تولید متان را کاهش می‌دهد. با این حال، این استراتژی‌های تغذیه‌ای، علی‌رغم تأثیر قابل توجه در سطح دام، باید در چارچوب ارزیابی چرخه حیات بررسی شوند تا اثرات کلی آن‌ها در سطح سیستم، از جمله افزایش احتمالی انتشار گازها در تولید خوراک، مشخص گردد (Dick et al., 2015a; اصفهانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شیری و همکاران، ۲۰۱۸).

برنامه‌های اصلاح‌نژاد و انتخاب ژنتیکی، به عنوان حوزه‌ای نوظهور در کاهش متان، از تنوع طبیعی در میزان انتشار متان در گاوها بهره می‌برند. مطالعات ژنومیکی اخیر، با پیشرفت‌هایی در تکنیک‌های CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) و انتخاب مبتنی بر نشانگرهای ژنتیکی، صفات وراثتی مرتبط با پروفایل‌های میکروبی شکمبه را شناسایی کرده‌اند که می‌توانند میزان تولید متان را بدون کاهش عملکرد دام، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش دهند. پرورش گاوهای کم‌متان، در کشورهایی مانند استرالیا و بریتانیا به مرحله آزمایش رسیده است، نوید کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بلندمدت را با هزینه‌های مداوم کمتر نسبت به مداخلات تغذیه‌ای می‌دهد. با این حال، چرخه تولیدمثل آهسته در گله‌های گوشتی، که معمولاً بین ۵ تا ۷ سال طول می‌کشد، باعث می‌شود که اثرگذاری این راهکار در کوتاه مدت محدود باشد و بر لزوم به کارگیری راهکارهای مکمل در یک رویکرد سیستمی برای دستیابی به اهداف آب و هوایی تأکید کند (Cho et al., 2024; Pelletier et al., 2010).

فناوری‌های مدیریت کود نیز مسیر حیاتی دیگری برای کاهش متان محسوب می‌شوند و انتشار گازهای ناشی از ذخیره‌سازی و تجزیه فضولات دامی را هدف قرار می‌دهند. هضم بی‌هوازی، که به طور گسترده در سیستم‌های پرورش صنعتی به کار گرفته شده، متان را از کود جمع‌آوری کرده و آن را به بیوگاز تبدیل می‌کند، که نه تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای را ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد، بلکه منبعی برای تولید انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌سازد. کمپوست‌سازی، به ویژه زمانی که با هوادهی یا افزودنی‌هایی مانند بیوجار بهبود یابد، می‌تواند میزان متان را تا ۴۰ درصد کاهش داده و از طریق افزایش جذب کربن در خاک، تأثیرات مثبتی بر مراتع داشته باشد. این فناوری‌ها، که تا سال ۲۰۲۵ در پروژه‌های آزمایشی در آمریکای شمالی و اروپا مورد تأیید قرار گرفته‌اند، پتانسیل مدیریت پسماند را در جبران انتشار متان شکمبه‌ای نشان می‌دهند، هر چند اثربخشی آن‌ها بسته به مقیاس، شرایط اقلیمی و زیرساخت‌های موجود متفاوت است و

نیازمند تجزیه و تحلیل اقتصادی است. به طور مشابه، محصولات خوراکی مهندسی شده زیستی با خواص ضدمتانوزنیک یک مسیر کاهش نوین ارائه می‌دهند، اما ردپای اکولوژیکی آن‌ها به ویژه استفاده از آب و زمین، نیازمند بررسی دقیق ارزیابی چرخه حیات است. پیچیدگی این استراتژی‌ها، پژوهش مشارکتی را در زمینه‌های زراعت، علوم زیست محیطی و اقتصاد اجتماعی ضروری می‌سازد تا تعادل بین کاهش متان و تأثیرات بر تنوع زیستی یا اطمینان از دسترسی عادلانه به فناوری‌ها برای تولیدکنندگان کوچک مقیاس ارزیابی شود (Arcila et al., 2024). این رویکرد یکپارچه برای پیشبرد تولید پایدار گوشت گاو در دورانی با چالش‌های فزاینده اقلیمی و امنیت غذایی ضروری است.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه علمی- ترویجی بر اهمیت حیاتی اتخاذ رویکردی سیستم محور در ارزیابی استراتژی‌های کاهش متان در تولید گوشت گاو تأکید دارد و نشان می‌دهد که تأثیرات زیست محیطی این اقدامات فراتر از ملاحظات صرفاً تغذیه‌ای است. با ادغام روش‌شناسی ارزیابی چرخه حیات، این مطالعه به پیچیدگی‌ها، تبادلات و هم‌افزایی‌های مرتبط با تکنیک‌های مختلف کاهش متان، از جمله اصلاحات تغذیه‌ای، انتخاب ژنتیکی و مدیریت کود اشاره می‌کند. نوآوری‌های نوظهور، مانند استفاده از افزودنی‌های خوراکی نظیر ۳- نیتروکسی پروپانول (۳-NOP) و ترکیبات مشتق شده از جلبک دریایی، پتانسیل امیدوارکننده‌ای برای کاهش انتشار متان شکمبه‌ای بدون تأثیر منفی بر بهره‌وری نشان داده‌اند. با این حال، این بررسی همچنین نشان می‌دهد که مزایای زیست محیطی این استراتژی‌ها باید در چارچوب گسترده‌تری مورد ارزیابی قرار گیرند که شامل تأثیرات بر استفاده از زمین، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر زنجیره تأمین می‌شود. علاوه بر این، پذیرش و اجرای این استراتژی‌ها به عواملی مانند امکان‌پذیری اقتصادی، حمایت‌های سیاستی و مشارکت ذینفعان وابسته است. این مطالعه، ضمن پیشبرد درک ما از تولید پایدار گوشت گاو، چارچوبی را برای تحقیقات آینده ارائه می‌دهد تا تلاش‌های کاهش متان بهینه شوند و به اهداف جهانی کاهش تغییرات اقلیمی کمک کرده و امنیت غذایی و تاب‌آوری اقتصادی را حفظ کنند.

منابع

اصفهان، جعفر، س. م.، مهدی، ن.، سعدی، اله، ح.، و دوراندیش. (۲۰۱۸). ارزیابی اثرات زیست محیطی تولید ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L*) در خراسان جنوبی. *بوم‌شناسی کشاورزی*، ۱۱(۱)، ۲۸۱-۲۹۸.

۱۰ درصد افزایش دهند. با این حال، تمایل مصرف‌کنندگان شهری برای پرداخت هزینه بیشتر به منظور خرید گوشت گاو پایدار در حال افزایش است. مشوق‌های سیاستی، مانند اعتبارات کربنی که در اتحادیه اروپا به صورت آزمایشی اجرا شده و معافیت‌های مالیاتی در کانادا، به همراه سازوکارهای بازاری مانند برچسب‌گذاری زیست محیطی، نقشی کلیدی در ترویج این اقدامات ایفا می‌کنند، به طوری که داده‌های اوایل سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهند که در صورت ارائه چارچوب‌های حمایتی قوی، نرخ پذیرش این استراتژی‌ها بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد (Hollas et al., 2024; Makoko et al., 2025).

جهت‌گیری‌های آینده و شکاف‌های پژوهشی

تا تاریخ ۲۰ مارس ۲۰۲۵، کاربرد ارزیابی چرخه حیات در استراتژی‌های کاهش متان در تولید گوشت گاو پیشرفت‌های قابل توجهی را روشن کرده است، با این حال شکاف‌های دانشی حیاتی همچنان باقی مانده‌اند که نیازمند بررسی بیشتر هستند. یکی از شکاف‌های برجسته، وضوح زمانی محدود مدل‌های کنونی ارزیابی چرخه حیات است که اغلب نمی‌توانند تغییرات فصلی در انتشار متان ناشی از تخمیر روده‌ای یا مدیریت کود دامی را در نظر بگیرند، تغییراتی که مطالعات اخیر نشان می‌دهند می‌توانند شدت انتشار را بسته به اقلیم‌ها بین ۱۵ تا ۲۵ درصد تغییر دهند. علاوه بر این، کمبود داده‌های خاص منطقه‌ای، به ویژه از سیستم‌های کوچک مقیاس در جنوب جهانی، تعمیم‌پذیری یافته‌های ارزیابی چرخه حیات را مختل می‌کند، به طوری که عوامل انتشار ممکن است به دلیل تفاوت در کیفیت خوراک و شیوه‌های مدیریتی تا ۳۰-۲۰ درصد ناهماهنگ باشند. فناوری‌های نوظهور، مانند ویرایش میکروبیوم شکمبه از طریق درمان فازی که در محیط آزمایشگاهی کاهش اولیه ۲۰-۱۰ درصدی متان را نشان داده است مرزهای ناشناخته‌ای را نمایان می‌کنند، اما مقیاس‌پذیری و تأثیرات چرخه حیات آن‌ها هنوز به طور کامل کمی‌سازی نشده است، که نیاز به پژوهش گسترده‌تر را برجسته می‌کند (Jebari et al., 2025; Makoko et al., 2025).

جهت‌گیری‌های آینده در این حوزه به ادغام رویکردهای چند رشته‌ای برای پر کردن این شکاف‌ها وابسته است، با بهره‌گیری از نوآوری‌ها در حالی که ابعاد زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی به صورت جامع مورد توجه قرار می‌گیرند. نوآوری‌هایی مانند حسگرهای قابل‌پوشیدن متان برای پایش لحظه‌ای انتشار گاز از گاوها، که تا اوایل سال ۲۰۲۵ در نیوزیلند آزمایش شده‌اند، نوید بهبود دقت ارزیابی چرخه حیات را می‌دهند و احتمالاً عدم قطعیت داده‌ها را تا نصف کاهش می‌دهند، هر چند مقرون به صرفه بودن و نرخ پذیرش آن‌ها توسط کشاورزان

- life cycle assessment." *Sustainable Production and Consumption*, 47, 528–543.
- Hollas, C. E., do Amaral, K. G. C., Lange, M. V., Higarashi, M. M., Steinmetz, R. L. R., Mariani, L. F., Nakano, V., Sanches-Pereira, A., de Martino Jannuzzi, G., and Kunz, A. (2024). "Livestock waste management for energy recovery in Brazil: a life cycle assessment approach." *Environmental Science and Pollution Research*, 31(3), 4705–4720.
- Huerta, A. R., Güereca, L. P., and Lozano, M. d. I. S. R. (2016). "Environmental impact of beef production in Mexico through life cycle assessment." *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 44–53.
- Jebari, A., Takahashi, T., Lee, M. R., Collins, A. L., Coleman, K., Carswell, A., Segura, C., Cardenas, L., and McAuliffe, G. A. (2025). "Carbon footprints of greenhouse gas mitigation measures for a grass-based beef cattle finishing system in the UK." *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–14.
- Kang, H. Y., Hwang, Y. W., Lee, J. H., Cho, S. J., Jeon, Y. S., Kim, N. S., and Kim, J. (2025). "Evaluating the Greenhouse Gas Emissions Footprint of Chicken Meat Production in South Korea: A Life Cycle Perspective." *Food and Bioproducts Processing*.
- Makoko, K. B., Miyake, S., Hinata, T., and Sembokuya, Y. (2025). "Life Cycle Assessment on Changing Dietary Strategies of a Non-grazing Dairy Production System in Hokkaido, Northern Japan." *Japanese Journal of Farm Management*, 62(4), 63–69.
- Pelletier, N., Pirog, R., and Rasmussen, R. (2010). "Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States." *Agricultural Systems*, 103(6), 380–389.
- Zhang, X., Jiang, D., Li, J., Zhao, Q., and Zhang, M. (2024). "Carbon emission oriented life cycle assessment and optimization strategy for meat supply chain." *Journal of Cleaner Production*, 439, 140727.
- شیری، عطایی، زردی، گ.، و فرید. (۲۰۱۸). بررسی چرخه حیات (LCA) نظام تولید ذرت در شرایط آب‌وهوایی مغان. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۶(۱)، ۱۹۱–۲۰۶.
- فتاحیان، آرزو، آ.، ف.، مکتبی، بروجنی، پ.، و باورصاد. (۲۰۲۰). بررسی اثر پوشش خوراکی کیتوزان و اسانس زیره سبز بر ماندگاری گوشت گاو در بسته بندی اتمسفر اصلاح شده. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۱۷(۱۰۴)، ۷۹–۹۱.
- فخرالدین، ا. س.، فاطمه، م.، زهرا، ا.، و رضا، ن. (۱۹۸۲). اثرات صنعت دام (گاو، خوک، طیور) بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای.
- Arcila, S., Correa, N., Pachón, S., Valderrama, L. G. A., and Cano-Londoño, N. A. (2024). "Environmental impacts of extensive beef production in Colombia by life cycle assessment: a case study." *Environmental Science and Pollution Research*, 31(43), 55720–5573.
- Beauchemin, K., Janzen, H., Little, S., McAllister, T., and McGinn, S. (2011). "Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada—Evaluation using farm-based life cycle assessment." *Animal Feed Science and Technology*, 166, 663–677.
- Beauchemin, K. A., Janzen, H. H., Little, S. M., McAllister, T. A., and McGinn, S. M. (2010). "Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: A case study." *Agricultural Systems*, 103(6), 371–379.
- Chin, H. W., Tee, T. P., and Tan, N. P. (2024). "Life cycle assessment of greenhouse gas emissions and carbon mitigation methods in probiotic-fed broiler production." *Animal Production Science*, 64(12).
- Cho, H. H., Strezov, V., and Evans, T. J. (2024). "Life cycle assessment of power-to-methane and renewable methane production technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 206, 114856.
- Cusack, D. F., Kazanski, C. E., Hedgpeth, A., Chow, K., Cordeiro, A. L., Karpman, J., and Ryals, R. (2021). "Reducing climate impacts of beef production: A synthesis of life cycle assessments across management systems and global regions." *Global Change Biology*, 27(9), 1721–1736.
- De Vries, M. d., Van Middelaar, C., and De Boer, I. (2015). "Comparing environmental impacts of beef production systems: A review of life cycle assessments." *Livestock Science*, 178, 279–288.
- Dick, M., Da Silva, M. A., and Dewes, H. (2015a). "Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil." *Journal of Cleaner Production*, 96, 426–434.
- Dick, M., da Silva, M. A., and Dewes, H. (2015b). "Mitigation of environmental impacts of beef cattle production in southern Brazil—Evaluation using farm-based life cycle assessment." *Journal of Cleaner Production*, 87, 58–67.
- Dorca-Preda, T., Olijhoek, D. W., Mogensen, L., Lund, P., and Kristensen, T. (2024). "Climate and environmental effects of nutritional mitigation options to reduce enteric methane in dairy cattle: A

Publisher Note

Animal Science Students Scientific Association, Campus of Agriculture and Natural Resources at the University of Tehran

Submit Your Manuscript:

https://domesticstj.ut.ac.ir/contacts?_action=loginForm


https://domesticj.ut.ac.ir/article_107079.html

Scientific-Extensional Article

Life Cycle Assessment of Methane Mitigation Strategies in Beef Production: A Systems Approach to Environmental Sustainability

Amirhossein Ahmadpour Samani^{1*}, Mohammad Hossein Pakrooh¹, Parisa Aali¹ and Mohammad Amin Saadat Zadeh¹

¹ Doctor of Veterinary Medicine (DVM) Student, Faculty of Veterinary Medicine, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<https://doi.org/10.22059/domesticj.2026.394676.1193>

Abstract

Beef production, a pillar of global livestock systems, provides growing nutritional demands while generating enormous environmental problems through methane (CH₄) emissions; a highly potent greenhouse gas that originates primarily from enteric fermentation, manure management, and feed crop land use. This review employs life cycle assessment (LCA) as an integrated scientific method to evaluate methane mitigation strategies in beef production at the systems level beyond traditional nutritional approaches. The objective is to assess the environmental impacts of these actions, identify significant sources of methane and their consequences, and analyze methane abatement trade-offs against carbon sequestration, water use, and biodiversity. Findings indicate that seaweed extracts as feed additives can reduce enteric methane by up to 15%, but an exhaustive LCA pinpoints the necessity of taking supply chain emissions and manure decomposition pathways into consideration. Integrated solutions, such as Australia's adaptive grazing—offset methane through soil carbon sequestration—and minimizing food waste with a 10% reduction on environmental impact, are promising, though their success rests on coordinating upstream and downstream activities. Economic and social factors are also examined in this research, and it is discovered that initial technology costs and policy incentives play a significant role in adoption. Research gaps include temporal resolution inadequacies in LCA models, data inadequacies at the regional scale, and need for innovations like bioengineered feed and methane sensors, necessitating interdisciplinary research that bridges environment, economic, and societal sustainability. It provides an evidence-based framework for enhancing sustainable beef production during a time of heightened climate change and food security concerns.

Keyword(s): Beef production, Environmental sustainability, Greenhouse gas mitigation, Methane, Life cycle assessment



*Corresponding Author E-mail: amirhosseinahmadpoursamani@gmail.com

Section: Animal Nutrition Associate Editor: Dr. Parvin Shawrang

Received: 21 May 2025 Revised: 25 Aug 2025 Accepted: 02 Sep 2025 Published online: 01 Mar 2026

Citation: Ahmadpour Samani, A., Pakrooh, M. H., Aali, P., Saadat Zadeh, M. A. Life Cycle Assessment of Methane Mitigation Strategies in Beef Production: A Systems Approach to Environmental Sustainability. *Professional Journal of Domestic*, 2026; 25(4): 14-21.