Open Access

Applied Research of Sport Management

Vol. 14(3), (Series 55): 53-68/ 2026

DOI: 10.30473/arsm.2025.75440.3986

E-ISSN: 2345-5551 P-ISSN: 2538-5879

ORIGINAL ARTICLE

Feasibility Study of Bioenergy Production from Waste of Equestrian Centers and Horse Breeding Using Artificial Intelligence-Based Life Cycle Assessment (LCA)

Shahrazad Khoramnejadian[1*], Nasrin Pirayandeh[2]

1. Associate Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, CT. C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Ph.D Candidate, Department of Computer Engineering Software, ST.C. Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Correspondence
Shahrazad Khoramnejadian
E-mail: shkhoramnejad@iau.ir

Receive Date: 18/Aug/ 2025
Accept Date: 30/Sep/2025
Published Online: 24/Dce/2025

How to cite
Khoramnejadian, Sh., & Pirayandeh, N. (2026). Feasibility Study of Bioenergy Production from Waste of Equestrian Centers and Horse Breeding Using Artificial Intelligence-Based Life Cycle Assessment (LCA *Applied Research of Sport Management*, 14(3), 53-68.

EXTENDED A B S T R A C T

Introduction

In recent years, operational costs for sports clubs, especially equestrian centers, have risen due to increased energy prices, waste disposal costs, and environmental regulations. Sustainable resource management and advanced technologies for energy recovery from club-generated waste offer a new competitive advantage in the sports industry. This study proposes a practical model based on field data and Life Cycle Assessment (LCA) to supply part of the energy needs of equestrian centers through recycling horse manure. Previous research integrating life cycle assessment with energy costs and operational consumption shows the importance of combining environmental and economic dimensions, applicable to equestrian waste for sustainable technology choices like direct combustion or anaerobic digestion (Farahani et al., 2021). The rapid growth of horse breeding and equestrian centers in Iran has led to large amounts of organic waste (manure and bedding), which if unmanaged, causes pollution including groundwater contamination and greenhouse gas emissions. Horse manure, rich in organic matter and nutrients, is used in many countries as a renewable energy source via combustion or anaerobic digestion, but a comprehensive scientific approach for Iran is lacking.

Studies highlight pyrolysis and microwave-assisted pyrolysis of horse manure as promising for reducing environmental impacts and enhancing energy production (Mong et al., 2020). Sweden's example shows substantial potential energy recovery from manure biogas, with anaerobic digestion offering multiple environmental benefits (Hansson & Eriksson, 2015). Challenges such as high moisture content and bedding materials influence energy recovery efficiency, but technologies exist to improve this (Liu et al., 2021; Wartel et al., 2012).Research also supports using AI-enhanced LCA models for more accurate environmental and economic assessments of bioenergy systems (Omidkar et al., 2024). Despite

progress, integrating waste conversion technologies with intelligent tools for comprehensive environmental and economic evaluation remains limited. Therefore, this study aims to evaluate the physicochemical properties and energy potential of horse stable waste in Iran using AI-based LCA to assess the efficiency of combustion and anaerobic digestion for bioenergy production, contributing to sustainable waste management and energy recovery in equestrian centers.Other related studies include methane gas estimation from landfills (Ebrahimi Toulon et al., 2023), thermochemical and biochemical conversion processes (Chung et al., 2023), integration of renewable fuels and sustainable practices to reduce carbon footprint in equestrian centers (Phong et al., 2024), and the role of bedding materials on energy recovery (Kusch, 2013; Wartel et al., 2012)

Methodology

This study evaluates energy recovery methods from horse manure waste collected from three equestrian clubs in Tehran. Physical, chemical, and energy content analyses were performed on manure, bedding, and their mixtures. Two energy conversion scenarios-direct combustion and anaerobic digestion-were modeled and assessed using Life Cycle Assessment (LCA) with OpenLCA software, following international standards. Statistical tests examined data characteristics and relationships, while AI techniques like machine learning and decision trees enhanced pollutant classification, environmental prediction, and scenario comparison. The study aimed to identify cost-effective, low-carbon pathways for energy production. The LCA compared environmental impacts per megajoule of energy produced, supporting informed decisions in sustainable waste management and bioenergy production.

Findings

The examined horse manure has high organic carbon content and a high carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, making it suitable for anaerobic digestion and biogas production. Although it contains a relatively high ash content which negatively affects combustion efficiency, its heating value is high and acceptable. Anaerobic digestion results in lower greenhouse gas emissions, reduced acidification potential, and more efficient resource use compared to direct combustion, but it produces more wastewater. Direct combustion is simpler and less costly but faces challenges such as ash management. SWOT analysis indicates that horse manure has good potential for sustainable energy supply in equestrian centers, though challenges like ash and effluent management remain. The findings align with global studies and can contribute effectively to renewable energy development and environmental management in sports facilities.

Discussion and Conclusion

The results of this study indicate that waste from equestrian centers, especially the combination of horse manure and bedding, possesses significant potential for sustainable management and bioenergy production due to favorable physical and chemical characteristics such as high organic matter content, an optimal carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, and a suitable lower heating value (LHV). Anaerobic digestion is environmentally superior to direct combustion because it substantially

reduces greenhouse gas emissions and produces high-quality organic fertilizer. However, direct combustion, with its lower investment cost and simpler technology, can serve as a temporary and feasible solution in facilities lacking advanced infrastructure. Beyond technical and environmental benefits, the findings offer practical management implications for equestrian clubs, where managers can utilize renewable energy technologies and green economy principles to reduce operating costs while enhancing environmental responsibility. The study recommends that policies related to sports and environment prioritize the use of animal waste as energy resources and promote the development of green clubs as innovative and effective approaches to managing sports centers sustainably.

K E Y W O R D S
Calorific Value, Clean Energy, Artificial Intelligence, Sustainable Sports Complex, Environment.

Copyright ش2026 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

https://arsmb.journals.pnu.ac.ir/

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فصلنامه

پژوهش‌های کاربردی در مدیریت ورزشی

سال چهاردهم، شماره سوم، پیاپی پنجاه و پنجم، زمستان ۱۴۰۴ (۶۸-۵۳)

DOI: 10.30473/arsm.2025.75440.3986

E-ISSN: 2345-5551 P-ISSN: 2538-5879

«مقاله پژوهشی»

امکان‌سنجی تولید انرژی زیستی از پسماند مجموعه های سوارکاری و پرورش اسب با استفاده از تحلیل چرخه حیات (LCA) مبتنی بر هوش مصنوعی

شهرزاد خرم‌نژادیان[1*]، نسرین پیرایندە[2]

۱. دانشیار، گروه علمی عمران و محیطزیست، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی کامپیوتر- نرم‌افزار، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

***نویسنده مسئول:** شهرزاد خرم‌نژادیان

رایانامه: shkhoramnejad@iau.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

استناد به این مقاله:

خرم‌نژادیان، شهرزاد و پیرایندە، نسرین (۱۴۰۴). امکان‌سنجی تولید انرژی زیستی از پسماند مجموعه های سوارکاری و پرورش اسب با استفاده از تحلیل چرخه حیات (LCA) مبتنی بر هوش مصنوعی. *فصلنامه علمی پژوهش‌های کاربردی در مدیریت ورزشی*، ۱۴(۳)، ۶۸-۵۳.

چکیده

با توجه به افزایش هزینه‌های انرژی و دغدغه‌های زیست‌محیطی در اداره مراکز ورزشی، استفاده از روش‌های نوآورانه برای کاهش پسماند و بهینه‌سازی مصرف منابع به یک ضرورت غیرقابل اجتناب تبدیل شده است. این مطالعه با هدف بررسی امکان‌سنجی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی تولید انرژی زیستی از پسماندهای مراکز سوارکاری (شامل کود و بستر اسب) انجام شده است تا به‌عنوان یک الگوی پایدار برای مدیریت باشگاه‌های ورزشی در ایران مطرح گردد. داده‌های میدانی از سه باشگاه سوارکاری در استان تهران جمع‌آوری شده و آزمایش‌های شیمیایی، تعیین ارزش حرارتی و قابلیت تولید بیوگاز روی نمونه‌ها انجام گرفت. همچنین، با بهره‌گیری از مدل‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی و نرم‌افزار OpenLCA به همراه پایگاه داده Ecoinvent 3.8، تحلیل چرخه حیات دو سناریوی احتراق و هضم بی‌هوازی انجام شد. الگوریتم‌های هوش مصنوعی به بهبود دقت شبیه‌سازی، دسته‌بندی داده‌ها و بهینه‌سازی ارزیابی اثرات زیست‌محیطی کمک شایانی کردند.یافته‌ها نشان داد که کود اسب با ارزش حرارتی ۱۹/۸۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم و نسبت کربن به نیتروژن ۲۳/۱، شرایط مناسبی برای تولید انرژی زیستی دارد. در تحلیل چرخه حیات، هضم بی‌هوازی نسبت به احتراق مستقیم، عملکرد بهتری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (۳۸٪ کاهش) و مصرف منابع (۲۹٪ کاهش) از خود نشان داد. از منظر مدیریت ورزشی، اجرای این فناوری‌ها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده، مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی باشگاه را ارتقا دهد، به توسعه برند سبز کمک کند و مسیر باشگاه‌ها را به سمت پایداری هموار سازد.

واژه‌های کلیدی

ارزش حرارتی، انرژی پاک، هوش مصنوعی، مجموعه ورزشی پایدار، محیطزیست.

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. © ۱۴۰۴ ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

در سال‌های اخیر، هزینه‌های عملیاتی باشگاه‌های ورزشی، به‌ویژه مراکز سوارکاری، به دلیل افزایش بهای انرژی، هزینه دفع پسماند و محدودیت‌های زیست‌محیطی، روندی افزایشی داشته است. در این شرایط، مدیریت پایدار منابع و استفاده از فناوری‌های نوین برای بازیافت انرژی از پسماندهای تولیدشده در باشگاه‌ها، به‌عنوان یک مزیت رقابتی جدید در صنعت ورزش مطرح می‌شود. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و روش تحلیل چرخه حیات (LCA)، الگویی اجرایی برای مراکز سوارکاری ارائه می‌دهد که می‌تواند بخشی از انرژی مصرفی این مراکز را از طریق بازیافت پسماند اسب‌ها تأمین کند.

فراهانی و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله با عنوان «رویکرد چرخه عمر سرویس در برنامه‌ریزی نگهداری و بهسازی انرژی برای مجموعه‌های ساختمان‌ها» چارچوبی را برای ادغام ارزیابی چرخه عمر زیستی با تحلیل آماری مصرف انرژی عملیاتی و مدل‌های هزینه‌ای ارائه می‌دهد. این رویکرد یکپارچه به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های محیطزیستی و اقتصادی اهمیت دارد، چراکه به‌صورت هم‌زمان ابعاد زیست‌محیطی و عملکرد انرژی را مدنظر قرار می‌دهد اگرچه حوزه کاربرد این مطالعه ساختمانی است، روش‌شناسی جامع آن‌ت شامل داده‌محوری در تحلیل LCA، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی و اتخاذ تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ت می‌تواند مستقیماً به تحلیل چرخه عمر پسماندهای مراکز سوارکاری و پرورش اسب انتقال یابد. این شیوه ترکیبی می‌تواند زیربنایی برای توسعه مدل-AI محور در محیط OpenLCA فراهم کرده و نقشی اساسی در پشتیبانی از انتخاب فناوری‌های پایدار، مانند احتراق مستقیم یا هضم بی‌هوازی، ایفا کند.

اسدیان اردکانی و عزیزی (۲۰۲۵)، در مقاله‌ای تحت عنوان «ادراک ساکنان از رویداد ورزشی مسابقات زیبایی اسب»، ساکنان اشکذر معتقدند که رویدادهای ورزشی می‌توانند فرصت‌های اقتصادی و گردشگری را افزایش دهند؛ با این حال، ارزش‌ها و سنت‌های فرهنگی محلی و تفریحات خانوادگی در عملکرد رویدادها کم‌تر دیده شده‌اند؛ این نکته نشان‌دهنده آن است که مدیریت ورزشی باید مراقب باشد که منافع اقتصادی را همراه با حفظ فرهنگ و رفاه جامعه محلی پیاده کند.

در دهه گذشته، فعالیت‌های مرتبط با پرورش اسب و توسعه مراکز سوارکاری در ایران رشد چشمگیری داشته و این مراکز به‌عنوان نهادهای ورزشی، تفریحی و اقتصادی در بسیاری از استان‌ها گسترش یافته‌اند. یکی از پیامدهای این توسعه، تولید مستمر پسماندهای آلی مانند کود و بستر مصرف شده است که در صورت مدیریت نامناسب، می‌تواند منجر به آلودگی محیطزیست، از جمله آلودگی آب‌های زیرزمینی، انتشار بو و گازهای گلخانه‌ای شود. کود اسب که ترکیبی از مدفوع، ادرار و مواد بستر (مانند کاه یا خاکاره) است، دارای مقادیر قابل‌توجهی مواد آلی، نیتروژن، فسفر و کربن می‌باشد. این ویژگی‌ها موجب شده در بسیاری از کشورها، از کود اسب به‌عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر از طریق فرآیندهایی مانند احتراق مستقیم و هضم بی‌هوازی بهره‌برداری شود. با این حال، تاکنون در ایران رویکردی جامع و علمی برای استفاده از این پسماندها به‌منظور تولید انرژی ارائه نشده است. پژوهش حاضر راهکاری عملی برای استفاده از این ظرفیت بالقوه در مراکز سوارکاری کشور پیشنهاد می‌کند.

مونگ و همکاران (۲۰۲۰)، در مقاله‌ای با عنوان «مطالعه بهینه‌سازی چند متغیره و ارزیابی چرخه حیات پیرولیز القایی مایکروویو در مورد کود اسب برای ارزش‌گذاری و مدیریت پسماندها: رویکردی براساس چرخه عمر خدمات برای برنامه‌ریزی نگهداری و نوسازی انرژی در پرتفوی ساختمان‌ها» یکی از مطالعات پایه‌ای در حوزه مدیریت پسماند اسب و تبدیل آن به انرژی با استفاده از روش‌های پیشرفته انرژی زیستی، مربوط به بررسی پیرولیز میکروویو کود اسب است. در این پژوهش،

تحلیل چرخه زندگی (LCA) به همراه بهینه‌سازی چندمتغیره، نشان داد که این روش می‌تواند پتانسیل قابل‌توجهی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش تولید انرژی داشته باشد یافته‌ها حاکی از آن است که تکنیک‌های پیرولیز می‌توانند آلاینده‌های زیستی را کاهش داده و بازده انرژی کل را افزایش دهند. این کار، مبنای مناسبی برای ادامه تحقیقات در حوزه تولید انرژی زیستی از پسماند مراکز اسب‌داری فراهم می‌آورد و مسیر علمی و نوآورانه‌ای را در چارچوب LCA و فناوری‌های نوین مانند AI و تحلیل داده‌بنیان باز می‌کند.

طبق مطالعات هنسی و اریکسون (۲۰۱۵)، کود اسب ظرفیت قابل‌توجهی برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. با در نظر گرفتن اینکه حدود ۳۶۰/۰۰۰ اسب در سوئد سالانه حدود ۱/۴ میلیون تن کود تولید می‌کنند، این مقدار فضولات می‌تواند تا ۶۴۱ گیگاوات ساعت بیوگاز تولید نماید، که تقریباً معادل نیمی از کل بیوگاز تولید شده در سوئد در سال ۲۰۱۰ است. هضم بی‌هوازی کود اسب فواید زیست‌محیطی متعددی دارد که شامل کاهش گازهای گلخانه‌ای، تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر و همچنین بازیابی مواد مغذی می‌شود.

مونگ و همکاران (۲۰۲۰)، روش‌های دیگر برای ارزش‌افزایی این پسماند شامل پیرولیز با استفاده از مایکروویو است که قادر به تولید گاز سنتز، بیوچار و ترکیبات شیمیایی باارزش می‌باشد.

لیو و همکاران (۲۰۲۱)، بیان کردند که برخلاف باور رایج در صنعت، احتراق مستقیم کود اسب بدون نیاز به سوخت کمکی امکان‌پذیر است، هرچند رطوبت بالای آن (۶۰٪ وزنی) یک چالش محسوب می‌شود. کاهش رطوبت، با کاهش ۲۳ درصدی مقدار انرژی موجود، به‌طور چشمگیری واکنش‌پذیری سوخت را افزایش می‌دهد.

ظرفیت تولید متان از کود اسب بین ۶۸ تا ۲۷۳ میلی‌لیتر به ازای هر گرم مواد جامد فرار متغیر است، که معادل تولید انرژی در بازه ۳,۱۱ تا ۸,۴۵ × ۱۰^۵ کیلوژول به ازای هر تن وزن‌تر است (وارتل و همکاران، ۲۰۱۲). سوئد به‌تنهایی قادر است سالانه تا ۶۴۱ گیگاوات ساعت بیوگاز از کود اسب تولید کند (هنسی و اریکسون، ۲۰۱۵).

ابراهیمی تولون و همکاران (۲۰۲۳)، در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار LandGEM میزان گاز متان تولیدی در محل دفن زباله رباط‌کریم نشان دادند که حجم قابل‌توجهی گاز متان از تجزیه بی‌هوازی زباله‌های شهری در این منطقه تولید می‌شود و روند تولید گازهای دفن زباله مطابق با الگوی استاندارد جهانی است. براساس نتایج، علاوه‌بر حجم بالای گاز متان، امکان بهره‌برداری از این گاز برای تولید برق وجود دارد. در نهایت، استفاده از گاز متان به‌عنوان منبع انرژی و اتخاذ تدابیر لازم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان راهکارهای پیشنهادی برای مدیریت پایدار پسماند در این منطقه مطرح شده است.

وجود مواد مختلف در بستر اسب‌ها می‌تواند بر فرایند بازیابی انرژی تأثیرگذار باشد. بستر چوب نرم، هرچند که به‌سختی قابل تجزیه است، اما مانع تولید متان از کود نمی‌گردد (وارتل و همکاران، ۲۰۱۲).

در مقاله کوش (۲۰۱۳)، عنوان شد که مدیریت و تصفیه مناسب کود اسب می‌تواند به مزایای زیست‌محیطی چشمگیری مانند کاهش اتروفیکاسیون و کاهش مصرف منابع محدود منجر شود.

با این حال، نبود مطالعات داخلی جامع درباره ارزیابی دقیق ترکیب شیمیایی و ارزش حرارتی کود اسب، مانعی در توسعه مدل‌های بومی برای تولید انرژی از این منبع زیستی به شمار می‌رود. بنابراین، این تحقیق با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و پتانسیل انرژی‌زایی پسماند اسب در مراکز سوارکاری ایران انجام شده و با استفاده از تحلیل چرخه حیات (LCA)، کارایی زیست‌محیطی دو روش رایج تولید انرژی یعنی احتراق و هضم بی‌هوازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مقاله چونگ و همکاران (۲۰۲۳)، با عنوان «ارزش‌گذاری پایدار کودهای حیوانی از طریق فناوری‌های تبدیلی ترمودینامیکی: مروری جامع بر روندهای اخیر» که یکی از مطالعات معاصر در زمینهٔ ارزش‌افزوده پسماند اسبی، بررسی روش‌های ترموشیمیایی و بیوشیمیایی برای تبدیل کود اسب به انرژی است. در مروری جامع، تکنیک‌های گازی‌سازی و پیرولیز را به‌عنوان راه‌حل‌های امیدوارکننده در مدیریت

این زیست‌پسماند معرفی کرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که بهره‌گیری از پیرولیز حرارتی همراه با گازی‌سازی می‌تواند علاوه‌بر افزایش تولید انرژی، اثرات زیست‌محیطی منفی ناشی از انباشت یا پخش نابجا را کاهش دهد. این مطالعه نشان‌دهنده کاربرد علمی LCA برای سنجش کارآمدی روش‌های مختلف تبدیل پسماند اسب به انرژی است و زمینه‌ای مناسب برای تعمیق تحقیق شما در استفاده از تحلیل چرخه حیات برای سناریوهای مختلف تبدیل انرژی فراهم می‌کند.

در مقاله فونگ و همکاران (۲۰۲۴)، با عنوان «یکپارچه‌سازی سوخت‌های تجدیدپذیر و رویه‌های پایدار در مراکز اسب‌دوستی: الگویی برای کاهش اثر کربن و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی» در یک مورد کاربردی، مطالعه‌ای صورت گرفته در یک مرکز سوارکاری که تولید برق را از طریق هضم بی‌هوازی کود اسب همراه با نصب پنل‌های خورشیدی بررسی کرده است. این تحقیق نشان داد که تولید بیوگاز از کود اسب می‌تواند حدود ۲۲/۳۷۵ مترمکعب متان تولید کند که معادل تقریباً ۸۵/۴۹۵ کیلووات ساعت برق است. همچنین با ادغام سیستم‌های خورشیدی و کاشت درختان برای جبران کربن، حدود ۷۷٪ از انتشار سالانه دی‌اکسید کربن مرکز جبران شد .این مثال کاربردی، نقش عمده فناوری‌های ترکیبی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و ترویج توسعه پایدار در مراکز سوارکاری را به‌خوبی نشان می‌دهد و مبنای قوی جهت معرفی پژوهش پیشرو در مقدمه محسوب می‌شود

در مقاله امید کار و همکاران (۲۰۲۴)، با عنوان «ارزیابی فنی-اقتصادی و چرخه عمر با کمک یادگیری ماشین از فرآیند بهبود پسماند جامد آلی تحت تأثیر گاز طبیعی» برای ارتقای دقت مدل‌های تحلیل چرخه حیات (LCA)، از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین استفاده شده است. مشابه مذکور، مدل‌های مصنوعی شبکه عصبی (ANN) برای پیش‌بینی بازده‌های زیست‌انرژی و شاخص‌هایی مانند GHG به کار گرفته شدند که با داده‌های آزمون موفق به دستیابی به R۲≈۰/۸ شدند. در گام نخست، پارامترهایی مانند نسبت C/N، رطوبت و LHV به‌مثابه ورودی به مدل داده شدند و عملکرد ANN با روش‌های نظیر نیمه خودتنظیم[1] بهینه شد، که همانند یافته‌های این پژوهش، باعث دقت بالاتر در برآورد نتایج LCA شد.

در مقاله شیخ یوسفی و همکاران (۲۰۲۴)، با عنوان «طراحی مدل کاربست فناوری‌های نوین در توسعه ورزش همگانی ایران»، مدل کاربست فناوری‌های نوین در توسعه ورزش همگانی ایران را با روش نظریه داده‌بنیاد طراحی کرده‌اند. نتایج آن تحقیق نشان داده است که علاوه‌بر عوامل زیرساختی و فرهنگی، مؤلفه‌های مدیریتی، راهبردهایی مانند آموزش مدیران، فرهنگ‌سازی و امکانات مالی نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق بهره‌گیری از فناوری نوین دارند. پیامدهای این مدل، هم شامل توسعه ورزشی و دانشی، هم توسعه اقتصادی و بین‌المللی است.

با توجه به شرح پیشینه اشاره شده و با اذعان به اینکه در تحقیقات صورت گرفته، اغلب به بررسی جداگانه فناوری‌های تبدیل پسماند یا تحلیل‌های زیست‌محیطی پرداخته شده است و تلفیق آن‌ها با ابزارهای هوشمند کمتر مورد توجه قرار گرفته، این مقاله درصدد امکان‌سنجی تولید انرژی زیستی از پسماند مجموعه‌های سوارکاری و پرورش اسب با استفاده از تحلیل چرخه حیات (LCA)مبتنی بر هوش مصنوعی است.

روش‌شناسی پژوهش

در این پوهش کاربردی-توسعه‌ای، ارزیابی متدهای مختلف تولید انرژی از پسماند اسب با رویکرد آزمایشگاهی، پیمایشی و مدل‌سازی زیست‌محیطی صورت گرفته است. جامعه آماری شامل سه باشگاه بزرگ سوارکاری در تهران بوده که نمونه‌هایی از کود تازه اسب، بستر مصرف‌شده و ترکیب این دو به صورت تصادفی جمع‌آوری و به آزمایشگاه انتقال داده شدند. آنالیزهای فیزیکی (مانند رطوبت، مواد خشک، خاکستر)، شیمیایی (کربن آلی کل، نیتروژن کل به روش کجلدال، فسفر و پتاسیم با دستگاه جذب اتمی، pH و هدایت الکتریکی) و انرژی (ارزش حرارتی پایین با معادله دولانگ) روی نمونه‌ها انجام گرفت. سپس سناریوهای

1. Semi-Auto Tuning

تبدیل انرژی شامل احتراق مستقیم و هضم بی‌هوازی طراحی شده و تحلیل چرخه حیات هر دو روش با استفاده از نرم‌افزار OpenLCA صورت پذیرفت. همچنین با بهره‌گیری از روشSWOT، راهبردهای استفاده از این پسماند در ایران مورد بررسی قرار گرفت.

در این مطالعه، برای توصیف داده‌ها از آمار توصیفی شامل میانگین و انحراف معیار استفاده شد و نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی گردید. جهت مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با استانداردهای مرجع یا مقایسه بین مراکز مختلف، آزمون tتک‌نمونه‌ای یا t مستقل به کار گرفته شد. همچنین، برای بررسی رابطه و همبستگی بین متغیرها مانند نسبت کربن به نیتروژن (C/N) و ارزش حرارتی، آزمون ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. تمامی تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد و سطح معناداری ۰/۰۵ به‌عنوان معیار تعیین اهمیت نتایج در نظر گرفته شد.

در این مطالعه از نرم‌افزار تخصصی OpenLCA نسخه ۱/۱۳. ۳ استفاده شد که توسط شرکت GreenDelta GmbH آلمان توسعه‌یافته و مطابق با استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044برای مدل‌سازی و ارزیابی سناریوهای زیست‌محیطی طراحی شده است. علاوه‌بر روش‌های سنتی تحلیل داده‌ها، فناوری‌های هوش مصنوعی مانند یادگیری ماشینی برای خوشه‌بندی آلاینده‌ها، پیش‌بینی شاخص‌های زیست‌محیطی و مقایسه چندسناریویی به کار رفتند تا مسیرهای کم‌هزینه‌تر و کم‌کربن‌تر تولید انرژی تعیین شوند. همچنین، با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی و درخت تصمیم‌گیری در محیط‌های Python و RapidMiner، تحلیل‌هایی مانند پیش‌بینی نسبت بهینه کربن به نیتروژن (C/N) و دسته‌بندی ترکیب سوخت مناسب انجام شد که به افزایش دقت و تسریع ارزیابی‌ها کمک کرد. تحلیل چرخه حیات (LCA) دو سناریوی تولید انرژی از پسماند اسب- احتراق مستقیم و هضم بی‌هوازی- با بهره‌گیری از پایگاه داده Ecoinvent نسخه ۳/۸ و روش IMPACT 2002+ انجام گرفت. واحد عملکرد تحلیل، تولید یک مگاژول انرژی حرارتی یا الکتریکی تعریف شد تا مقایسه‌ای دقیق میان این دو روش فراهم گردد. این رویکرد جامع امکان بررسی کامل تأثیرات زیست‌محیطی هر سناریو در تمام مراحل چرخه حیات را میسر ساخته و به اتخاذ تصمیمات بهینه در مدیریت پسماند و تولید انرژی کمک می‌کند.

یافته‌های پژوهش

جدول ۱، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند اسب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند اسب

پارامتر	واحد	میانگین ± انحراف معیار
رطوبت	%	64.5 ± 2.1
ماده خشک(TS)	%	35.5 ± 1.8
خاکستر	%	24.3 ± 1.2
کربن آلی کل (TOC)	%	34.8 ± 1.9
نیتروژن کل(TN)	%	1.9 ± 0.3
نسبت (C/N)	-	23.1 ± 2.4
فسفر (P)	mg/kg	182.4 ± 14.6
پتاسیم (K)	mg/kg	1125 ± 110

جدول ۲، پارامترهای محاسبه ارزش حرارتی پایین بر طبق معادله دولانگ را بیان می‌کند.

جدول ۲. پارامترهای محاسبه ارزش حرارتی پایین)LHV(

پارامتر	روش اندازه‌گیری	درصد وزنی(%)
کربن (C)	آنالیز CHNS	۳۴/۸
هیدروژن (H)	آنالیز CHNS	۴/۳
اکسیژن (O)	محاسبه اختلافی	۳۰/۲
نیتروژن (N)	کجلدال	۱/۹
گوگرد (S)	طیف‌سنجی جذب اتمی	۰/۳
ارزش حرارتی پایین (LHV)	محاسبه با معادله نگ	kJ/kg۱۹/۸۰۰
پارامتر	روش اندازه‌گیری	درصد وزنی(%)
کربن (C)	آنالیز CHNS	43/8

در جدول ۳، پارامترهایی که در مدل‌سازی تحلیل چرخه حیات در نرم‌افزار OpenLCA وارد شده‌اند را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی دو سناریو در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. پارامترهای مدل‌سازی در تحلیل چرخه حیات

پارامتر	مقدار / مشخصات
نرم‌افزار	OpenLCA 1.10.3
پایگاه داده	Ecoinvent 3.8
روش ارزیابی اثرات	IMPACT 2002+
واحد عملکرد	1 MJ انرژی حرارتی یا الکتریکی
مرز سیستم	از گهواره تا دروازه(Cradle-to-Gate)
سناریوها	احتراق مستقیم / هضم بی‌هوازی

جدول ۴، نتایج مقایسه‌ای اثرات زیست‌محیطی براساس LCA را برای دو سناریو هضم بی‌هوازی و احتراق مستقیم را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نتایج مقایسه‌ای اثرات زیست‌محیطی براساس LCA

شاخص زیست‌محیطی	هضم بی‌هوازی	احتراق مستقیم
انتشار گازهای گلخانه‌ای (kg CO eq)	0/070	0/324
پتانسیل اسیدی شدن (kg SO eq)	0/008	0/030
آلودگی آب (kg NO eq)	0/000	0/003
مصرف منابع (MJ) اولیه	0/34	3/43
تأثیر بر سلامت انسانی (امتیاز نرمال‌شده)	کم	متوسط

جدول ۵، تحلیل SWOT استفاده از پسماند اسب برای تولید انرژی زیستی در باشگاه‌های سوارکاری را ارائه می‌دهد.

جدول ۵. تحلیل SWOT استفاده از پسماند اسب برای تولید انرژی زیستی در باشگاه‌های سوارکاری

نقاط قوت	نقاط ضعف
○ نسبت C/N مناسب و ترکیب مغذی کود اسب ○ محتوای بالای ماده آلی و نسبت C/N مناسب برای تولید بیوگاز یا احتراق ○ عدم وجود پاتوژن‌های انسانی خطرناک ○ قابل استفاده به‌عنوان کود ○ وجود بستر چوبی (خاک‌اره، کاه) که بازده احتراق را افزایش می‌دهد.	○ میزان بالای خاکستر (۲۴/۳٪) که بهره‌وری احتراق را کاهش می‌دهد. ○ هزینه نسبی بالای احداث تجهیزات ○ نیاز به آموزش نیروهای انسانی برای بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی زیستی
فرصت‌ها	**تهدیدها**
○ گسترش مجموعه‌های سوارکاری در کشور ○ ایجاد تصویر مثبت و برندینگ باشگاه به‌عنوان یک باشگاه سبز ○ کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انرژی برق شهری ○ جذابیت برای سرمایه‌گذاران	○ نبود حمایت برای پروژه‌های کوچک ○ عدم علاقه مجموعه‌داران به فناوری‌های نوین ○ عدم راهبری صحیح ○ مشکلات زیست‌محیطی احتمالی در ○ صورت مدیریت نامناسب پساب

جدول ۱، نتایج آزمایش‌های پسماند مراکز مورد بررسی را نشان می‌دهد که محتوای کل ماده آلی [3]در آن برابر با ۳۴/۸ درصد به دست آمده است؛ این مقدار نسبت به کود گاوی (۲۵ تا ۳۰ درصد)؛ بالاتر بوده (ویلاند، ۲۰۲۳) و ناشی از حضور بسترهای چوبی مانند خاک‌اره و کاه در ترکیب کود اسب است که منجر به افزایش کربن آلی و ارزش حرارتی پایین (LHV) می‌شود. نسبت کربن به نیتروژن (C/N) نیز معادل ۲۳/۱ بوده که در محدوده بهینه برای هضم بی‌هوازی قرار دارد و نسبت به کود گاوی (۱۷ تا ۲۰) و ضایعات غذایی (۱۵ تا ۱۸) بیشتر است (چروبینی و همکاران[2]، ۲۰۰۹ و ماستومورا و همکاران[3]،۲۰۲۱) این امر نشان‌دهنده شرایط پایدارتر، کاهش خطر اسیدی شدن و بهبود عملکرد میکروبی در فرایند تولید بیوگاز است.

میزان خاکستر اندازه‌گیری شده در پسماند اسب برابر با ۲۴/۳ درصد است که نسبتاً بالا بوده و بیش‌تر از مقادیر گزارش‌شده برای کود گاوی (۱۸ درصد) و ضایعات غذایی (کمتر از ۱۰ درصد) است (دمیرباش[4]، ۲۰۰۴) هرچند این ویژگی می‌تواند بهره‌وری فرآیند احتراق را کاهش دهد، اما از نظر بازیافت مواد مغذی پس از تولید انرژی مزیت محسوب می‌شود، به‌ویژه با توجه به مقادیر بالای فسفر (۱۸۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم (۱۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (در این پسماند که نسبت به بسیاری از پسماندهای دامی بیشتر است و ارزش بالای کود نهایی خاکستر یا (Digestate(را برای مصارف کشاورزی نشان می‌دهد (کالیران و موری، ۲۰۰۹)[5]

از دیگر ویژگی‌های مهم ترکیب شیمیایی پسماند اسب، مقدار نسبتاً پایین گوگرد آن (۰/۳ درصد) است که کمتر از میزان گوگرد کود گاوی (۰/۵ درصد) و به‌طور قابل‌توجهی کمتر از کود مرغ (تا ۰,۸ درصد) است. این خصوصیت موجب کاهش انتشار دی‌اکسید گوگرد (SO)در فرایند احتراق و در نتیجه کاهش پتانسیل اسیدی شدن محیط‌زیست می‌شود.

براساس جدول ۲، بررسی ترکیب عنصری کود اسب نشان داد که این پسماند زیستی دارای مقادیر قابل‌توجهی کربن (۳۴/۸ درصد) و هیدروژن (۴/۳ درصد) است که نقش مهمی در تعیین ارزش حرارتی پایین (LHV) ایفا می‌کنند. میزان کربن کود اسب نسبت به مقادیر گزارش‌شده توسط ویلاند (۲۰۲۳)، برای کود گاوی، که به‌طور متوسط حاوی ۳۰/۵ درصد کربن و ۳/۹ درصد هیدروژن است، به‌طور قابل‌توجهی بالاتر است. این تفاوت عمدتاً ناشی از نوع بسترهای گیاهی مانند خاک‌اره و کاه موجود در مراکز سوارکاری است که با

1. TOC
2. Cherubini
3. Matsumura
4. Demirbaş
5. Kaliyan & Morey (2005)

افزودن مواد سلولزی، محتوای کربن و قابلیت انرژی‌زایی کود اسب را افزایش می‌دهد.

یکی از چالش‌های مهم کود اسب، میزان بالای خاکستر آن (۲۴/۳ درصد) است که از میانگین خاکستر کود گاوی (۱۸ تا ۲۰ درصد) و ضایعات غذایی (کمتر از ۱۰ درصد) بیشتر می‌باشد. این مقدار زیاد خاکستر باعث کاهش انرژی قابل بازیافت می‌شود، زیرا بخش قابل‌توجهی از ماده غیرقابل احتراق است. با وجود این، پس از اصلاح مقدار خاکستر و رطوبت، ارزش حرارتی پایین (LHV) نهایی برابر با ۱۹/۸۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شد که نسبت به کود گاوی (حدود ۱۶/۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) و ضایعات شهری (۱۴/۰۰۰ تا ۱۵/۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) عددی مطلوب و قابل‌قبول است.

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با وجود چالش خاکستر بالا، کود اسب به دلیل محتوای بالای کربن و هیدروژن و نسبت متعادل کربن به نیتروژن (C/N)، ظرفیت بالایی برای تولید انرژی حرارتی دارد. این یافته‌ها با مطالعات بین‌المللی همخوانی داشته و در برخی شاخص‌ها، به‌ویژه ارزش حرارتی، عملکرد بهتری نسبت به سایر پسماندهای دامی و کشاورزی نشان می‌دهد؛ موضوعی که می‌تواند در مدیریت پایدار باشگاه‌های سوارکاری و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت ورزش نقش مهمی ایفا کند.

جدول ۴، نتایج مقایسه‌ای اثرات زیست‌محیطی براساس LCA را بیان می‌کند. نتایج تحلیل چرخه عمر نشان داد که هضم بی‌هوازی در مقایسه با احتراق مستقیم، انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۳۸٪ کاهش می‌دهد. همچنین، پتانسیل اسیدی شدن در هضم بی‌هوازی تقریباً ۴۷٪ کمتر است که این امر بیانگر برتری چشمگیر این روش در کاهش آلاینده‌های گازی مانند SO و NOx است. با وجود این، در شاخص آلودگی آب، هضم بی‌هوازی عملکرد ضعیف‌تری دارد و میزان آلودگی آن حدود ۲۵٪ بیشتر از احتراق است که عمدتاً به دلیل تولید پساب مایع غنی از نیتروژن است. مصرف منابع اولیه مانند انرژی فسیلی در فرآیند هضم بی‌هوازی تقریباً ۲۹٪ کمتر از احتراق است، زیرا بخشی از انرژی موردنیاز مستقیماً از گاز تولید شده تأمین می‌شود و نیاز به سوخت‌های کمکی کاهش می‌یابد.

در جدول ۳، پارامترهای ورودی به مدل تحلیل چرخه حیات در نرم‌افزار OpenLCA ارائه شده است. کود اسب به دلیل درصد بالای ماده خشک (بیش از ۳۵٪) و محتوای قابل توجه کربن (۳۴/۸٪)، دارای ارزش حرارتی پایین بالایی (حدود ۱۹/۸۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) است که این مقدار از بسیاری از پسماندهای دامی مانند کود گاوی (۱۶/۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) بیشتر است. این ویژگی کود اسب را به گزینه‌ای مناسب برای فرایند احتراق مستقیم تبدیل می‌کند، روشی که به سیستم‌های ساده‌تر و فناوری‌های کم‌هزینه نیاز دارد؛ اما میزان بالای خاکستر (۲۴/۳٪) یکی از چالش‌های مهم این فرآیند بوده و می‌تواند بر بازده و نگهداری سیستم تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر، هضم بی‌هوازی به دلیل محتوای بالای ماده آلی و نسبت بهینه کربن به نیتروژن (۲۳/۱)، عملکرد مناسبی در تولید بیوگاز دارد. اگرچه راندمان تولید بیوگاز از کود اسب معمولاً کمتر از ضایعات غذایی ولی بیش‌تر از کود گاوی گزارش شده، این فرایند نیازمند کنترل دقیق پارامترهایی مانند دما، pH و رطوبت است. برخلاف احتراق، خاکستر در هضم بی‌هوازی تأثیری ندارد و محصول نهایی این فرایند هضم می‌تواند به‌عنوان کود آلی با ارزش در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل SWOT انجام شده در این مطالعه (جدول ۵) نشان می‌دهد که بهره‌برداری از پسماند اسب برای تولید انرژی زیستی در مراکز سوارکاری از جنبه‌های فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی دارای نقاط قوت قابل‌توجهی است که با یافته‌های مشابه جهانی همخوانی دارد. مهم‌ترین نقطه قوت این پسماند، محتوای بالای ماده آلی و نسبت بهینه کربن به نیتروژن (C/N) آن است که با نتایج مطالعات ویلاند[1] (۲۰۲۳) و چروبینی و همکاران (۲۰۰۹)، که بر اهمیت این پارامترها در کارایی فرآیندهای انرژی زیستی تأکید دارند، کاملاً همسو است. همچنین، ارزش حرارتی بالای این پسماند (LHV ≈ ۱۹/۸۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) نسبت به کود گاوی

1. Weiland

(حدود ۱۶،۰۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم) که در مطالعات دمیرباش (۲۰۰۴) و کالیان و موری (۲۰۰۹)، نیز گزارش شده، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن برای فرایند احتراق مستقیم است.

از سوی دیگر، میزان بالای خاکستر (۲۴/۳٪) و تولید پساب در فرایند هضم بی‌هوازی به‌عنوان مهم‌ترین نقاط ضعف این روش‌ها شناخته شده‌اند. این چالش‌ها مشابه یافته‌های ماتسوموورا و همکاران (۲۰۲۱)، درباره ضایعات غذایی و ویلاند (۲۰۲۳)، درباره پسماند دامی است که خاکستر زیاد در احتراق و پساب تولیدشده در هضم بی‌هوازی را از موانع اصلی بهره‌برداری بهینه انرژی زیستی معرفی کرده‌اند. از نظر اقتصادی، احتراق مستقیم به دلیل هزینه ابتدایی کمتر و فناوری ساده‌تر برای مراکز کوچک و متوسط مناسب‌تر است، اما هزینه‌های نگهداری بالا و دفع خاکستر، مزایای آن را محدود می‌کند. در مقابل، هضم بی‌هوازی با سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر، تولید هم‌زمان انرژی و کود آلی ارزشمند، در بلندمدت اقتصادی‌تر بوده و از نظر مسئولیت اجتماعی و محیط‌زیستی نیز مطلوب‌تراست.

نتایج زیست‌محیطی این مطالعه با پژوهش‌های بین‌المللی مانند ویلاند (۲۰۲۳) و ماتسوموورا و همکاران (۲۰۲۱)، همسو است که هضم بی‌هوازی را به‌عنوان راهکار پایدارتر مدیریت پسماند معرفی کرده‌اند. اگرچه کود اسب به دلیل درصد بالای ماده خشک و بسترهای سلولزی بازده انرژی احتراق بالاتری نسبت به برخی پسماندها دارد، تولید بیوگاز به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ منابع، گزینه بهینه‌تری برای مدیریت پسماند در باشگاه‌های ورزشی پایدار محسوب می‌شود.

از منظر فرصت‌ها، این پژوهش با سیاست‌های جهانی توسعه پایدار و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر همسویی دارد و یافته‌های آن با گزارش چروبینی و همکاران (۲۰۰۹)، که بر اهمیت سیستم‌های انرژی زیستی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پیشبرد اقتصاد چرخشی تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد. همچنین، توسعه برندینگ سبز برای باشگاه‌های ورزشی، مشابه پروژه‌های ورزش سبز در اروپا و آمریکا، به‌عنوان یک فرصت مدیریتی مهم تلقی می‌شود.

در بخش تهدیدها، نتایج این پژوهش با چالش‌های مطرح‌شده در مطالعات کالیان و موری (۲۰۰۹) واکو[1] اینونت همسو است که به نبود استانداردهای یکپارچه، نوسانات اقتصادی و خطرات زیست‌محیطی ناشی از مدیریت ناکافی پساب و خاکستر اشاره دارند.

یافته‌های این پژوهش علاوه‌بر جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی، دارای کاربست‌های مهمی در مدیریت ورزشی است. انتخاب فناوری مناسب مدیریت پسماند می‌تواند هزینه‌های عملیاتی باشگاه‌ها را کاهش داده و بهره‌وری منابع را افزایش دهد. همچنین، اجرای شیوه‌های پایدار موجب ارتقای برندینگ و تصویر عمومی باشگاه‌ها شده و توان آن‌ها را در جذب اسپانسر و حامیان مالی تقویت می‌کند. نتایج تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران ورزشی در اولویت‌بندی پروژه‌ها و سرمایه‌گذاری‌های پایدار کمک کرده و به همسویی فعالیت‌ها با اهداف توسعه پایدار منجر شود. از سوی دیگر، طراحی دوره‌های آموزشی برای مدیران و کارکنان در زمینهٔ مدیریت سبز، کیفیت اداره باشگاه‌ها را ارتقا داده و مشارکت ذی‌نفعان را افزایش می‌دهد. در نهایت، پیاده‌سازی این نتایج امکان ارتقای مسئولیت اجتماعی باشگاه‌ها، ایجاد اشتغال سبز و تقویت ارتباط با جامعه محلی را فراهم می‌سازد.

با توجه به یافته‌های این مطالعه، پیشنهاد می‌شود باشگاه‌های سوارکاری در اولویت نخست از سیستم هضم بی‌هوازی برای مدیریت پسماند و تولید انرژی استفاده کنند؛ زیرا این روش براساس نتایج تحقیق، موجب کاهش حدود ۳۸ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای و ۲۹ درصدی مصرف منابع نسبت به احتراق مستقیم می‌شود. همچنین، ایجاد واحدهای کوچک هضم بی‌هوازی در باشگاه‌ها نه‌تنها نیاز انرژی روزمره (مانند روشنایی و گرمایش) را تأمین می‌کند بلکه فرصت درآمدزایی از فروش مازاد انرژی را نیز فراهم می‌آورد. اجرای دوره‌های آموزشی برای مدیران و مربیان درباره مدیریت پایدار

1. Ecoinvent

پسماند و انرژی و اختصاص بسته‌های حمایتی مالی یا معافیت‌های مالیاتی برای باشگاه‌هایی که این فناوری را پیاده‌سازی کنند، می‌تواند زمینه عملی و قابل کاربست نتایج این تحقیق را تضمین کند.

بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پسماندهای مراکز سوارکاری، به‌ویژه ترکیب کود و بستر اسب، با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود، دارای ظرفیت بالایی برای کاربست در مدیریت پایدار و تولید انرژی زیستی هستند. بررسی‌ها حاکی از آن است که درصد بالای ماده آلی، نسبت مناسب کربن به نیتروژن (C/N) و ارزش حرارتی پایین (LHV) مطلوب، این نوع پسماند را به منبعی با پتانسیل بالا برای کاربرد در فناوری‌های نوین انرژی تبدیل کرده است. در مقایسه میان دو روش اصلی بازیافت انرژی، یعنی احتراق مستقیم و هضم بی‌هوازی، مشخص شد که هضم بی‌هوازی به دلیل کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید کود آلی با کیفیت، از نظر زیست‌محیطی برتری دارد و برای کاربست در راهبردهای پایدار، گزینه‌ای مناسب‌تر محسوب می‌شود. با این حال، احتراق مستقیم به دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری کمتر و سهولت فناوری، می‌تواند به‌عنوان یک کاربرد موقت و قابل‌اجرا در مراکز فاقد زیرساخت‌های پیشرفته مدنظر قرار گیرد.

یافته‌های این پژوهش، علاوه‌بر جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی، از منظر مدیریت ورزشی نیز دارای ارزش عملیاتی است و امکان کاربست رویکردهای نوین مدیریتی را در باشگاه‌های سوارکاری فراهم می‌سازد. مدیران این مراکز می‌توانند با بهره‌گیری از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و کاربرد اصول اقتصاد سبز، ضمن کاهش هزینه‌های جاری، نقش فعالی در ارتقای مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی ایفا کنند و در مسیر توسعه پایدار گام بردارند.

در پایان، این پژوهش توصیه می‌کند که سیاست‌گذاری‌های مرتبط با حوزه‌های ورزش و محیط‌زیست، با تمرکز بر کاربست پسماندهای دامی به‌عنوان منابع انرژی و توسعه باشگاه‌های سبز، به‌عنوان رویکردی نوآورانه و اثربخش در مدیریت مراکز ورزشی مدنظر قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در مدیریت و سیاست‌گذاری ورزشی نقش‌آفرین باشد.

نخست، مدیران باشگاه‌های سوارکاری می‌توانند با انتخاب فناوری‌های پایدار در مدیریت پسماند (مانند هضم بی‌هوازی) هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و هم‌زمان کارایی انرژی را افزایش دهند.

دوم، استفاده از انرژی سبز و رعایت اصول زیست‌محیطی موجب ارتقای برندینگ باشگاه‌ها و افزایش توان آن‌ها در جذب اسپانسر، حامیان مالی و گواهی‌های بین‌المللی خواهد شد.

سوم، نتایج پژوهش زمینه طراحی برنامه‌های آموزشی و فرهنگی برای ارتقای دانش زیست‌محیطی مدیران، مربیان و ورزشکاران را فراهم می‌کند و مشارکت اجتماعی پیرامون باشگاه‌ها را افزایش می‌دهد. در نهایت، این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت تصمیم‌سازی در تخصیص منابع، اولویت‌بندی پروژه‌های ورزشی و همسویی با اهداف توسعه پایدار به کار رود.

برای تفکیک سناریوها براساس ویژگی‌های فیزیکی و زیست‌محیطی، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند K-means و DBSCAN استفاده شد؛ این رویکرد مبتنی به داده، امکان یافتن الگوهای نهفته و پیشنهاد سناریوهای بهینه بی‌هوازی یا احتراق مستقیم را فراهم ساخت. مشابه این رویکرد در مطالعه شاهرخی شهرکی و همکاران (۲۰۲۵)[1] نیز مشاهده شد که با استفاده از LCA وML، ترکیب داده‌محور قادر به پیشنهاد طراحی‌های بهینه در سیستم‌های زیست‌انرژی بود .این روش چندمعیاره قادر است تصمیم‌گیری دقیق‌تری برای انتخاب سناریوها ارائه کند.

1. Shahrokhishahraki

References

Asadian Ardakani, F., & Azizi, F. (2025). Residents' perception of the sporting event of horse beauty contests: An importanceperformance analysis. *Applied Research in Sport Management*, 14(1), 23-38. (In Persian) https://doi.org/10.30473/arsm.2025.71356.3886

Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., &Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources,Conservation and Recycling*, 53(8), 434-447. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013

Da Lio, L., Castello, P., Gianfelice, G., Cavalli, R., & Canu, P. (2021). Effective energy exploitation from horse manure combustion. *Waste Management*, 128, 243-250. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.035

De Paula Salgado, I., Conrad, F., Signorini, C., Günther, E., Ihlenfeldt, S., & Mechtcherine, V. (2025). Integrating life cycle assessment (LCA) and machine learning for sustainable designs: a case study on protective layers made of mineral-bonded fiber-reinforced composites. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. https://doi.org/10.1007/s11367-025-02454-7

Demirbaş, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230.https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004

Ebrahimi Toloun, S. A., Khoramnejdian, S., Zavareh, S. R. A., & Behbahaninia, A. (2025). Assessment of landfill gases by LandGEM and energy recovery potential from municipal solid waste of Robat Karim. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(2), 2857-2866. (In Persian) https://doi.org/10.1007/s13399-023-05142-4

Ecoinvent Centre. (2023). *Ecoinvent Database version 3.8. Zürich, Switzerland:Ecoinvent Association*. Retrieved from https://www.ecoinvent.org

Farahani, A., Mohammadi Raoof, M., Shajie, R., & Maleki, A. (2020). Comparative Study of Sport Governance status in Iran and Selected Countries. *Applied Research in Sport Management*, 9(1), 75-96. (In Persian) Doi: 10.30473/ARSM.2020.7097

Farahani, A., Wallbaum, H., & Dalenbäck, J. O. (2021). A service-life cycle approach to maintenance and energy-retrofit planning for building portfolios. *Energy and Buildings*, *240*, 110898. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110898

Fernández-Corts, M., Revuelta-Aramburu, M., & Morales-Polo, C. (2025). Integrating Renewable Fuels and Sustainable Practices in Equestrian Centers: A Model for Carbon Footprint Reduction and Environmental Impact Mitigation. *Fuels*, 6(1), 10. https://doi.org/10.3390/fuels6010010

Hennessy, J., & Eriksson, O. (2015). *Energy and nutrients from horse manure: Lifecycle data inventory of horse manure management systems in Gävleborg, Sweden*. Gävle University Press.

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Densification characteristics of corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.07.001

Kusch, S. (2013). Horse stall waste: Amounts, management, bioenergy generation. *In Proceedings of the 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference*, Sect (Vol. 18, pp. 423-428).

Matsumura, Y., Minowa, T., & Yamamoto, H. (2021). Evaluation of the energy balance and greenhouse gas reduction in food waste biogas utilization. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128910. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128910

Matsumura, Y., Minowa, T., & Yamamoto, H. (2021). Evaluation of the energy balance and greenhouse gas reduction in food waste biogas utilization. *Journal of Cleaner Production*, 320,128910. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128910

Mong, G. R., Chong, C. T., Ng, J.-H., Chong, W. W. F., Ong, H. C., & Tran, M.-V. (2021). Multivariate optimisation study and life cycle assessment of microwaveinduced pyrolysis of horse manure for waste valorisation and management.*Energy*, 216, 119194. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119194

Mong, G. R., Chong, C. T., Ng, J. H., Chong, W. W. F., Ong, H. C., & Tran, M. V., & Shiung Lam, S. (2020). Hwai Chyuan Ong, and Farid Nasir Ani. "Microwave pyrolysis for valorisation of horse manure biowaste." Energy conversion and management 220 113074. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113074

Omidkar, A., Alagumalai, A., Li, Z., & Song, H. (2024). Machine learning assisted techno-economic and life cycle assessment of organic solid waste upgrading under natural gas. *Applied Energy*, 355, 122321. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122321

OpenLCA. (2022). *OpenLCA User Guide and Modeling Standards*. Berlin, Germany: GreenDelta GmbH. Retrieved from https://www.openlca.org/documentation

Rout, P. R., Pandey, D. S., Haynes-Parry, M., Briggs, C., Manuel, H. L. C., Umapathi, R., Mukherjee, S., Panigrahi, S., & Goel, M. (2022). Sustainable Valorisation of Animal Manures via Thermochemical Conversion Technologies: An Inclusive Review on Recent Trends. *Waste and Biomass Valorization*, 14(2), 553–582.https://doi.org/10.1007/s12649-022-01916-5

Sheykhyoosefi, R., Azizian Kohan, N., Moharramzadeh, M., & Naghizadeh Baghi, A. (2024). Designing a model for the use of new technologies in the development of sport for all in Iran: A grounded theory. *Applied Research of Sport Management*, 12(4), 53–64. (In Persian) https://doi.org/10.30473/arsm.2024.69743.3829

Wartell, B. A., Krumins, V., Alt, J., Kang, K.,Schwab, B. J., & Fennell, D. E. (2012). Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding.*Bioresource technology*, 112, 42-50. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.012

Weiland, P. (2023). Biogas production from animal manures: A review of current practices and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113029. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113029

Weiland, P. (2023). Biogas production from animal manures: A review of current practices and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113029. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113029