

The Role of Artificial Intelligence in Environmental Sustainability with an Emphasis on Construction Waste Management

Hadi Shakiba Zahed¹ , Mohammad Reza Tabatabai² 

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: h.shakiba@hsu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: karadej80@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: This study examines the dual role of artificial intelligence (AI) in environmental sustainability by analyzing how AI-based resource efficiency, AI-related energy consumption, and AI-enabled environmental monitoring influence the reduction of construction and demolition waste (CDW). Addressing a gap in the literature regarding the lack of an integrated empirical model, this research develops and tests a comprehensive framework using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM).
Article history: Received: 14 August 2025 Received in revised form: 9 November 2025 Accepted: 22 November 2025 Available online: 16 December 2025	Method: Data were collected using a structured questionnaire rated on a five-point Likert scale, completed by 233 experts from municipal waste management organizations, licensed CDW contractors, and engineering firms in Isfahan, Iran. The measurement model was evaluated for reliability and validity, and the structural model was assessed through path coefficients, significance values, and predictive metrics. Four hypotheses were tested to capture both the positive and negative pathways through which AI affects environmental performance.
Keywords: <i>Ai-based Resource Efficiency, Artificial intelligence, Environmental, Sustainability, Energy Consumption, Construction Demolition waste.</i>	Results: The findings showed that AI-based resource efficiency significantly improved CDW reduction ($\beta = 0.48$, $p < 0.001$), while AI-driven environmental monitoring exerted the strongest positive effect ($\beta = 0.52$, $p < 0.001$). Conversely, AI-related energy consumption negatively affected sustainability outcomes ($\beta = -0.28$, $p < 0.05$), emphasizing the environmental cost of high computational demand. Integration of AI into industrial processes also contributed to reduced resource depletion ($\beta = 0.45$, $p < 0.001$), confirming the robustness of the model.
	Conclusions: According to the results, AI has considerable potential to enhance environmental sustainability through improved resource management and real-time environmental monitoring; however, its high energy consumption poses a major challenge to achieving net environmental gains. Developing energy-efficient AI models and integrating renewable energy sources into AI operations are essential steps toward balancing benefits and costs. The proposed model offers a unified empirical foundation for policymakers and practitioners to support responsible and sustainable AI adoption in CDW management.
Cite this article: Shakiba Zahed, H. & Tabatabai, M. R. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Environmental Sustainability with an Emphasis on Construction Waste Management, <i>Journal of Environmental Studies</i> , 51 (3), 351- 369. http://doi.org/10.22059/JES.2025.400138.1008628	
© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.	
 DOI: http://doi.org/10.22059/JES.2025.400138.1008628	

Introduction

Artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative technology capable of reshaping resource management, monitoring systems, and overall environmental performance across multiple industries. In the context of construction and demolition waste (CDW)—one of the largest waste streams in cities across developing countries—AI offers significant potential to enhance sustainability through predictive analytics, real-time monitoring, and process optimization. However, despite its advantages, AI also introduces environmental challenges, primarily due to its substantial energy requirements, especially during model training and continuous system operation. This dual nature of AI necessitates a comprehensive empirical examination of both its positive and negative impacts on sustainability.

A systematic review of prior studies reveals that most research has examined AI applications in a fragmented manner—focusing on isolated components such as intelligent sorting, waste prediction, or environmental monitoring—while lacking an integrated framework that simultaneously evaluates resource efficiency, energy consumption, and monitoring capabilities. Moreover, in the Iranian context and specifically within urban CDW management systems, empirical evidence is extremely limited.

Addressing this gap, the present study develops and empirically tests a unified structural model explaining how three key AI-related constructs—resource efficiency, AI-related energy consumption, and AI-enabled environmental monitoring—affect CDW reduction and environmental sustainability. Drawing upon the literature, the following hypotheses were formulated:

- H1: AI-based resource efficiency positively influences CDW reduction and environmental sustainability.
- H2: AI-related energy consumption negatively affects environmental sustainability due to high computational energy demands.
- H3: AI-enabled environmental monitoring positively affects CDW reduction by providing accurate real-time data for environmental decision-making.
- H4: Integration of AI into industrial processes positively reduces resource depletion and operational waste generation.

Method

This study adopted a quantitative, applied, descriptive–correlational design, consistent with the research objective of analyzing causal relationships among latent variables. The methodological approach followed Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), a suitable method for predictive models, complex constructs, and datasets involving latent variables.

- Population and Sampling

The study was conducted in Isfahan, Iran, a major industrial city with substantial construction activity and high CDW generation. The statistical population consisted of experts from three organizational groups, including the Municipal Waste Management Organization, licensed CDW collection and recycling contractors, and engineering and consulting firms active in demolition and construction projects. From 300 collected questionnaires, 233 valid responses were retained for analysis.

- Instrument Development

The primary instrument was a 26-item Likert-scale questionnaire covering four constructs, including AI-based resource efficiency, AI-related energy consumption, AI-enabled environmental monitoring, and CDW reduction (dependent variable). Items were adapted from validated international sources (e.g., Cha et al., 2020; Solano Meza et al., 2023; Kumar, 2025) and refined through expert reviews of seven specialists to establish content validity, using CVR and CVI indices based on Lawshe's method.

- Measurement Model Evaluation

Convergent validity was assessed via factor loadings (>0.70) and Average Variance Extracted ($AVE > 0.50$). All

constructs satisfied these thresholds, confirming adequate convergent validity, Discriminant validity was verified via Fornell–Larcker criteria, showing each construct was empirically distinct from others.

- Structural Model Evaluation

The structural model was examined using path coefficients, t-values, p-values, and goodness-of-fit indices. Both direct and indirect effects were tested to assess the mediating role of AI-related constructs on CDW reduction.

Results

The results of the PLS-SEM analysis provided strong empirical support for the proposed conceptual model. Both the measurement and structural models demonstrated suitable reliability, validity, and explanatory power. Convergent and discriminant validity were confirmed for all constructs, and path coefficients were significant at conventional thresholds.

The analysis showed that AI-based resource efficiency has a significant and positive effect on reducing construction and demolition waste (CDW) ($\beta = 0.48$, $p < 0.001$). This finding supported the notion that AI could improve operational efficiency by optimizing resource allocation, reducing rework, and enhancing recycling processes, ultimately contributing to lower waste generation.

In contrast, AI-related energy consumption exerted a significant negative effect on environmental sustainability ($\beta = -0.28$, $p < 0.05$), which confirmed the high computational demands of AI systems, particularly during model training and continuous operation, could offset some of the environmental benefits achieved through AI-driven optimization. The results further revealed that AI-enabled environmental monitoring had the strongest positive effect on CDW reduction ($\beta = 0.52$, $p < 0.001$). Technologies such as machine vision, real-time sensors, and AI–IoT systems were found to enhance monitoring accuracy, facilitate early detection of waste mismanagement, and support data-driven interventions in construction sites and recycling. Finally, integration of AI into industrial processes demonstrated a significant positive impact on reducing resource depletion ($\beta = 0.45$, $p < 0.001$). This indicated that AI-driven process optimization improved operational efficiency by minimizing material losses, preventing unnecessary energy consumption, and enhancing the accuracy of industrial processes. Collectively, these findings highlighted the remarkable potential of AI to improve environmental sustainability, provided that the negative implications of its energy consumption were properly managed.

Conclusions

This study demonstrates that artificial intelligence can play a pivotal role in enhancing environmental sustainability, particularly within the field of construction and demolition waste management. The findings confirm that AI-based resource efficiency, AI-enabled environmental monitoring, and optimization of industrial processes contribute significantly to reducing waste generation and improving environmental performance. These benefits underline AI's value as a transformative tool capable of supporting urban sustainability strategies and advancing more efficient resource utilization across the construction sector.

However, the study also highlights the challenges associated with the high energy demand of AI systems, which emerges as a critical barrier to achieving net environmental gains. The negative effect of energy consumption emphasizes the importance of adopting energy-efficient AI models, optimizing system architectures, and integrating renewable energy sources into AI operations. Without addressing this issue, the environmental advantages of AI could be partially offset by its substantial energy footprint.

To maximize AI's sustainability benefits, several practical recommendations are proposed. Governments and regulatory bodies should incentivize the development and adoption of low-energy AI technologies by offering tax benefits, subsidies, and support for innovation. Expanding the use of AI in environmental and industrial monitoring through public–private partnerships can further improve decision-making and resource management. Updating regulatory frameworks to ensure responsible AI deployment—with emphasis on transparency, ethical standards, and

accountability—is also essential. Additionally, sustained investment in AI-enabled sustainability infrastructure, including renewable energy integration and intelligent monitoring systems, is crucial. Overall, the study provides a comprehensive empirical foundation illustrating both the opportunities and constraints of AI in environmental sustainability. By addressing the challenges associated with energy consumption and promoting responsible, data-driven implementation, AI can serve as a major driver in achieving long-term sustainability goals.

Author Contributions

Data collection: Mohammad Reza Tabatabai, Research report preparation: Mohammad Reza Tabatabai, Hadi Shakiba Zahed, Data analysis: Hadi Shakiba Zahed, Mohammad Reza Tabatabai

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-forprofit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

نقش هوش مصنوعی در پایداری محیط‌زیستی با تأکید بر مدیریت پسماند ساختمانی

هادی شکیبازاهد^۱✉، محمدرضا طباطبایی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: h.shakiba@hsu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: karadej80@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: هدف این پژوهش بررسی نقش دوگانه هوش مصنوعی در پایداری محیط‌زیست از طریق تحلیل اثرات سه مؤلفه بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی، مصرف انرژی مرتبط با هوش مصنوعی و نظارت محیط‌زیستی هوشمند بر کاهش پسماندهای ساختمانی و تخریب در کلان‌شهر اصفهان است. این مطالعه با توجه به نبود یک مدل تجربی یکپارچه در ادبیات پژوهشی، به دنبال توسعه و آزمون چارچوبی جامع برای تبیین سازوکارهای اثرگذاری هوش مصنوعی در مدیریت پسماند ساختمانی است.

روش پژوهش: پژوهش حاضر از نوع کاربردی و مبتنی بر رویکرد کمی است. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه ساختاریافته پنج‌درجه‌ای لیکرت جمع‌آوری شد و ۲۳۳ نفر از کارشناسان سازمان مدیریت پسماند شهرداری، پیمانکاران مجاز حمل و بازیافت نخاله، و مهندسان شاغل در شرکت‌های ساختمانی و محیط‌زیستی در شهر اصفهان در مطالعه شرکت کردند. ارزیابی پایایی و روایی سازه‌ها با استفاده از مدل اندازه‌گیری انجام شد و مدل ساختاری با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) مورد تحلیل قرار گرفت. چهار فرضیه برای بررسی مسیرهای مستقیم مثبت و منفی اثر هوش مصنوعی بر کاهش پسماند ساختمانی آزمون شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی تأثیر مثبت و معناداری بر کاهش پسماند ساختمانی دارد ($p < 0.001$, $\beta = 0.48$) و نظارت محیط‌زیستی هوشمند قوی‌ترین اثر مثبت را بر بهبود عملکرد محیط‌زیستی ایفا می‌کند ($p < 0.001$, $\beta = 0.52$). در مقابل، مصرف انرژی مرتبط با هوش مصنوعی اثر منفی و معناداری بر شاخص‌های پایداری دارد ($p < 0.05$, $\beta = -0.28$) که بیانگر هزینه محیط‌زیستی بالای توان محاسباتی سیستم‌های هوشمند است. همچنین براساس نتایج بدست آمده، ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای صنعتی موجب کاهش ائتلاف منابع و بهبود کارایی عملیاتی شد ($p < 0.001$, $\beta = 0.45$).

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند از طریق بهبود مدیریت منابع و تقویت نظارت محیط‌زیستی لحظه‌ای، نقش مؤثری در کاهش پسماند ساختمانی ایفا کند؛ با این حال، مصرف انرژی بالا در مدل‌های هوش مصنوعی یکی از چالش‌های مهم در دستیابی به مزایای محیط‌زیستی خالص است. توسعه مدل‌های کم‌مصرف، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌کارگیری هوش مصنوعی مسئولانه از الزامات اصلی برای ایجاد توازن میان منافع و هزینه‌های محیط‌زیستی است. مدل ارائه شده می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب تجربی معتبر برای سیاست‌گذاران و مدیران شهری در جهت ارتقای سیستم‌های هوشمند مدیریت پسماند ساختمانی به‌کار گرفته شود.

استناد: شکیبازاهد، هادی و طباطبایی، محمدرضا. (۱۴۰۴). نقش هوش مصنوعی در پایداری محیط‌زیستی با تأکید بر مدیریت پسماند ساختمانی. نشریه

محیط‌شناسی، ۵۱(۳)، ۳۵۱-۳۶۹. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.400138.1008628>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.400138.1008628>

مقدمه

مدیریت پسماند ساختمانی و تخریب^۱ (CDW) یکی از چالش‌های رو به افزایش در کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه به‌ویژه در بسترهای شهری با رشد ساخت‌وساز بالا است. در ایران، شهر اصفهان به‌عنوان یکی از مراکز اصلی فعالیت‌های عمرانی، صنعتی و نوسازی شهری با حجم قابل‌توجهی از نخاله‌های ساختمانی مواجه است؛ پسماندی که در صورت مدیریت غیرهوشمند می‌تواند پیامدهایی همچون هدررفت منابع، افزایش مصرف انرژی، تولید گردوغبار، انتشار آلاینده‌ها و آسیب به زیست‌بوم‌های پیرامونی را به همراه داشته باشد (Amin et al., 2023). رشد ساخت‌وساز، فرسودگی بافت‌های شهری و فقدان الگوهای استاندارد در تفکیک و بازیافت CDW سبب شده است مدیریت سنتی نخاله‌ها کارایی لازم را نداشته باشد و نیاز به بهره‌گیری از فناوری‌های نوین بیش از پیش احساس شود.

در این میان، هوش مصنوعی^۲ به‌عنوان یکی از فناوری‌های تحول‌آفرین، ظرفیت قابل‌توجهی برای بهبود فرآیندهای مرتبط با CDW دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مثل یادگیری عمیق^۳ می‌توانند الگوهای تولید نخاله، رفتار مصرف مصالح، مسیرهای بهینه حمل نخاله و نقاط تولید آلودگی را با دقت بالا پیش‌بینی و مدیریت کنند (Gupta et al., 2024; Kumar, 2025). همچنین فناوری بینایی ماشین در تفکیک مصالح قابل بازیافت (مانند بتن، آجر، فولاد و چوب) به‌کار گرفته شده و دقت عملیات جداسازی را افزایش داده و حجم پسماند دفنی را کاهش می‌دهد (Bang & Andersen, 2022). از سوی دیگر، سامانه‌های پایش هوشمند مبتنی بر ترکیب هوش مصنوعی و حسگرهای اینترنت اشیا (IoT)^۴ می‌توانند میزان گردوغبار، ذرات معلق و سایر آلاینده‌های محیطی را در محل‌های دیوی نخاله به‌صورت لحظه‌ای رصد کرده و با تحلیل خودکار داده‌ها، اطلاعات لازم برای تصمیم‌سازی مدیریتی را فراهم کنند (Felici-Castell et al., 2023).

در بستر ملی ایران، با وجود رشد ساخت‌وساز و اهمیت مسئله نخاله‌های ساختمانی، پژوهش‌های کمتری به ترکیب فناوری‌های هوشمند با مدیریت CDW پرداخته‌اند و اغلب مطالعات موجود بر تحلیل اقتصادی، آثار محیط‌زیستی یا ارزیابی روش‌های دفن و بازیافت متمرکز بوده‌اند. در سطح بین‌المللی نیز بسیاری از تحقیقات تنها یک مؤلفه را بررسی کرده‌اند، برای مثال، صرفاً تفکیک هوشمند، یا صرفاً پیش‌بینی حجم نخاله (Cha et al., 2020)، و کمتر مطالعه‌ای به بررسی نقش هم‌زمان AI در سه سازه کلیدی: بهینه‌سازی منابع، کاهش مصرف انرژی و ارتقای نظارت محیط‌زیستی پرداخته است.

این شکاف پژوهشی به‌ویژه در شهرهایی مانند اصفهان که با افزایش تولید CDW و فشار بر زیرساخت‌های حمل و دفع مواجهند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین مسئله اصلی این پژوهش آن است که هوش مصنوعی چگونه می‌تواند از طریق بهبود بهره‌وری منابع، کاهش مصرف انرژی و ارتقای نظارت محیط‌زیستی، به کاهش پسماند ساختمانی در کلان‌شهر اصفهان کمک کند؟ ضرورت انجام پژوهش نیز از سه منظر قابل تبیین است:

الف) ضرورت عملیاتی: نیاز مدیریت شهری اصفهان به راهکارهای هوشمند برای کنترل حجم روزافزون CDW و کاهش هزینه‌های حمل، دفن و بازپردازش.

ب) ضرورت علمی: نبود مدل‌های تجربی یکپارچه که سازوکار اثرگذاری AI بر CDW را با نگاه سیستمی بررسی کنند.

ج) ضرورت سیاست‌گذاری: نیاز به شواهد کمی برای تدوین برنامه‌های مبتنی بر فناوری در مدیریت پایدار نخاله‌ها.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش ارائه یک مدل تجربی با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری (PLS-SEM)^۵ برای تحلیل اثرات هوش مصنوعی بر کاهش پسماند ساختمانی با تمرکز بر سازه‌های میانجی «بهره‌وری منابع»، «مصرف انرژی» و «نظارت محیط‌زیستی» است. نوآوری پژوهش شامل ارائه یک چارچوب مفهومی تلفیقی برای مدیریت CDW مبتنی بر AI، تمرکز بر یک کلان‌شهر ایرانی با نیازهای ویژه محیط‌زیستی، و به‌کارگیری روش‌های کمی پیشرفته برای تحلیل روابط سازه‌ها است.

1. Construction and Demolition Waste (CDW)
2. Artificial Intelligence (AI)
3. Deep Learning
4. Internet of Things
5. Partial Least Squares Structural Equation Modeling

پیشینه پژوهش

پسماندهای ساختمانی و تخریب (CDW) یکی از مهم‌ترین و پر حجم‌ترین جریان‌های پسماند در کلان‌شهرهای در حال توسعه محسوب می‌شوند. حجم بالای تولید، تنوع مصالح به‌کار رفته و پیامدهای محیط‌زیستی گسترده ناشی از دفع یا پردازش نامناسب این نوع پسماند، سبب شده است که مدیریت CDW به یکی از اولویت‌های اصلی برنامه‌ریزی شهری تبدیل شود. در شهرهایی مانند اصفهان، روند فزاینده ساخت‌وساز، نوسازی بافت‌های فرسوده و پروژه‌های عمرانی با مقیاس بزرگ، منجر به افزایش تولید نخاله‌های ساختمانی شده و چالش‌هایی نظیر افزایش حمل‌ونقل مصالح دورریز، مصرف بالای انرژی در فرآیندهای جداسازی و بازیافت، و تشدید آلودگی‌های محیط‌زیستی را به همراه داشته است.

بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که طی یک دهه اخیر، هوش مصنوعی به‌تدریج به یکی از محورهای اصلی مطالعات مدیریت پسماند تبدیل شده است؛ به‌گونه‌ای که تمرکز پژوهش‌ها از راهکارهای سنتی به سمت رویکردهای داده‌محور و هوشمند تغییر یافته است. نتایج مطالعات پیشین حاکی از آن است که الگوریتم‌های یادگیری ماشین، فراتر از یک ابزار کمکی، به‌عنوان سازوکاری مؤثر در تصمیم‌سازی‌های مرتبط با بهره‌وری منابع و کاهش پسماند مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ هر چند دامنه و عمق این اثرگذاری در پژوهش‌های مختلف یکسان گزارش نشده است (Cha et al., 2020). افزون بر این، توسعه سیستم‌های مبتنی بر بینایی ماشین و یادگیری عمیق، شناسایی و تفکیک مصالح قابل بازیافت را تسهیل کرده و نقش مؤثری در افزایش نرخ بازیافت موادی مانند بتن، فولاد، شیشه و آجر ایفا می‌کند (Bang & Andersen, 2022).

در کنار مدیریت منابع، مصرف انرژی نیز یکی از ابعاد مهم مدیریت CDW است که در پژوهش‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. فرآیندهای جمع‌آوری، حمل‌ونقل، جداسازی و پردازش پسماندهای ساختمانی به‌طور معمول انرژی‌بر هستند و در صورت نبود برنامه‌ریزی بهینه، می‌توانند منجر به افزایش انتشار آلاینده‌ها شوند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند می‌تواند با بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل و مدیریت ماشین‌آلات، مصرف انرژی را کاهش داده و کارایی عملیاتی را افزایش دهد. با وجود این پیشرفت‌ها، مرور نظام‌مند منابع نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های موجود، رویکردی تک‌بعدی داشته و عمدتاً تنها یکی از ابعاد کاربرد هوش مصنوعی (مانند پیش‌بینی پسماند یا تفکیک هوشمند) را بررسی کرده‌اند، بدون آن که تعامل میان منابع، انرژی و نظارت محیط‌زیستی را به‌صورت هم‌زمان تحلیل کنند.

از سوی دیگر، نظارت محیط‌زیستی به‌عنوان مؤلفه‌ای اساسی در مدیریت پایدار CDW مطرح است. پیشرفت در حوزه حسگرهای هوشمند و یکپارچه‌سازی آن‌ها با سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء، امکان پایش لحظه‌ای شاخص‌های محیط‌زیستی مانند گردوغبار ناشی از تخریب، نشت شیرابه، و انتشار ذرات معلق خطرناک را فراهم کرده است. این رویکردها به مدیران شهری کمک می‌کند تا پیش از بروز بحران‌های محیط‌زیستی، اقدامات کنترلی و پیشگیرانه را اتخاذ کنند (Felici-Castell et al., 2023). با این وجود، کاربرد این فناوری‌ها در حوزه CDW اغلب به‌صورت مجزا بررسی شده و ارتباط آن‌ها با سایر ابعاد مدیریت پسماند کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

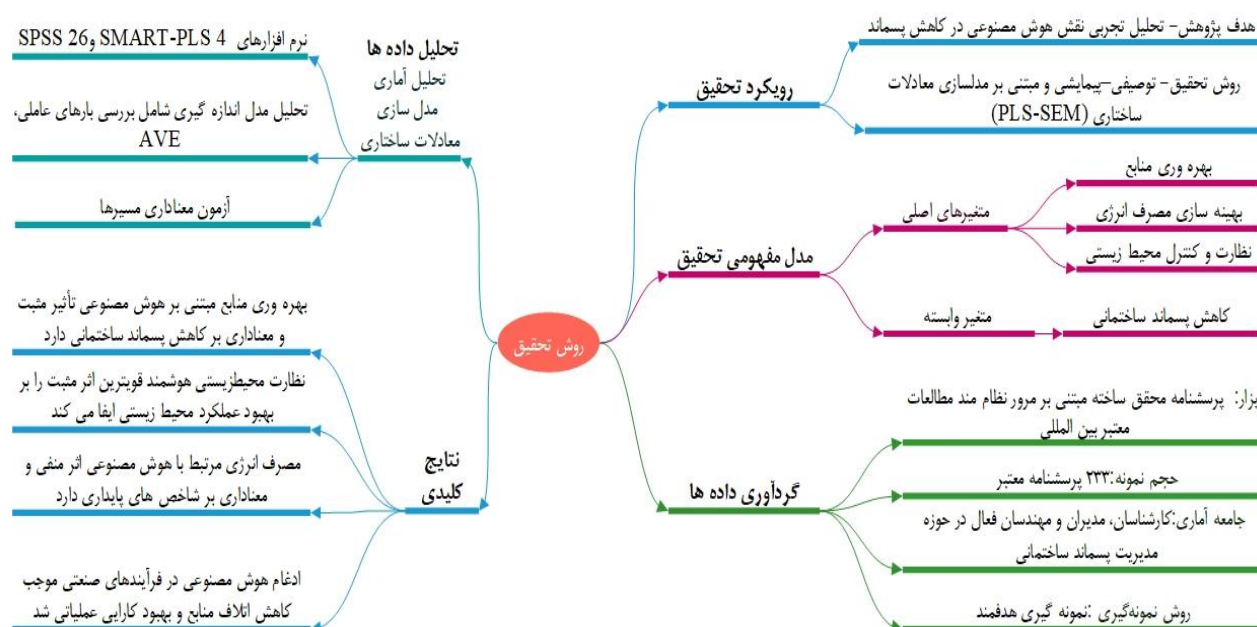
مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین، رویکردی تک‌بعدی داشته‌اند. برخی مطالعات صرفاً بر تفکیک هوشمند یا پیش‌بینی حجم پسماند تمرکز کرده‌اند، در حالی که گروهی دیگر به مدیریت انرژی یا پایش محیط‌زیستی پرداخته‌اند. حتی مرورهای جامعی که به بررسی نقش فناوری‌های نوین در مدیریت پسماند پرداخته‌اند (Joshi et al., 2021; Solano, 2023)، تمرکز مستقیمی بر پسماندهای ساختمانی و تحلیل هم‌زمان اثرات هوش مصنوعی بر بهره‌وری منابع، مصرف انرژی و نظارت محیطی نداشته‌اند.

بر این اساس، خلأ اصلی پژوهش‌های موجود را می‌توان در نبود یک چارچوب یکپارچه و تجربی دانست که بتواند نقش هوش مصنوعی را در کاهش CDW از طریق تعامل میان سه سازه کلیدی بهره‌وری منابع، کاهش مصرف انرژی و نظارت محیط‌زیستی تبیین کند. این خلأ به‌ویژه در بستر کشورهای در حال توسعه و از جمله ایران، که الگوهای تولید پسماند، زیرساخت‌های بازیافت و ساختار نهادی مدیریت پسماند با کشورهای توسعه‌یافته تفاوت دارد، برجسته‌تر است. بنابراین، پژوهش حاضر با توسعه یک مدل جامع و آزمون

تجربی آن بر اساس داده‌های واقعی در شهر اصفهان، تلاش می‌کند بخشی از این شکاف نظری و کاربردی را پوشش دهد و شواهدی برای سیاست‌گذاری مبتنی بر فناوری در مدیریت پایدار پسماندهای ساختمانی ارائه کند.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکرد کمی- کاربردی و با هدف تحلیل تجربی نقش هوش مصنوعی در کاهش پسماند جامد شهری با تأکید بر پسماندهای ساختمانی انجام شده است. انتخاب رویکرد کمی با توجه به ماهیت متغیرها، نیاز به سنجش روابط علی، و ضرورت استفاده از شاخص‌های پیش‌بینی‌محور در تحلیل مدیریت پسماند اتخاذ گردید. روش تحقیق از نوع توصیفی- پیمایشی و مبتنی بر مدل‌سازی معادلات ساختاری (PLS-SEM) است؛ رویکردی که امکان تحلیل هم‌زمان متغیرهای پنهان، روابط غیرخطی و سازه‌های چندبعدی را فراهم می‌سازد (Hair et al., 2019). طراحی پژوهش مطابق نقشه شکل ۱ اجرا شد:



شکل ۱. نمودار جریان تحقیق

جامعه آماری و نمونه‌گیری، محل اجرای پژوهش

این پژوهش در شهر اصفهان، به عنوان یکی از کلان‌شهرهای صنعتی و دارای بیشترین حجم فعالیت‌های ساخت‌وساز در ایران اجرا شده است. جامعه آماری شامل کارشناسان، مدیران و مهندسان فعال در حوزه مدیریت پسماند ساختمانی در سه گروه سازمانی بوده است:

- سازمان مدیریت پسماند شهرداری اصفهان
- پیمانکاران رسمی جمع‌آوری، حمل و بازیافت CDW
- شرکت‌های مهندسی و مشاوران دارای پروژه فعال تخریب و ساخت‌وساز

بر اساس اطلاعات دریافتی از شهرداری اصفهان و انجمن انبوه‌سازان اصفهان، تعداد افراد واجد شرایط در این سه گروه ۳۸۰ نفر برآورد شد. نمونه‌گیری به صورت هدفمند^۱ انجام شد؛ زیرا پژوهش نیازمند پاسخ‌دهندگان متخصص و آشنا با فرایندهای هوشمندسازی و مدیریت CDW بود و استفاده از روش‌های تصادفی می‌توانست منجر به ورود افراد فاقد صلاحیت تخصصی شود.

برای گردآوری داده‌ها، پرسش‌نامه آنلاین و کاغذی در اختیار ۳۸۰ نفر قرار گرفت. از این تعداد، ۳۰۰ پرسش‌نامه دریافت شد که پس از حذف پاسخ‌های ناقص، ۲۳۳ پرسش‌نامه معتبر وارد تحلیل شد. نرخ پاسخ‌دهی پژوهش ۶۲/۱۳ درصد بود که در مطالعات کمی حوزه مدیریت شهری نرخ مطلوبی تلقی می‌شود و قابلیت اتکای نتایج را افزایش می‌دهد. این حجم نمونه مطابق با توصیه Hair et al., (2021) برای مدل‌سازی معادلات ساختاری PLS-SEM کافی و مناسب است.

– ابزار گردآوری داده‌ها (پرسش‌نامه)

ابزار اصلی، پرسش‌نامه محقق‌ساخته مبتنی بر مرور نظام‌مند مطالعات معتبر بین‌المللی و تطبیق آنها با شرایط مدیریت پسماند ساختمانی در ایران است. پرسش‌نامه شامل چهار سازه اصلی پژوهش است:

- کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت پسماند
- بهره‌وری منابع
- بهینه‌سازی مصرف انرژی
- نظارت و کنترل محیط‌زیستی
- کاهش پسماند ساختمانی (متغیر وابسته)

گویه‌ها بر اساس طیف پنج درجه‌ای لیکرت (از ۱ = بسیار کم تا ۵ = بسیار زیاد) طراحی شده‌اند. فرآیند توسعه گویه‌ها متکی بر منابع معتبر همچون (Gupta et al., 2024; Kumar, 2025; Zhang et al., 2024) بوده است.

– روایی و پایایی ابزار

الف) روایی محتوا

برای سنجش روایی محتوا، از روش قضاوت خبرگان^۱ هفت نفر از متخصصان حوزه مدیریت پسماند و فناوری‌های هوشمند و شاخص‌های نسبت روایی محتوا^۲ و شاخص روایی محتوا^۳ مطابق فرمول‌های لاوشه (Lawshe, 1975) و والتز و باسل (Waltz & Bausell, 1981) استفاده شد. بدین‌منظور، پرسش‌نامه در اختیار هفت نفر از اساتید و متخصصان حوزه مدیریت ساخت و ارتباطات پروژه قرار گرفت تا میزان ضرورت و تناسب گویه‌ها را ارزیابی کنند.

- مقدار بحرانی CVR بر اساس جدول لاوشه (Lawshe, 1975) برای تعداد هفت ارزیاب، ۰/۶۲ است.
 - نتایج نشان داد که تمامی گویه‌ها دارای نسبت روایی محتوا بیش از ۰/۶۲ و شاخص روایی محتوا بیش از ۰/۷۹ بوده‌اند، بنابراین همگی در دامنه قابل قبول قرار گرفته‌اند.
- بر این اساس، محتوای ابزار از نظر انطباق با اهداف پژوهش، پوشش مفهومی ابعاد، و وضوح زبانی مورد تأیید خبرگان قرار گرفت.

ب) روایی سازه

برای بررسی روایی سازه از تحلیل عاملی تأییدی در چارچوب PLS استفاده شد. تمام بارهای عاملی بالاتر از ۰/۶۵ و میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE)^۴ تمام سازه‌ها بالاتر از ۰/۵ بود که نشان‌دهنده روایی همگرا است. روایی واگرا نیز با معیار فورنل-لارکر^۵ تأیید شد (Fornell & Larcker, 1981).

1. Expert Judgment
2. Content Validity Ratio (CVR)
3. Content Validity Index (CVI)
4. Average Variance Extracted (AVE)
5. Fornell-Larcker criterion

(ج) پایایی

برای سنجش پایایی درونی، از ضریب آلفای کرونباخ^۱ استفاده شد که میزان همبستگی درونی گویه‌های مربوط به هر سازه را نشان می‌دهد. مطابق با معیار نانالی و برنشتاین (۱۹۹۴)، مقادیر بالاتر از ۰/۷۰ قابل قبول، بالاتر از ۰/۸۰ خوب و بالاتر از ۰/۹۰ عالی تلقی می‌شود (Nunnally & Bernstein, 1994). نتایج محاسبه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که تمامی ابعاد پرسش‌نامه دارای آلفایی بالاتر از ۰/۸۲ هستند و آلفای کل ابزار برابر با ۰/۹۱ به دست آمده است. این مقدار بیانگر پایایی بسیار بالا و ثبات نتایج در اندازه‌گیری تکراری است.

جدول ۱. ضریب آلفای کرونباخ برای ابعاد پرسش‌نامه

بعد	تعداد گویه‌ها	آلفای کرونباخ	تفسیر پایایی
بهره‌وری منابع	۷	۰/۸۴	خوب
مصرف انرژی	۶	۰/۸۸	عالی
نظارت محیط‌زیستی	۶	۰/۹۰	عالی
کاهش پسماند ساختمانی (متغیر وابسته)	۷	۰/۸۲	خوب
کل پرسش‌نامه	۲۶	۰/۹۱	عالی

این نتایج نشان می‌دهد ابزار پژوهش از انسجام درونی مطلوبی برخوردار است و پاسخ‌دهندگان در پاسخ به گویه‌های هر بعد از سازگاری شناختی و رفتاری بالایی برخوردار بوده‌اند.

– اطلاعات پرسش‌نامه

پرسش‌نامه شامل دو بخش بود:

الف) اطلاعات جمعیت‌شناختی: شامل اطلاعات پایه‌ای پاسخ‌دهندگان نظیر سن، میزان تحصیلات، سابقه کاری، نقش سازمانی و نوع پروژه محل فعالیت.

ب) گویه‌های تخصصی: شامل ۲۶ گویه بر اساس طیف لیکرت ۵ درجه (۱ = کاملاً مخالف تا ۵ = کاملاً موافق) و شامل چهار سازه اصلی. تمام گویه‌ها از مطالعات معتبر همچون (Solano Meza et al., 2023; Cha et al., 2020; Ghahramani et al., 2023) اقتباس و بومی‌سازی شدند. جدول ۲ سازه‌ها و گویه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. سازه‌های گویه‌ها و منابع پرسش‌نامه

سازه	گویه	منبع
بهره‌وری منابع (RE)	RE1: استفاده از AI موجب کاهش دوباره‌کاری در فرایند تفکیک و بازیافت پسماند ساختمانی می‌شود.	Solano Meza et al. (2023)
	RE2: الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند الگوهای تولید نخاله را پیش‌بینی کنند.	Cha et al. (2020)
	RE3: هوش مصنوعی می‌تواند ترکیب پسماند ساختمانی را با دقت بالا شناسایی کند.	Adeleke et al. (2021)
	RE4: استفاده از AI به بهبود کارایی تجهیزات بازیافت کمک می‌کند.	Ghahramani et al. (2023)
	RE5: AI باعث افزایش نرخ بازیافت مصالح ساختمانی می‌شود.	Kumar. (2025)
	RE6: سیستم‌های هوشمند باعث کاهش حجم نخاله دفنی می‌شوند.	Solano Meza et al. (2023)
	RE7: فناوری هوشمند در تخصیص منابع عملیات حمل، کارایی را افزایش می‌دهد.	Adeleke et al. (2021)
مصرف انرژی (EN)	EN1: الگوریتم‌های AI الگوی مصرف انرژی در مراکز پردازش را بهینه می‌کنند.	Zhang et al. (2024)
	EN2: مصرف انرژی تجهیزات جداسازی پسماند را کاهش می‌دهد.	Ghahramani et al. (2023)
	EN3: مسیریابی هوشمند باعث کاهش مصرف سوخت ناوگان حمل نخاله می‌شود.	Cha et al. (2023)
	EN4: سیستم‌های پیش‌بینی هوشمند می‌توانند زمان بهینه فعالیت تجهیزات را مشخص کنند.	Adeleke et al. (2021)

1. Cronbach's Alpha

جدول ۲. سازه‌های گویه‌ها و منابع پرسش‌نامه

منبع	گویه	سازه
Cha et al. (2023)	EN5: استفاده از AI در تجهیزات بازیافت موجب صرفه‌جویی انرژی می‌شود.	نظارت محیط‌زیستی (ENV)
Zhang et al. (2024)	EN6: هوش مصنوعی شدت مصرف انرژی را در مراحل بارگذاری و انتقال کاهش می‌دهد.	
Felici-Castell et al., 2023	ENV1: حسگرهای هوشمند مبتنی بر AI شرایط محیطی مراکز دفن نخاله را پایش می‌کنند.	
Freire et al. (2025)	ENV2: AI قادر است انتشار گرد و غبار و آلودگی ناشی از نخاله را پیش‌بینی کند.	
Felici-Castell et al., 2023	ENV3: سیستم‌های هوشمند شیره‌زایی در محل‌های دیو را ارزیابی می‌کنند.	
Freire et al. (2025)	ENV4: AI تغییرات دمایی و خطرات ناشی از واکنش‌های شیمیایی مصالح را تشخیص می‌دهد.	
Ghahramani et al. (2023)	ENV5: مدل‌های هوشمند می‌توانند مناطق با ریسک آلودگی بالاتر را مشخص کنند.	کاهش پسماند ساختمانی (CDW)
Zhang et al. (2024)	ENV6: AI اطلاعات محیط‌زیستی را تجزیه و تحلیل کرده و به تصمیم‌سازی کمک می‌کند.	
Solano Meza et al. (2023)	CDW1: AI به کاهش حجم نخاله تولیدی کمک می‌کند.	
Kumar. (2025)	CDW2: استفاده از الگوریتم‌های AI فرایند بازیافت را تسهیل می‌کند.	
Adeleke et al. (2021)	CDW3: پیش‌بینی دقیق تولید نخاله به کاهش اتلاف مواد کمک می‌کند.	
Cha et al. (2023)	CDW4: AI موجب مدیریت بهتر مصالح باقیمانده پروژه‌ها می‌شود.	
Ghahramani et al. (2023)	CDW5: سیستم‌های هوشمند از دفن غیرضروری نخاله جلوگیری می‌کنند.	
Zhang et al. (2024)	CDW6: استفاده از AI بهره‌وری جریان کار را افزایش و حجم پسماند را کاهش می‌دهد.	
Kumar. (2025)	CDW7: هوش مصنوعی در تفکیک اولیه مصالح ضایعاتی مؤثر است.	

– روش تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای SMART-PLS 4 و SPSS 26 استفاده شد. فرآیند تحلیل شامل مراحل زیر بود:

- بررسی نرمال بودن داده‌ها، تشخیص داده‌های پرت و آزمون هم‌خطی
- تحلیل مدل اندازه‌گیری شامل بررسی بارهای عاملی، AVE
- تحلیل مدل ساختاری شامل ضرایب مسیر، مقادیر t
- آزمون معناداری مسیرها

– منطق انتخاب روش PLS-SEM

انتخاب PLS نسبت به روش‌های کوواریانس‌محور به سه دلیل انجام شد:

- وجود متغیرهای پنهان و چندبعدی (مانند بهره‌وری منابع و نظارت محیط‌زیستی)
- ماهیت پیش‌بینی‌محور مدل و تمرکز بر سازه «کاهش پسماند ساختمانی»
- حجم نمونه متوسط و نیاز به توزیع غیربرخوردار (Hair et al., 2019)

یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) ارائه شده است. هدف این تحلیل، بررسی سازوکارهای اثرگذاری هوش مصنوعی بر بهره‌وری منابع، مصرف انرژی، نظارت محیط‌زیستی و در نهایت کاهش پسماند جامد ساختمانی است. ارزیابی مدل شامل دو مرحله است: مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری.

ارزیابی مدل اندازه‌گیری

روایی همگرا

روایی همگرا بر اساس بارهای عاملی و میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) ارزیابی شد. طبق جدول ۳، تمامی بارهای عاملی بالاتر

از ۰/۷۰ و تمامی مقادیر AVE بالاتر از ۰/۵۰ هستند؛ بنابراین روایی همگرا برای تمام سازه‌ها تأیید می‌شود.

جدول ۳. بارهای عاملی و میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE)، (منبع: یافته‌های تحقیق)

ابعاد	شاخص	بار عاملی	مقدار t	AVE
بهره‌وری مبتنی بر هوش مصنوعی	بهینه‌سازی انرژی	۰/۸۴	۱۴/۳۲	۰/۶۷
	کاهش مصرف آب	۰/۸۱	۱۳/۹۵	
	بهبود بهره‌وری مواد	۰/۷۹	۱۳/۱۲	
مصرف انرژی هوش مصنوعی	آموزش مدل هوش مصنوعی برای مصرف انرژی	۰/۸۵	۱۵/۴۷	۰/۶۵
	مصرف انرژی مداوم سیستم هوش مصنوعی	۰/۸۰	۱۳/۸۹	
	دقت داده‌های محیطی در لحظه	۰/۸۳	۱۴/۶۵	
پایش محیطی	تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده برای انتشار گازهای گلخانه‌ای	۰/۷۸	۱۳/۲۵	۰/۶۶
کاهش پسماند جامد	تفکیک زباله	۰/۸۶	۱۵/۷۸	۰/۶۸
	اهمیت بازیافت	۰/۸۲	۱۴/۵۳	
	دفن پسماند	۰/۸۱	۱۳/۷۶	

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مقادیر AVE برای همه متغیرهای پنهان از آستانه ۰/۵۰ فراتر رفته است که نشان‌دهنده اعتبار همگرایی کافی است.

روایی واگرا^۱

روایی واگرا با معیار فورنل - لارکر سنجیده شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، جذر AVE (قطر اصلی) بزرگ‌تر از همبستگی میان سازه‌ها است؛ بنابراین روایی واگرا تأیید می‌شود.

جدول ۴. معیار فورنل - لارکر برای اعتبار تشخیصی، (منبع: یافته‌های تحقیق)

ابعاد	بهره‌وری منابع	مصرف انرژی	نظارت	کاهش پسماند جامد
هوش مصنوعی منابع بهره‌وری	۰/۸۲	۰/۳۴	۰/۴۵	۰/۴۹
مصرف انرژی هوش مصنوعی	۰/۳۴	۰/۸۱	۰/۳۲	۰/۲۹
پایش محیطی	۰/۴۵	۰/۳۲	۰/۸۱	۰/۵۳
کاهش پسماند جامد	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۵۳	۰/۸۳

عناصر قطری (ریشه دوم AVE) بزرگ‌تر از همبستگی‌های غیرقطری است که تأییدکننده اعتبار تشخیصی می‌باشد.

ارزیابی مدل ساختاری

بعد از این که مدل اندازه‌گیری تأیید شد، مدل ساختاری مورد بررسی قرار گرفت تا روابط فرضی را تحلیل کند. برای سنجش فرضیه‌ها، ضرایب مسیر، مقادیر t و مقادیر p محاسبه شد و برازش مدل با استفاده از ریشه میانگین مربعات باقی‌مانده استاندارد (SRMR)^۲ و شاخص برازش هنجاری (NFI)^۳ در جدول ۵ مورد ارزیابی قرار گرفت.

1. Discriminant Validity
2. Standardized Root Mean Square Residual
3. Normed Fit Index

جدول ۵. ضرایب مسیر و سطوح اهمیت (منبع: یافته‌های تحقیق)

میزان تأثیر	مقدار p	مقدار t	ضریب مسیر (β)	رابطه فرضیه‌ها
زیاد	$0.001 >$	۱۲/۳۴	-0.48	فرضیه ۱: بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی: پایداری محیط‌زیستی
کم	$0.05 >$	۷/۲۹	-0.28	فرضیه ۲: مصرف انرژی هوش مصنوعی: پایداری محیط‌زیستی
زیاد	$0.001 >$	۱۱/۲۱	-0.52	فرضیه ۳: پایش محیطی هوش مصنوعی: کاهش پسماند
زیاد	$0.001 >$	۹/۸۸	-0.45	فرضیه ۴: ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای صنعتی: کاهش تخلیه منابع

تفسیر نتایج

نتیجه اول. بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی اثر مثبت و قوی بر کاهش پسماند ساختمانی دارد ($\beta = 0.48$). این موضوع نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف انرژی، آب و مواد توسط سیستم‌های هوش مصنوعی، کاهش مستقیم پسماند را به دنبال دارد.

نتیجه دوم. مصرف انرژی هوش مصنوعی اثر منفی بر پایداری دارد ($\beta = -0.28$). این یافته با مطالعاتی که به مصرف انرژی بالای مدل‌های یادگیری ماشین در فاز آموزش اشاره کرده‌اند همسو است.

نتیجه سوم. نظارت هوشمند محیط‌زیستی بیشترین تأثیر را بر کاهش پسماند دارد ($\beta = 0.52$). این سازه نقش کلیدی هوش مصنوعی در پایش لحظه‌ای پسماندهای ساختمانی را نشان می‌دهد.

نتیجه چهارم. ادغام هوش مصنوعی در فرآیندهای صنعتی منجر به کاهش استفاده از منابع می‌شود ($\beta = 0.45$). این نتیجه نشان می‌دهد که کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین در فرآیندهای بازیافت، جداسازی و مدیریت عملیات، منجر به کاهش پسماند و مصرف مواد می‌شود.

تحلیل همبستگی (روایی منفک تکمیلی)

جدول ۶ ضرایب همبستگی اسپیرمن و شاخص روایی منفک را نمایش می‌دهد. ریشه دوم میانگین واریانس تبیین شده، قطر اصلی این ماتریس را تشکیل می‌دهد. برای تأیید روایی منفک، باید مقدار هر یک از ضرایب همبستگی مرتبط با آن متغیر بیش از AVE باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، مقادیر در قطر اصلی بیشترین میزان را دارند که این موضوع نشان‌دهنده روایی مناسب سازه‌ها است.

جدول ۶. ضرایب همبستگی اسپیرمن و شاخص روایی منفک، (منبع: یافته‌های تحقیق)

شاخص محیطی	شاخص محیط‌زیستی	نظارت بر محیط‌زیست	کاهش پسماند جامد	مصرف انرژی هوش مصنوعی	بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی	
					۱	بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی
				۱	0.801^{***}	مصرف انرژی هوش مصنوعی
			۱	0.821^{***}	0.695^{***}	کاهش پسماند جامد
		۱	0.949^{***}	0.846^{***}	0.703^{***}	نظارت بر محیط‌زیست
	۱	-0.061	-0.054	-0.082	-0.022	شاخص محیط‌زیستی
۱	-0.109^{**}	0.746^{***}	0.711^{***}	0.917^{***}	0.772^{***}	شاخص محیطی

نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که تمامی متغیرهای محیط‌زیستی و شرایط محیطی با همه مؤلفه‌های هوش مصنوعی ارتباط دارند $P < 0.05$ ؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شاخص‌های محیط‌زیستی با شاخص‌های هوش مصنوعی رابطه مثبت دارند و این روابط در سطح اطمینان حداقل ۹۵ درصد تأیید می‌شوند. تمامی روابط به‌دست آمده نشان از ارتباط مثبت دارند که بیانگر این است که افزایش هر یک از شاخص‌های هوش مصنوعی با رشد شاخص‌های پایداری محیط‌زیستی در ارتباط است و بالعکس. بررسی ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که نظارت بر محیط‌زیست قوی‌ترین رابطه را با شاخص مصرف انرژی هوش مصنوعی ($r = 0.917$) دارد و پس از آن با شاخص بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی ($r = 0.772$) ارتباط دارد.

شاخص‌های برازش مدل

شاخص‌های برازش مدل در جدول (۷)، کفایت مدل ساختاری را تأیید می‌کنند.

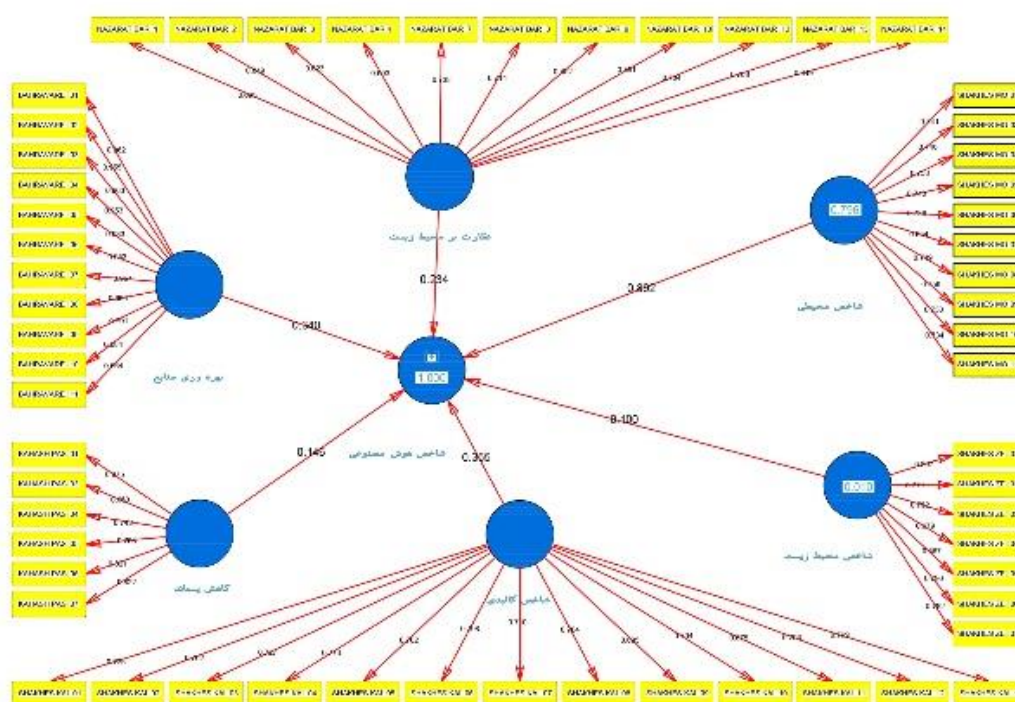
جدول ۷. شاخص‌های برازش مدل، (منبع: یافته‌های تحقیق)

شاخص برازش	ارزش	آستانه	تفسیر
جذر میانگین مربعات باقیمانده استاندارد شده (SRMR)	۰/۰۵۳	< ۰/۰۸	تناسب خوب
شاخص برازش هنجار شده (NFI)	۰/۹۱	> ۰/۹۰	تناسب قابل قبول

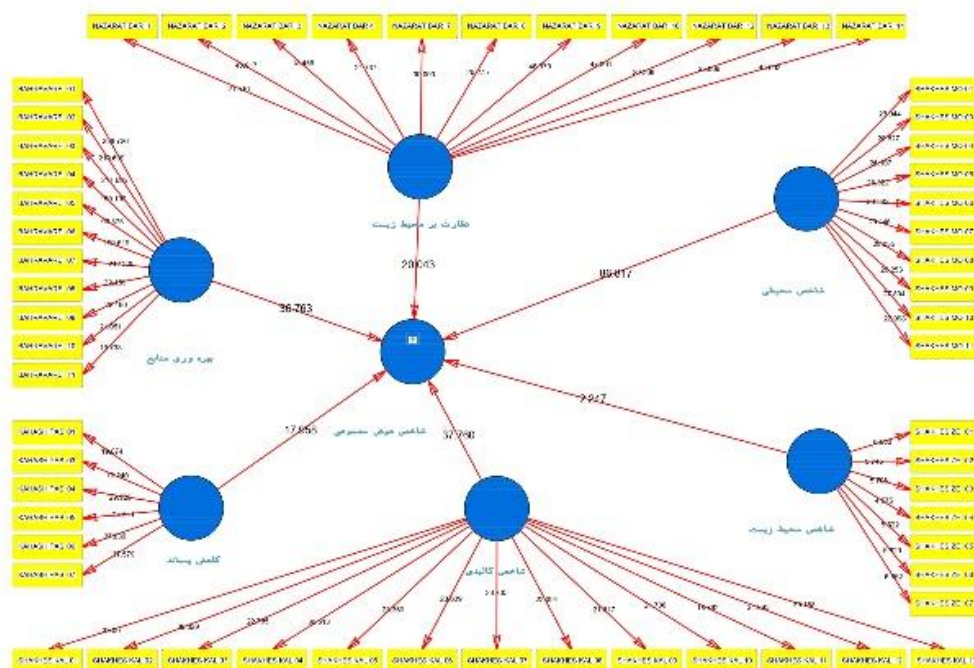
همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، مقدار SRMR برابر با ۰/۰۵۳ نشان دهنده برازش خوب مدل است و مقدار NFI برابر با ۰/۹۱ نشان‌دهنده برازش قابل قبول بین مدل فرضی و داده‌های مشاهده شده است.

بررسی اعتبار شاخص‌های هوش مصنوعی و پایداری محیط زیست

پس از آن که ابزارهای سنجش و ساختارهای تحقیق از نظر اعتبار و قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفتند (مدل بیرونی)، لازم است تا فرضیه‌ها و روابط میان متغیرهای پنهان (مدل درونی) مورد آزمایش قرار گیرند. در شکل ۲ مدل اندازه‌گیری در حالت ضرایب استاندارد و شکل ۳ مقادیر t و معناداری مسیرها نمایش داده شده است.



شکل ۲. مدل اندازه‌گیری ضرایب مسیر و بارهای عاملی در حالت ضرایب استاندارد، (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۳. ضرایب معناداری مسیر (T-Values) شاخص‌های پژوهش (منبع: یافته‌های تحقیق)

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری هوش مصنوعی در مدیریت پسماند ساختمانی می‌تواند به شکل معناداری عملکرد محیط‌زیستی پروژه‌ها را بهبود بخشد. تحلیل مدل‌سازی معادلات ساختاری (PLS-SEM) نشان داد که سه سازه کلیدی - بهره‌وری منابع، مصرف انرژی و نظارت محیط‌زیستی - نقش میانجی عمده‌ای در نحوه اثرگذاری هوش مصنوعی بر کاهش پسماند ایفا می‌کنند.

نتایج به‌دست آمده نشان داد که بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی بیشترین اثر مستقیم را بر کاهش پسماند ساختمانی دارد. بهینه‌سازی مصرف مواد، آب و انرژی از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین موجب کاهش ضایعات، افزایش استفاده مجدد و مدیریت کارآمدتر مواد ساختمانی در چرخه عمر پروژه می‌شود. این نتیجه بیانگر آن است که فناوری‌های هوش مصنوعی نه تنها قابلیت پیش‌بینی و تصمیم‌یار دارند، بلکه می‌توانند با اصلاح فرایندها، از بروز پسماند جلوگیری کنند و در طول زمان منجر به کاهش بار محیط‌زیستی پروژه‌ها شوند. نتایج مرتبط با مصرف انرژی هوش مصنوعی نشان داد که اگرچه این فناوری‌ها امکان ارتقای عملکرد محیط‌زیستی را فراهم می‌کنند، اما مصرف انرژی بالای آنها - به‌ویژه در مرحله آموزش مدل‌ها - می‌تواند اثر منفی بر پایداری داشته باشد. این یافته بر لزوم توجه به توسعه مدل‌های کم‌مصرف و معماری‌های بهینه هوش مصنوعی در کاربردهای صنعت ساخت تأکید می‌کند.

یافته‌ها نشان داد که نظارت محیط‌زیستی مبتنی بر هوش مصنوعی اثر مثبت و قوی بر کاهش پسماند دارد. فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، بینایی ماشین و حسگرهای هوشمند توانایی پایش لحظه‌ای پسماند، تشخیص تخطی از استانداردهای دفع، و پیش‌بینی تولید پسماند را دارند. این قابلیت‌ها مدیران پروژه را قادر می‌سازد تا مداخلات سریع، دقیق و مبتنی بر داده انجام دهند و از شکل‌گیری پسماند اضافی جلوگیری کنند. در نهایت، تأثیر مثبت ادغام هوش مصنوعی در فرایندهای صنعتی و عملیاتی پروژه‌ها بر کاهش مصرف منابع تأیید شد. همگرا شدن فرایندهای ساخت با تحلیل‌های داده‌محور، موجب افزایش دقت، کاهش دوباره‌کاری، و بهبود کارایی عملیات مرتبط با مدیریت پسماند ساختمانی می‌شود.

به‌صورت کلی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که هوش مصنوعی یک ابزار قدرتمند برای حرکت از مدیریت سنتی پسماند به سمت مدیریت هوشمند و پیش‌بینی‌محور است. با این حال، کارایی این فناوری در گرو توجه هم‌زمان به چالش‌های مصرف انرژی و زیرساخت‌های لازم برای استقرار آن است. نتایج این پژوهش تصویری روشن از مسیرهای اثرگذاری هوش مصنوعی ارائه می‌دهد و

مبنایی برای تصمیم‌سازی مدیران شهری، سیاست‌گذاران و فعالان صنعت ساخت برای توسعه سیستم‌های مدیریت پسماند کارآمدتر فراهم می‌سازد.

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل داده‌های میدانی در شهر اصفهان، می‌توان گفت که به‌کارگیری هوش مصنوعی، در صورت توجه هم‌زمان به بهره‌وری منابع و پیامدهای انرژی بر آن، ظرفیت واقعی برای بهبود پایداری محیط‌زیستی و کاهش پسماندهای ساختمانی دارد؛ یافته‌ای که با جریان اصلی ادبیات روز همسو است و در عین حال ابعاد جدیدی را در زمینه نقش سیستم‌های هوشمند در کاهش پسماند و بهینه‌سازی منابع روشن می‌سازد.

نخست، تأیید فرضیه مرتبط با بهره‌وری منابع مبتنی بر هوش مصنوعی نشان می‌دهد که فناوری‌های داده‌محور می‌توانند با کاهش اتلاف مواد، انرژی و آب، عملکرد محیط‌زیستی پروژه‌های ساختمانی را بهبود دهند. این یافته با نتایج (Jones (2024 و Pérez-Pérez و همکاران (2021) که هوش مصنوعی را عامل کلیدی در تصمیم‌سازی بهینه منابع می‌دانند، همخوان است. بهینه‌سازی مصرف منابع در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه در مراحل طراحی، برنامه‌ریزی و مدیریت موجودی مواد می‌تواند حجم پسماند اولیه را پیش از شکل‌گیری کاهش دهد، که این امر نقش پیشگیرانه هوش مصنوعی در چرخه مدیریت پسماند را برجسته می‌کند.

دوم، اثر منفی مصرف انرژی هوش مصنوعی بر پایداری یکی از مهم‌ترین نتایج این مطالعه است. در حالی که هوش مصنوعی به‌طور مستقیم منجر به کاهش پسماند و بهبود نظارت محیطی می‌شود، مصرف انرژی قابل‌توجه آن (به‌ویژه در مدل‌های یادگیری عمیق) می‌تواند بخشی از این دستاوردهای محیط‌زیستی را خنثی کند. این یافته در راستای نگرانی‌هایی است که اشتروبل^۱ و همکاران (۲۰۲۰) مطرح کرده‌اند و نشان می‌دهد که لازم است مدل‌های هوش مصنوعی کارآمدتر، کم‌مصرف‌تر یا مبتنی بر پردازش لبه‌ای توسعه یابند. در زمینه مدیریت پسماند ساختمانی، این تضاد اهمیت بیشتری می‌یابد؛ چرا که هدف اصلی سیستم، کاهش اثرات محیط‌زیستی است و افزایش مصرف انرژی هوش مصنوعی نباید به عاملی برای نقض این هدف تبدیل شود.

سوم، نتایج مرتبط با نظارت محیطی مبتنی بر هوش مصنوعی که اثر قوی آن بر کاهش پسماند را تأیید می‌کند، با ادبیات مربوط به نقش سیستم‌های بینایی ماشین و حسگرهای هوشمند در پایش لحظه‌ای محیط، هم‌راستا است. این سیستم‌ها توانایی شناسایی پسماندهای خطرناک، جلوگیری از رهاسازی غیرقانونی، و پایش مستمر کیفیت هوا و آب در محیط‌های عمرانی را دارند. یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های مارتینز-براوو^۲ و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر نقش سیستم‌های هوشمند در کاهش آلودگی و ارتقای کنترل‌های محیطی کاملاً همخوان است. این نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری هوش مصنوعی در کارخانه‌ها، کارگاه‌های ساختمانی و واحدهای دفع پسماند می‌تواند میزان مداخله انسانی را کاهش داده و نظارت مؤثرتر و سریع‌تری را امکان‌پذیر کند.

چهارم، ادغام هوش مصنوعی در فرایندهای صنعتی که باعث کاهش تخلیه منابع شده است، نشان می‌دهد که فناوری‌های هوشمند می‌توانند در تمامی مراحل چرخه عمر پروژه‌های ساختمانی^۳ نقش اصلاح‌کننده داشته باشند. این یافته با مطالعات بروکس^۴ و همکاران (۲۰۱۲) هم‌خوانی دارد که اثربخشی هوش مصنوعی در کاهش ضایعات عملیاتی و بهبود راندمان تولید را تأیید می‌کنند. ایجاد فرایندهای خودکار، پیش‌بینی خرابی تجهیزات، و بهینه‌سازی زنجیره تأمین از طریق مدل‌های پیش‌بینی‌گر، همگی ابزارهایی هستند که می‌توانند مصرف مواد را کاهش داده و از تولید پسماند اضافی جلوگیری کنند.

از دیدگاه کلی، این پژوهش نشان می‌دهد که مزایای فناوریانه هوش مصنوعی بسیار گسترده است، اما چالش مصرف انرژی یک مانع ساختاری به شمار می‌رود. بنابراین، دستیابی به منافع خالص محیط‌زیستی در گرو ایجاد تعادل میان ظرفیت هوش مصنوعی در بهبود پایداری و هزینه انرژی آن است. برای حل این چالش، توسعه معماری‌های سبز هوش مصنوعی، استفاده از انرژی تجدیدپذیر در مراکز

1. Strubell

2. Martínez-Bravo

3. From Extraction to Demolition

4. Brooks

داده، و ایجاد استانداردهایی برای طراحی سیستم‌های کم‌مصرف ضروری است.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که دولت‌ها باید به توسعه چارچوب‌هایی کمک کنند که پذیرش فناوری‌های هوش مصنوعی در صنعت ساخت و مدیریت پسماند را تسهیل کرده و در عین حال استفاده مسئولانه از آن را تضمین نمایند. ادغام هوش مصنوعی در سیستم‌های نظارت شهری، تقویت زیرساخت‌های داده‌ای، و ترویج آموزش‌های مربوط به هوش مصنوعی سبب از جمله اقدامات لازم برای بهره‌برداری پایدار از این فناوری‌ها است.

در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به شکل معناداری عملکرد محیط‌زیستی حوزه پسماند ساختمانی را ارتقا دهد، اما این مسیر تنها زمانی پایدار خواهد بود که چالش مصرف انرژی و الزامات زیرساختی به موازات توسعه و به‌کارگیری سیستم‌های هوشمند مورد توجه قرار گیرد.

نوآوری پژوهش

این پژوهش چندین نوآوری اساسی دارد که آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد و ارزش علمی آن را در سطح بین‌المللی ارتقا می‌دهد:

ارائه یک مدل تجربی یکپارچه برای مدیریت پسماند ساختمانی و تخریب (CDW) مبتنی بر هوش مصنوعی؛ برخلاف مطالعات پیشین که هر یک تنها بر یک مؤلفه (مانند پیش‌بینی حجم پسماند، تفکیک هوشمند یا نظارت محیطی) تمرکز داشتند، این پژوهش سه سازه کلیدی «بهره‌وری منابع»، «مصرف انرژی»، و «نظارت محیط‌زیستی» را به‌طور هم‌زمان در یک چارچوب مفهومی تلفیقی بررسی می‌کند. این مدل جامع، امکان تحلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم هوش مصنوعی بر کاهش CDW را فراهم می‌سازد.

تمرکز بر بستر ملی ایران و مطالعه موردی شهر اصفهان؛ در ادبیات پژوهشی بین‌المللی، مطالعات اندکی به بررسی نقش هوش مصنوعی در مدیریت پسماند ساختمانی در کشورهای در حال توسعه پرداخته‌اند. این مطالعه با تمرکز بر کلان‌شهر اصفهان، شکاف پژوهشی موجود را پر کرده و شواهد تجربی بومی ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای سیاست‌گذاری شهری در ایران و سایر کشورهای مشابه باشد.

ترکیب روش‌های کمی پیشرفته با داده‌های واقعی؛ استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) برای تحلیل روابط میان سازه‌ها، همراه با داده‌های جمع‌آوری شده از ۳۳۳ متخصص فعال در حوزه مدیریت پسماند، پیمانکاران و مهندسان، اعتبار علمی و کاربردی نتایج را افزایش داده است. این ترکیب به ندرت در مطالعات پیشین دیده می‌شود.

تبیین دوگانگی اثرات هوش مصنوعی بر پایداری محیط‌زیستی نوآوری دیگر این پژوهش، بررسی هم‌زمان اثرات مثبت (بهره‌وری منابع و نظارت محیطی) و منفی (مصرف انرژی بالا) هوش مصنوعی است. این رویکرد دوگانه، دیدگاهی واقع‌بینانه و متوازن ارائه می‌دهد که می‌تواند به تدوین سیاست‌های مسئولانه و پایدار در حوزه فناوری کمک کند.

محدودیت‌ها و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

این پژوهش یافته‌های معناداری درباره نقش دوگانه هوش مصنوعی در ارتقای پایداری محیط‌زیستی در صنعت ساخت‌وساز ارائه می‌کند؛ با این حال، چند محدودیت باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. نخست آن که داده‌ها از طریق پرسش‌نامه‌های خوداظهاری جمع‌آوری شده است و این امر احتمال بروز سوگیری ادراکی و خطای روش مشترک را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، به دلیل ماهیت مقطعی پژوهش، امکان استنتاج روابط علی محدود بوده و نتایج صرفاً نشان‌دهنده ارتباط میان سازه‌ها در یک مقطع زمانی مشخص است. علاوه بر این، استفاده از نمونه‌گیری هدفمند و تمرکز پژوهش بر ذی‌نفعان صنعت ساخت‌وساز در شهر اصفهان، دامنه تعمیم‌پذیری نتایج را برای سایر مناطق، صنایع یا شرایط نهادی کاهش می‌دهد. محدودیت دیگر مربوط به سنجش مصرف انرژی ناشی از کاربردهای هوش مصنوعی است که بر برداشت پاسخ‌دهندگان تکیه دارد و لزوماً معادل شاخص‌های واقعی مصرف انرژی یا انتشار کربن سیستم‌های هوشمند نیست.

پژوهش‌های آینده می‌توانند این محدودیت‌ها را به شیوه‌های مختلف رفع یا کاهش دهند. استفاده از طرح‌های طولی یا داده‌های پانل می‌تواند امکان تحلیل روابط علی و ارزیابی پایداری اثرات هوش مصنوعی در بازه‌های زمانی بلندمدت را فراهم سازد. همچنین به‌کارگیری داده‌های تجربی و عملیاتی (از جمله شاخص‌های واقعی مصرف انرژی، شدت انتشار کربن یا بازدهی سیستم‌های مبتنی بر AI) می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از پیامدهای مثبت و منفی فناوری ارائه دهد. مطالعات آتی همچنین می‌توانند از مدل‌های پیچیده‌تر بهره‌گیرند و نقش متغیرهای میانجی و تعدیل‌گر، همچون سطح بلوغ دیجیتال سازمان‌ها، میزان بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، نوع پروژه ساختمانی، یا چارچوب‌های تنظیم‌گری را در تقویت یا تضعیف اثرات محیط‌زیستی هوش مصنوعی بررسی کنند.

در نهایت، پژوهش‌های مقایسه‌ای میان شهرها یا کشورهایی با ساختارهای نهادی، زیرساخت‌های فناورانه و سیاست‌های پایداری متفاوت می‌تواند به درک عمیق‌تری از عوامل زمینه‌ای مؤثر بر موفقیت کاربردهای هوش مصنوعی بینجامد. چنین مطالعاتی امکان توسعه چارچوب‌های جامع، مبتنی بر شواهد و قابل تعمیم برای بهره‌برداری پایدار، کم‌مصرف و مسئولانه از هوش مصنوعی در صنعت ساخت‌وساز را فراهم خواهد کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان این پژوهش تمامی اصول اخلاقی مرتبط با انجام و انتشار تحقیقات علمی را رعایت کرده‌اند. این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: محمد رضا طباطبایی، تهیه گزارش پژوهش: محمد رضا طباطبایی، هادی شکیبازاهد، تحلیل داده‌ها: هادی شکیبازاهد، محمد رضا طباطبایی

تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع در ارتباط با این مقاله وجود ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از داوران محترم مجله به‌خاطر ارائه نکات ساختاری و علمی ارزشمند که موجب ارتقای کیفیت مقاله شد، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

References

- Amin, S., Khandaker, M. K., Jannat, J., Khan, F., & Rahman, S. Z. (2023). Cooperative environmental governance in urban South Asia: implications for municipal waste management and waste-to-energy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(26), 69550-69563. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27152-5>
- Adeleke, O., Akinlabi, S. A., Jen, T. C., & Dunmade, I. (2021). Application of artificial neural networks for predicting the physical composition of municipal solid waste: An assessment of the impact of seasonal variation. *Waste Management & Research*, 39(8), 1058-1068. <https://doi.org/10.1177/0734242X21991642>
- Brooks, S., Wang, X., & Sarker, S. (2012). Unpacking green IS: a review of the existing literature and directions for the future. *Green business process management: Towards the sustainable enterprise*, 15-37. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27488-6_2
- Bang, S., & Andersen, B. S. (2022). Utilising artificial intelligence in construction site waste reduction. <https://doi.org/10.32738/JEPPM-2022-0022>
- Babu Kumar, S. (2025). Deep Learning in Waste Management and Recycling in Digital Smart City. *Resilient Community Microgrids*, 271-288. <https://doi.org/10.1002/9781394272549.ch11>
- Cha, G. W., Moon, H. J., Kim, Y. M., Hong, W. H., Hwang, J. H., Park, W. J., & Kim, Y. C. (2020). Development of a prediction model for demolition waste generation using a random forest algorithm based on small datasets. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 6997. <https://doi.org/10.3390/ijerph17196997>
- Cha, G. W., Choi, S. H., Hong, W. H., & Park, C. W. (2023). Developing a prediction model of demolition-waste generation-rate via principal component analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3159. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043159>
- del Mar Martínez-Bravo, M., Martínez-del-Río, J., & Antolín-López, R. (2019). Trade-offs among urban sustainability, pollution and livability in European cities. *Journal of cleaner production*, 224, 651-660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.110>
- Felici-Castell, S., Segura-Garcia, J., Perez-Solano, J. J., Fayos-Jordan, R., Soriano-Asensi, A., & Alcaraz-Calero, J. M. (2023). AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems. *Sensors*, 23(23), 9585. <https://doi.org/10.3390/s23239585>
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of marketing research*, 18(1), 39-50. <https://doi.org/10.1177/002224378101800104>
- Ghahramani, M., Habibi, D., Ghahramani, M., Nazari-Heris, M., & Aziz, A. (2023). Sustainable buildings: a comprehensive review and classification of challenges and issues, benefits, and future directions. *Natural Energy, Lighting, and Ventilation in Sustainable Buildings*, 1-28. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41148-9_1
- Gupta, R., Nair, K., Mishra, M., Ibrahim, B., & Bhardwaj, S. (2024). Adoption and impacts of generative artificial intelligence: Theoretical underpinnings and research agenda. *International Journal of Information Management Data Insights*, 4(1), 100232. <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2024.100232>
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European business review*, 31(1), 2-24. <https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203>
- Jones, S., McCord, G., Mosnier, A., Godfray, C., & Smith, A. (2024). Achieving global biodiversity targets requires shifting food and land use system trajectories. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13961228>
- Joshi, V., Sharma, A., & Kumar, D. (2021). Optimization Model for Collection and Transportation of Municipal Solid Waste in Jaipur City. *Science & Technology Asia*, 134-142. <https://doi.org/10.14456/scitechasia.2021.73>
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel psychology*, 28(4). <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x>
- Pérez-Pérez, J. F., Parra, J. F., & Serrano-Garcia, J. (2021). A system dynamics model: Transition to sustainable processes. *Technology in Society*, 65, 101579. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101579>
- Solano Meza, J. K., Orjuela Yepes, D., Rodrigo-Illarri, J., & Rodrigo-Clavero, M. E. (2023). Comparative analysis of the implementation of support vector machines and long short-term memory artificial neural networks in municipal solid waste management models in megacities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4256. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054256>
- Waltz, C. F., & Bausell, B. R. (1981). *Nursing research: design statistics and computer analysis*. Davis Fa. <https://doi.org/10.5555/578318>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2020). *Energy and policy considerations for modern deep learning research. Proce AAAI Conf Artif Intell 34 (09): 3693–13696*. <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i09.7123>
- Zhang, T., Jianming, Y., Wang, W., Chen, P., Chen, C., Wu, Z., ... & Yu, Q. (2024). Efficient utilization of waste shield slurry and CDW fines to prepare eco-friendly controlled low-strength material. *Journal of Cleaner Production*, 444, 141343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141343>