The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Artificial Intelligence in Low-Carbon Buildings: A Systematic Review and Integrated Framework

Mojtaba Masoumnezhad[1*] | Minoochehr Marzban[2]

1. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. Email: mmasomnezhad@tvu.ac.ir
2. Department of Architecture, FSh.C., Islamic Azad University, Fouman, Iran. Email: mc_marzban@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 22 June 2026
Revised: 23 July 2026
Accepted: 23 August 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Artificial Intelligence,
Building Energy Efficiency,
Carbon Emissions,
Intelligent Buildings,
Low-Energy Buildings.

ABSTRACT

The growing adoption of artificial intelligence (AI) in buildings has created new opportunities to improve energy efficiency, intelligent control, and carbon emissions reduction. However, the existing literature has largely focused on algorithm development and predictive accuracy, while the relationship between algorithmic performance, system integration, and practical deployment in low-carbon buildings remains insufficiently addressed in a systematic manner. This study aims to identify research trends, application domains, prevailing methods, and existing research gaps, and to develop an integrated framework for the widespread application of AI in low-carbon buildings. Accordingly, 128 studies published between January 2015 and June 2025 were examined by combining systematic review, bibliometric analysis, content analysis, and critical analysis. Quantitative findings showed that energy prediction, with 42 studies (32.8%) , and optimization and control, with 36 studies (28.1%) , were the dominant application domains. Machine learning, with 48 studies (37.5%), accounted for the largest share among the identified method families. Regarding validation approaches, 47 studies (36.7%) were primarily simulation-based, while 35 studies (27.3%) relied on real building data. Qualitative findings indicated that data quality, model generalizability, system integration, implementation feasibility, security and privacy, and economic considerations were among the major challenges. The novelty of this study lies in integrating bibliometric, content-based, and critical evidence into a five-layer integrated framework linking building infrastructure, data, AI, intelligent decision-making, and performance evaluation. Furthermore, preliminary expert-based evaluation indicated the conceptual acceptability and comprehensiveness of the proposed framework; however, its effectiveness and practical implementability at scale require field validation and long-term operational studies.

Cite this article: Masoumnezhad, M. & Marzban, M. (2027). Artificial Intelligence in Low-Carbon Buildings: A Systematic Review and Integrated Framework. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 37-63. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420084.1281

© Authors retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420084.1281

Introduction

Buildings account for nearly one-third of global energy consumption and remain one of the largest contributors to greenhouse gas emissions, making them a strategic priority for achieving carbon neutrality. Although Artificial Intelligence (AI) has demonstrated considerable potential for improving building energy performance, existing studies are largely fragmented, algorithm-oriented, and insufficiently validated under real operating conditions. Consequently, the transition from research outcomes to practical implementation remains limited. This study systematically reviews the current state of AI applications in building energy management, identifies the principal research gaps, and proposes an integrated framework to support the deployment of AI for intelligent low-carbon buildings.

Materials and Methods

A systematic literature review was conducted in accordance with the PRISMA framework. Following a comprehensive screening process, 128 peer-reviewed articles published between 2015 and 2025 were selected for detailed analysis. The reviewed studies were examined with respect to AI techniques, application domains, building types, data sources, validation approaches, and reported energy and carbon performance. Bibliometric and qualitative analyses were combined to identify research trends, thematic evolution, and knowledge gaps. Based on the synthesized evidence, an integrated conceptual framework was developed and subsequently evaluated by 25 experts in building energy management, artificial intelligence, and architectural engineering using a five-point Likert-scale questionnaire.

Results

The review demonstrates that AI research has rapidly evolved from energy prediction toward intelligent optimization, autonomous control, integrated energy management, and carbon reduction. Publications increased markedly after 2022, reflecting growing interest in AI-enabled decarbonization of the built environment. Machine learning remains the dominant analytical approach, while deep learning, reinforcement learning, and hybrid methods are increasingly employed to address complex operational challenges. Energy prediction and optimization constitute the primary application areas, whereas carbon management, intelligent fault diagnosis, and integrated building operation are emerging research directions.

Despite these advances, the analysis reveals five persistent barriers that hinder large-scale implementation: limited model transferability across buildings and climates, inadequate incorporation of occupant behavior, insufficient lifecycle economic evaluation, reliance on simulation rather than long-term operational data, and the absence of integrated assessment considering energy efficiency, carbon emissions, cybersecurity, and privacy. These findings indicate that current research predominantly optimizes isolated algorithms rather than the overall performance of intelligent building ecosystems.

To address these limitations, this study proposes a novel five-layer conceptual framework integrating physical building systems, digital infrastructure, AI analytics, intelligent decision-making, and performance governance within a unified architecture. Unlike previous review studies that primarily emphasize algorithms or individual applications, the proposed framework establishes systematic interactions among building systems, data infrastructure, intelligent control, sustainability assessment, cybersecurity, privacy protection, and continuous feedback mechanisms. Expert evaluation confirmed strong agreement regarding the framework's comprehensiveness, integration capability, practical applicability, sustainability contribution, and governance requirements, demonstrating its scientific robustness and implementation feasibility.

Discussion and Conclusion

The findings confirm that the effectiveness of AI in intelligent buildings depends not only on predictive accuracy but also on data quality, interoperability, operational conditions, occupant interaction, governance, and digital infrastructure. Furthermore, the review identifies an emerging research challenge: the environmental impacts of AI itself, including computational energy demand and the carbon footprint of digital infrastructures, which remain largely neglected in existing studies and highlight the importance of Green AI for future intelligent building research.

The proposed framework directly addresses the identified research gaps by integrating energy optimization, carbon reduction, lifecycle economic assessment, cybersecurity, privacy preservation, and adaptive learning into a single decision-support architecture. Through continuous feedback and periodic model updating, the framework enhances long-term adaptability and supports scalable deployment across diverse building environments. Overall, this research shifts the focus from algorithm-centric optimization toward a holistic socio-technical perspective in which AI functions as an integral component of intelligent building ecosystems. The proposed framework provides a practical roadmap for researchers, practitioners, and policymakers to accelerate the adoption of AI-enabled low-carbon buildings while identifying priorities for future research, including standardized operational datasets, transfer and federated learning, occupant-centric modeling, comprehensive economic assessment, and Green AI-driven sustainable digital infrastructure.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن: مرور نظام‌مند و چارچوب یکپارچه

مجتبی معصوم‌نژاد[۱*] | مینوچهر مرزبان[۲]

۱. نویسندهٔ مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: mmasomnezhad@tvu.ac.ir

۲. گروه معماری، واحد فومن و شفت، دانشگاه آزاد اسلامی، فومن، ایران. رایانامه: mc_marzban@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
انتشار کربن،
بهره‌وری انرژی،
ساختمان‌های هوشمند،
ساختمان‌های کم‌مصرف،
هوش مصنوعی.

چکیده

گسترش هوش مصنوعی در ساختمان‌ها فرصت‌های جدیدی برای بهبود بهره‌وری انرژی، کنترل هوشمند و کاهش انتشار کربن ایجاد کرده است؛ با این‌حال، ادبیات موجود عمدتاً بر توسعه و دقت الگوریتم‌ها متمرکز بوده و ارتباط میان عملکرد الگوریتمی، یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و استقرار عملی در ساختمان‌های کم‌کربن همچنان به طور نظام‌مند تبیین نشده است. این پژوهش با هدف شناسایی روندهای پژوهشی، حوزه‌های کاربرد، روش‌های غالب و شکاف‌های موجود و توسعهٔ یک چارچوب یکپارچه برای کاربرد گستردهٔ هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن انجام شد. در این راستا، ۱۲۸ مطالعهٔ منتشرشده بین ژانویه ۲۰۱۵ و ژوئن ۲۰۲۵ با ترکیب مرور نظام‌مند، تحلیل کتاب‌سنجی، تحلیل محتوایی و تحلیل انتقادی بررسی شدند. نتایج کمی نشان داد پیش‌بینی انرژی با ۴۲ مطالعه (۳۲/۸ درصد) و بهینه‌سازی و کنترل با ۳۶ مطالعه (۲۸/۱ درصد) غالب‌ترین حوزه‌های کاربرد بودند؛ همچنین، یادگیری ماشین با ۴۸ مطالعه (۳۷/۵ درصد) بیشترین سهم را در میان خانواده‌های روش‌ها داشت. از نظر اعتبارسنجی، ۴۷ مطالعه (۳۶/۷ درصد) عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی و ۳۵ مطالعه (۲۷/۳ درصد) مبتنی بر داده‌های واقعی ساختمان بودند. یافته‌های کیفی نشان دادند کیفیت داده، تعمیم‌پذیری مدل‌ها، یکپارچه‌سازی سامانه‌ها، قابلیت پیاده‌سازی، امنیت و حریم خصوصی و ملاحظات اقتصادی از مهم‌ترین چالش‌ها هستند. نوآوری پژوهش در تلفیق شواهد کتاب‌سنجی، محتوایی و انتقادی و تبدیل آن‌ها به یک چارچوب یکپارچهٔ پنج‌لایه برای پیوند زیرساخت ساختمان، داده، هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری هوشمند و ارزیابی عملکرد است. همچنین، ارزیابی اولیهٔ مبتنی بر نظر خبرگان بیانگر مقبولیت و جامعیت مفهومی چارچوب پیشنهادی است؛ با این‌حال، اثربخشی و قابلیت پیاده‌سازی آن در مقیاس واقعی نیازمند اعتبارسنجی میدانی و مطالعات عملیاتی بلندمدت است.

استناد: معصوم‌نژاد، مجتبی و مرزبان، مینوچهر (۱۴۰۵). هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن: مرور نظام‌مند و چارچوب یکپارچه. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۳۷-۶۳

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420084.1281

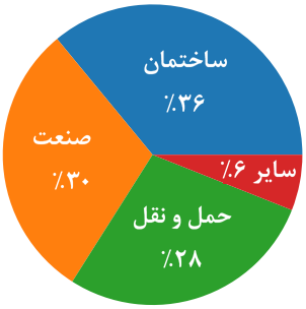
© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.420084.1281

۱. مقدمه

بخش ساختمان یکی از کانون‌های اصلی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان است و تقریباً یک‌سوم تقاضای انرژی جهانی را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. این سهم قابل توجه، ساختمان‌ها را به یکی از حوزه‌های مهم مداخله برای تحقق اهداف کربن‌زدایی و گذار به نظام‌های انرژی پایدار تبدیل کرده است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، سهم بالای مصرف انرژی ساختمان در مقایسه با سایر بخش‌های اقتصادی، ضرورت بازنگری در شیوه‌های سنتی طراحی، بهره‌برداری و مدیریت انرژی ساختمان‌ها را آشکار می‌سازد. هم‌زمان، عواملی مانند رشد شهرنشینی، افزایش سطح انتظارات آسایشی، توسعهٔ ساختمان‌های پیچیده و گسترش تجهیزات انرژی‌بر، موجب افزایش مستمر تقاضای انرژی در این بخش شده است [۲]. از این‌رو، دستیابی به ساختمان‌های کم‌کربن مستلزم توسعهٔ راهکارهایی است که علاوه بر کاهش مصرف انرژی، توانایی سازگاری با شرایط متغیر و پیچیدهٔ بهره‌برداری را نیز داشته باشند.



شکل ۱. سهم مقایسه‌ای بخش ساختمان و سایر بخش‌ها در مصرف انرژی [۱]

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های ساختمانی، تحقق عملکرد انرژی مطلوب در شرایط واقعی همچنان با محدودیت‌های اساسی مواجه است. راهبردهای متداول مدیریت انرژی ساختمان عمدتاً بر مدل‌های ازپیش‌تعریف‌شده، کنترل‌های مبتنی بر قواعد ثابت و تحلیل‌های محدود به شرایط خاص متکی هستند. این روش‌ها اگرچه در شرایط کنترل‌شده عملکرد قابل قبولی دارند، اما در مواجهه با ماهیت پویای ساختمان‌ها، شامل تغییرات اقلیمی، رفتار غیرقابل‌پیش‌بینی کاربران، تغییر الگوهای مصرف و تعامل پیچیده میان سامانه‌های انرژی، انعطاف‌پذیری لازم را ندارند [۳ و ۴]. پیامد این محدودیت، ایجاد شکاف میان عملکرد طراحی‌شده و عملکرد واقعی ساختمان‌ها و در نتیجه، عدم بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های موجود برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن است [۵].

در سال‌های اخیر، تحول دیجیتال در حوزهٔ ساختمان، با توسعهٔ فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، حسگرهای هوشمند، کلان‌داده، رایانش ابری، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و دوقلوهای دیجیتال، فرصت جدیدی برای گذار از مدیریت سنتی انرژی به مدیریت داده‌محور فراهم کرده است [۶]. این فناوری‌ها امکان پایش مستمر عملکرد ساختمان و تولید حجم گسترده‌ای از داده‌های عملیاتی را فراهم کرده‌اند؛ با این‌حال، ارزش واقعی این داده‌ها تنها زمانی آشکار می‌شود که بتوان آن‌ها را به دانش قابل استفاده برای تصمیم‌گیری تبدیل کرد. در این‌زمینه، هوش مصنوعی به عنوان یکی از فناوری‌های مهم توانمندساز، امکان استخراج روابط پیچیده، پیش‌بینی رفتار سامانه‌ها و اتخاذ تصمیم‌های تطبیقی را فراهم می‌کند [۷].

کاربرد هوش مصنوعی در ساختمان‌ها طی سال‌های اخیر از پیش‌بینی مصرف انرژی فراتر رفته و حوزه‌هایی مانند کنترل هوشمند سامانه‌های HVAC، تشخیص خطا، بهینه‌سازی طراحی، مدیریت تقاضا، بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تحلیل رفتار کاربران را دربرگرفته است. مزیت اصلی این فناوری، توانایی آن در یادگیری از داده‌های واقعی و سازگاری با تغییرات محیطی و عملیاتی است؛ قابلیتی که می‌تواند زمینهٔ ارتقای بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و محدودسازی انتشار کربن طی چرخهٔ عمر ساختمان را فراهم کند [۸ و ۹].

با وجود افزایش چشمگیر مطالعات مرتبط با هوش مصنوعی در ساختمان‌ها، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها همچنان بر توسعهٔ مدل، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد الگوریتمی متمرکز است، در حالی که الزامات استقرار واقعی، از جمله کیفیت و

دسترسی به داده‌های عملیاتی، قابلیت انتقال مدل‌ها، سازگاری با زیرساخت‌های موجود، ملاحظات اقتصادی، امنیت داده و پذیرش کاربران، کمتر به صورت یکپارچه بررسی شده‌اند. از این‌رو، شکاف اصلی پژوهش نه در کمبود الگوریتم‌های جدید، بلکه در فقدان رویکردی جامع برای پیوند میان سامانهٔ فیزیکی ساختمان، زیرساخت داده، مدل‌های هوشمند، تصمیم‌گیری، عوامل اقتصادی و انسانی و الزامات پایداری در شرایط واقعی است [۸].

بر همین‌اساس، هدف پژوهش حاضر، ارائهٔ نوعی تحلیل نظام‌مند و انتقادی از نقش هوش مصنوعی در کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن ساختمان‌ها و توسعهٔ یک چارچوب مفهومی برای استقرار عملی این فناوری است. برای دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر به سه پرسش اصلی پاسخ می‌دهد:

۱. چه شواهدی دربارهٔ تأثیر کاربردهای هوش مصنوعی بر کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن ساختمان‌ها وجود دارد؟
۲. روندهای اصلی، حوزه‌های کاربرد و روش‌های غالب هوش مصنوعی در مراحل مختلف چرخهٔ عمر ساختمان کدام‌اند؟
۳. چه موانع فنی، اقتصادی، انسانی و نهادی، مانع از مقیاس‌پذیری و استقرار گستردهٔ این فناوری در ساختمان‌های واقعی می‌شوند؟

نوآوری این پژوهش در چهار محور اصلی است. نخست، ارائهٔ یک مرور نظام‌مند مبتنی بر ۱۲۸ مطالعهٔ منتخب برای ترسیم تصویری جامع از وضعیت دانش موجود؛ دوم، ترکیب تحلیل کتاب‌سنجی، تحلیل محتوایی و تحلیل انتقادی به منظور شناسایی روندها و شکاف‌های پژوهشی؛ سوم، ارائهٔ تحلیلی فراتر از عملکرد الگوریتم‌ها با در نظر گرفتن ابعاد فنی، داده‌ای، اقتصادی، رفتاری و اجرایی؛ و چهارم، توسعهٔ یک چارچوب مفهومی پنج‌لایه که ارتباط میان زیرساخت فیزیکی ساختمان، داده و زیرساخت دیجیتال، هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری هوشمند و ارزیابی عملکرد را برای گذار به ساختمان‌های کم‌کربن تبیین می‌کند. بر این‌اساس، پژوهش حاضر نه‌تنها وضعیت موجود کاربرد هوش مصنوعی را جمع‌بندی می‌کند، بلکه مسیری تحلیلی برای توسعهٔ پژوهش‌های آینده و تصمیم‌گیری عملی ذی‌نفعان حوزهٔ ساختمان ارائه می‌دهد.

۲. مبانی نظری و مرور انتقادی پیشینهٔ پژوهش

در سال‌های اخیر، مدیریت انرژی ساختمان‌ها از رویکردهای مبتنی بر بهبود عملکرد اجزای منفرد به سمت سامانه‌های هوشمند، داده‌محور و یکپارچه حرکت کرده است. توسعهٔ فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، دوقلوهای دیجیتال و کلان‌داده، بستر لازم را برای به‌کارگیری هوش مصنوعی در مراحل مختلف چرخهٔ عمر ساختمان فراهم کرده است [۱۰ و ۱۱]. کاربردهای هوش مصنوعی را می‌توان در سه حوزهٔ اصلی شامل طراحی و شبیه‌سازی، بهره‌برداری و مدیریت انرژی و نگهداری پیشگویانه دسته‌بندی کرد. در این حوزه‌ها، الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی عمدتاً برای پیش‌بینی مصرف انرژی، کنترل هوشمند تجهیزات، تشخیص خطا و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های ساختمان به کار گرفته می‌شوند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، عملکرد این مدل‌ها همچنان به کیفیت داده، ویژگی‌های ساختمان، شرایط اقلیمی و رفتار کاربران وابسته است و این موضوع قابلیت تعمیم نتایج را در محیط‌های واقعی محدود می‌کند.

مرور مطالعات نشان می‌دهد بخش عمدهٔ پژوهش‌ها بر پیش‌بینی مصرف انرژی یا بهینه‌سازی سامانه‌های HVAC متمرکز بوده‌اند، در حالی که تعامل میان سامانه‌های مختلف ساختمان، رفتار کاربران و شرایط بهره‌برداری واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، اغلب پژوهش‌ها کاهش مصرف انرژی را معادل کاهش انتشار کربن فرض کرده‌اند، در حالی که شدت انتشار کربن به عواملی نظیر ترکیب منابع تولید انرژی، زمان مصرف و نوع حامل انرژی وابسته است. افزون بر این، انرژی مصرفی زیرساخت‌های محاسباتی و آموزش مدل‌های هوش مصنوعی به‌ندرت در ارزیابی‌ها لحاظ شده است. از این منظر، مفهوم AI Green چارچوبی مناسب برای ارزیابی هم‌زمان دقت مدل، هزینهٔ محاسباتی، مصرف انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی فراهم می‌کند، اما بررسی مطالعات منتخب نشان می‌دهد این رویکرد هنوز جایگاه محدودی در پژوهش‌های مدیریت انرژی ساختمان دارد [۱۲ و ۱۳].

در تحلیل رابطهٔ میان انرژی و کربن، لازم است میان چند مفهوم متمایز تفاوت قائل شد. کاهش مصرف انرژی لزوماً به همان میزان به کاهش انتشار کربن منجر نمی‌شود، زیرا انتشار عملیاتی ساختمان علاوه بر مقدار انرژی مصرفی، به‌شدت کربن

شبکهٔ برق یا نوع حامل انرژی مصرفی نیز وابسته است. برای مثال، کاهش مصرف برق در شبکه‌ای با سهم بالای انرژی‌های تجدیدپذیر ممکن است کاهش کربن کمتری نسبت به همان میزان صرفه‌جویی در شبکه‌ای مبتنی بر سوخت‌های فسیلی ایجاد کند. افزون بر این، ارزیابی اثرات هوش مصنوعی باید مصرف انرژی و انتشار کربن زیرساخت‌های محاسباتی مورد نیاز برای آموزش، استقرار و اجرای مدل‌ها را نیز در نظر بگیرد؛ موضوعی که در چارچوب Green AI اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند تصویر دقیق‌تری از منافع خالص زیست‌محیطی سامانه‌های هوشمند ارائه دهد.

توسعهٔ راهکارهای هوش مصنوعی علاوه بر الگوریتم‌های مناسب، به وجود زیرساخت‌های داده و دیجیتال نیز وابسته است. اینترنت اشیا، سامانه‌های مدیریت ساختمان، BIM و دوقلوهای دیجیتال امکان جمع‌آوری، یکپارچه‌سازی و تحلیل داده‌های عملیاتی را فراهم می‌کنند؛ با این‌حال، ناهمگونی داده‌ها، نبود استانداردهای مشترک، محدودیت قابلیت همکاری سامانه‌ها و کیفیت پایین داده‌های عملیاتی همچنان از موانع اصلی استقرار این فناوری به شمار می‌روند. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند رفتار کاربران یکی از عوامل مهم مؤثر بر عملکرد واقعی انرژی ساختمان است؛ از این‌رو، نادیده گرفتن الگوهای بهره‌برداری و تعامل انسان با سامانه‌های هوشمند می‌تواند دقت و قابلیت تعمیم مدل‌ها را کاهش دهد.

فراتر از چالش‌های فنی، عوامل اقتصادی، سازمانی و نهادی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پیاده‌سازی هوش مصنوعی دارند. هزینهٔ ایجاد زیرساخت داده، نصب حسگرها، توسعه و نگهداری مدل‌ها، امنیت سایبری، حریم خصوصی، مالکیت داده و قابلیت تفسیر تصمیمات الگوریتمی از مهم‌ترین موانع پذیرش این فناوری هستند؛ بنابراین، ارزیابی موفقیت راهکارهای هوش مصنوعی باید علاوه بر شاخص‌های فنی، ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را نیز دربرگیرد.

با توجه به این چالش‌ها، مرور انتقادی مطالعات منتخب با هدف شناسایی روندهای پژوهشی، حوزه‌های کاربرد، شکاف‌های دانشی و فرصت‌های آینده انجام شد. در این راستا، مطالعات از نظر حوزهٔ کاربرد، روش‌های هوش مصنوعی، یافته‌های اصلی، محدودیت‌ها و میزان کاربردپذیری در شرایط واقعی مقایسه شدند و نتایج آن در قالب تحلیل کتاب‌سنجی (شکل ۳) و مرور تطبیقی مطالعات (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مرور تطبیقی محورهای اصلی پژوهش در زمینهٔ کاربرد هوش مصنوعی برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن در ساختمان‌ها و شناسایی شکاف‌های پژوهشی

محور پژوهشی	جایگاه در تحلیل کتاب‌سنجی (شکل ۳)	مطالعات شاخص	مهم‌ترین فناوری‌ها و رویکردها	مهم‌ترین یافته‌های پژوهش‌های منتخب	مهم‌ترین محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی	نوآوری و ارزش افزوده پژوهش حاضر
پیش‌بینی مصرف و بار انرژی	یکی از خوشه‌های پرتکرار کلیدواژه	[۱۴ ـ ۱۶]	یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، LSTM، Transformer	افزایش دقت پیش‌بینی بار و الگوهای مصرف	تمرکز بر دقت پیش‌بینی و نه کاهش واقعی مصرف؛ وابستگی به کیفیت داده	تحلیل رابطه بین دقت پیش‌بینی، کاهش واقعی مصرف و قابلیت تعمیم در ساختمان‌های واقعی
بهینه‌سازی و کنترل هوشمند	خوشهٔ مرکزی شبکهٔ هم رخدادی	[۱۷ ـ ۱۹]	یادگیری تقویتی، MPC، بهینه‌سازی چندهدفه	کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد HVAC	غالب بودن مطالعات شبیه‌سازی و اعتبارسنجی محدود در محیط واقعی	ارائهٔ چارچوبی برای انتقال از شبیه‌سازی به پیاده‌سازی عملی
طراحی و بهینه‌سازی ساختمان	خوشهٔ میان‌رشته‌ای	[۲۰ ـ ۲۲]	الگوریتم‌های تکاملی، یادگیری ماشین	طراحی بهینهٔ ساختمان از نظر انرژی و آسایش	تمرکز بر مرحلهٔ طراحی و غفلت از بهره‌برداری	ایجاد پیوند میان طراحی، بهره‌برداری و مدیریت انرژی در کل چرخهٔ عمر
تشخیص خطا و نگهداری پیشگویانه	خوشهٔ تخصصی	[۲۳ ـ ۲۵]	تشخیص ناهنجاری، تحلیل داده‌های حسگری، ML	افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و کاهش هزینهٔ نگهداری	نیاز به داده‌های برچسب‌گذاری‌شده و محدودیت تعمیم مدل‌ها	تحلیل قابلیت انتقال مدل‌های تشخیص خطا بین ساختمان‌های مختلف

ادامهٔ جدول ۱.

محور پژوهشی	جایگاه در تحلیل کتاب‌سنجی (شکل ۳)	مطالعات شاخص	مهم‌ترین فناوری‌ها و رویکردها	مهم‌ترین یافته‌های پژوهش‌های منتخب	مهم‌ترین محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی	نوآوری و ارزش افزوده پژوهش حاضر
BIM، اینترنت اشیا و دوقلوهای دیجیتال	خوشهٔ نوظهور	[۶، ۲۶ - ۲۸]	BIM، IoT، Digital Twin، Edge Computing	ایجاد زیرساخت داده‌محور برای پایش و تصمیم‌گیری	چالش‌های استانداردسازی، قابلیت همکاری و هزینه پیاده‌سازی	معرفی زیرساخت دیجیتال به عنوان لایه اصلی چارچوب مفهومی
رفتار کاربران و رویکرد انسان‌محور	خوشهٔ درحال‌توسعه	[۲۹–۳۱]	مدل‌سازی حضور، آسایش حرارتی، تعامل انسان ـ ساختمان	افزایش دقت کنترل هوشمند و بهبود آسایش	مدل‌سازی ساده‌شده رفتار کاربران	ادغام رفتار کاربران با تصمیم‌گیری هوشمند و مدیریت انرژی
محور پژوهشی	جایگاه در تحلیل کتاب‌سنجی (شکل ۳)	مطالعات شاخص	مهم‌ترین فناوری‌ها و رویکردها	مهم‌ترین یافته‌های پژوهش‌های منتخب	مهم‌ترین محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی	نوآوری و ارزش افزوده پژوهش حاضر
کاهش انتشار کربن و پایداری	خوشهٔ اصلی	[۳۲ ـ ۳۴]	انرژی‌های تجدیدپذیر، بهینه‌سازی کربن، LCA	کاهش هم‌زمان مصرف انرژی و انتشار کربن	ارزیابی محدود کربن چرخهٔ عمر سامانه‌های هوش مصنوعی	تحلیل هم‌زمان انرژی، کربن و اثرات زیرساخت محاسباتی هوش مصنوعی
موانع اقتصادی و اجرایی	خوشهٔ کم‌تراکم	[۳۵ ـ ۳۸]	تحلیل هزینه ـ فایده، آمادگی فناوری	شناسایی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری	کمبود مطالعات دربارهٔ هزینهٔ واقعی و مقیاس‌پذیری	ارائهٔ مسیر مرحله‌ای استقرار از پایلوت تا پیاده‌سازی گسترده
امنیت سایبری، حریم خصوصی و اعتماد	خوشهٔ نوظهور با رشد سریع	[۳۹ ـ ۴۱]	امنیت سایبری، حفظ حریم خصوصی، Explainable AI	شناسایی ریسک‌های امنیتی ساختمان‌های هوشمند	بررسی جداگانه امنیت و عملکرد انرژی	ادغام امنیت، حریم خصوصی و اعتماد در چارچوب ارزیابی سامانه‌های هوشمند
جمع‌بندی شکاف پژوهشی	همگرایی چند خوشهٔ اصلی	—	—	مطالعات موجود هر یک بخشی از مسئله را پوشش داده‌اند	نبود چارچوبی یکپارچه که فناوری، داده، انرژی، کربن، کاربران، اقتصاد و امنیت را هم‌زمان پوشش دهد	ارائهٔ چارچوب جامع مبتنی بر مرور نظام‌مند و تحلیل کتاب‌سنجی برای یکپارچه‌سازی ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجرایی

بررسی تطبیقی مطالعات پیشین نشان می‌دهد اگرچه پژوهش‌های موجود پیشرفت قابل توجهی در توسعهٔ روش‌های داده‌محور داشته‌اند، مهم‌ترین شکاف ادبیات همچنان فقدان چارچوبی یکپارچه برای پیوند میان عملکرد انرژی، کاهش انتشار کربن، الزامات اجرایی و زیرساخت‌های دیجیتال است. این شکاف مبنای توسعهٔ چارچوب مفهومی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر با هدف بررسی نظام‌مند نقش هوش مصنوعی در کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن در ساختمان‌ها، شناسایی روندهای اصلی پژوهش، تحلیل انتقادی محدودیت‌های مطالعات موجود و توسعهٔ یک چارچوب مفهومی یکپارچه انجام شده است. روش پژوهش بر پایه مرور نظام‌مند ادبیات، تحلیل توصیفی و موضوعی مطالعات، تحلیل کتاب‌سنجی و استخراج

شکاف‌های پژوهشی استوار است. فرایند پژوهش در یک مسیر منسجم شامل شناسایی و انتخاب مطالعات، استخراج و طبقه‌بندی داده‌ها، تحلیل ساختار موضوعی ادبیات، ارزیابی انتقادی شواهد و در نهایت توسعهٔ چارچوب مفهومی پیشنهادی انجام شد.

جست‌وجوی نظام‌مند منابع در پایگاه‌های Scopus، Web of Science، ScienceDirect، IEEE Xplore و Google Scholar انجام شد. Google Scholar به عنوان منبع مکمل برای شناسایی مطالعات مرتبط و بررسی ارجاعات مورد استفاده قرار گرفت. جست‌وجوی نهایی تمامی پایگاه‌ها در ۳۰ ژوئن ۲۰۲۵ تکمیل شد و منابع منتشرشده در بازه ۱ ژانویه ۲۰۱۵ تا ۳۰ ژوئن ۲۰۲۵ بررسی شدند. راهبرد جست‌وجو بر اساس ترکیب کلیدواژه‌های مرتبط با هوش مصنوعی، مدیریت انرژی ساختمان و کاهش انتشار کربن و با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR طراحی شد. به منظور افزایش قابلیت بازتولید مرور نظام‌مند، رشتهٔ جست‌وجوی هر پایگاه متناسب با ساختار نمایه‌سازی همان پایگاه تنظیم شد. نسخه‌های نهایی رشته‌های جست‌وجو به شرح زیر است:

Scopus (Title-Abstract-Keywords):

TITLE-ABS-KEY((\text{\"Artificial Intelligence\"} OR \text{\"Machine Learning\"} OR \text{\"Deep Learning\"} OR \text{\"Reinforcement Learning\"}) AND (\text{\"Building Energy\"} OR \text{\"Building Energy Management\"} OR HVAC OR \text{\"Smart Building\"}) AND (\text{\"Carbon Emissions\"} OR \text{\"Low-Carbon Buildings\"} OR \text{\"Net Zero Buildings\"}))

Web of Science (Topic):

TS=((\text{\"Artificial Intelligence\"} OR \text{\"Machine Learning\"} OR \text{\"Deep Learning\"} OR \text{\"Reinforcement Learning\"}) AND (\text{\"Building Energy\"} OR \text{\"Building Energy Management\"} OR HVAC OR \text{\"Smart Building\"}) AND (\text{\"Carbon Emissions\"} OR \text{\"Low-Carbon Buildings\"} OR \text{\"Net Zero Buildings\"}))

ScienceDirect (Title, Abstract, Keywords):

TITLE-ABSTR-KEY((\text{\"Artificial Intelligence\"} OR \text{\"Machine Learning\"} OR \text{\"Deep Learning\"} OR \text{\"Reinforcement Learning\"}) AND (\text{\"Building Energy\"} OR \text{\"Building Energy Management\"} OR HVAC OR \text{\"Smart Building\"}) AND (\text{\"Carbon Emissions\"} OR \text{\"Low-Carbon Buildings\"} OR \text{\"Net Zero Buildings\"}))

IEEE Xplore (Metadata and Full Text):

((\text{\"Artificial Intelligence\"} OR \text{\"Machine Learning\"} OR \text{\"Deep Learning\"} OR \text{\"Reinforcement Learning\"}) AND (\text{\"Building Energy\"} OR \text{\"Building Energy Management\"} OR HVAC OR \text{\"Smart Building\"}) AND (\text{\"Carbon Emissions\"} OR \text{\"Low-Carbon Buildings\"} OR \text{\"Net Zero Buildings\"}))

Google Scholar (Supplementary Search):

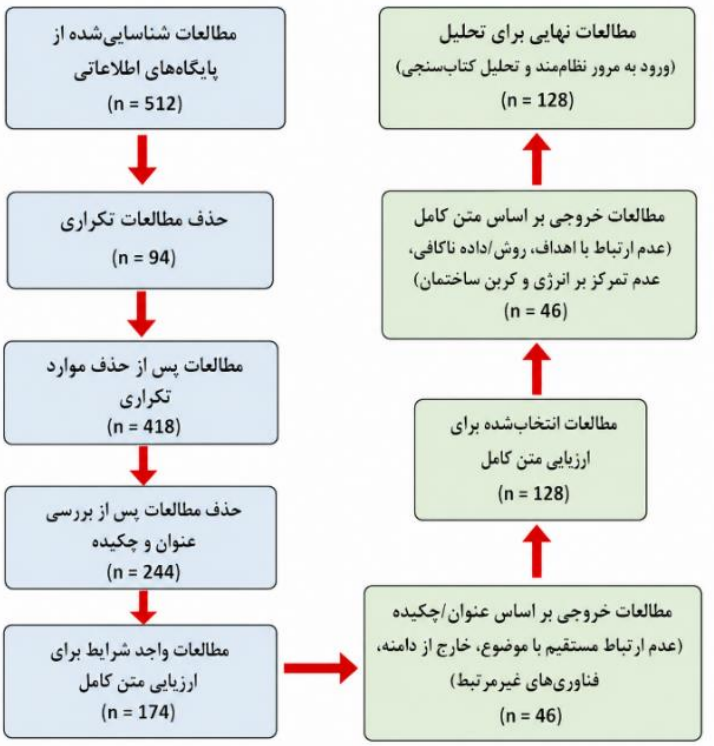
جست‌وجوی تکمیلی با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های اصلی شامل ««Artificial Intelligence»، «Building Energy»، «HVAC»، «Carbon Emissions»» و «Low-Carbon Buildings» انجام شد و از این پایگاه فقط برای شناسایی مطالعات مرتبط و بررسی ارجاعات استفاده شد.

جست‌وجو در Scopus بر اساس Title-Abstract-Keywords، در Web of Science بر اساس Topic، در ScienceDirect بر اساس عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها، در IEEE Xplore بر اساس Metadata و Full Text و در Google Scholar بر اساس کلیدواژه‌های اصلی انجام شد. در این فرایند، تنها مقالات علمی داوری‌شده به زبان انگلیسی که ارتباط مستقیم با کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت انرژی یا کاهش انتشار کربن ساختمان‌ها داشتند، وارد مرحلهٔ غربالگری شدند. منابع

تکراری، مطالعات خارج از دامنهٔ پژوهش و پژوهش‌هایی که ارتباط مستقیمی با اهداف مطالعه نداشتند حذف شدند. همچنین، مطالعات مرتبط با فناوری‌های مکمل نظیر اینترنت اشیا، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، دوقلوهای دیجیتال و سامانه‌های مدیریت ساختمان (BMS) در صورت ارتباط مستقیم با هوشمندسازی و مدیریت انرژی در تحلیل نهایی لحاظ شدند.

محدودیت‌های اعمال‌شده در فرایند جست‌وجو شامل موارد زیر بود: تنها مقالات پژوهشی داوری‌شده به زبان انگلیسی وارد فرایند غربالگری شدند؛ مقالات کنفرانسی، فصل کتاب‌ها، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌های فنی، یادداشت‌های سردبیری و سایر انواع مدارک از تحلیل نهایی کنار گذاشته شدند. همچنین، جست‌وجوی نظام‌مند مطالعات در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۵ تا ژوئن ۲۰۲۵ انجام شد تا روند توسعهٔ دانش و تغییر جهت پژوهش‌ها در زمینهٔ کاربرد هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی و کاهش انتشار کربن ساختمان‌ها بررسی شود. همان‌گونه که روند زمانی مطالعات منتخب نشان می‌دهد، بخش عمدهٔ پژوهش‌های واجد شرایط برای تحلیل نهایی در سال‌های اخیر منتشر شده‌اند و بیشترین تمرکز مطالعات در بازه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ مشاهده می‌شود. این افزایش انتشار مطالعات را می‌توان با رشد دسترسی به داده‌های عملیاتی، توسعهٔ زیرساخت‌های هوشمند ساختمان و افزایش توجه پژوهش‌ها به اعتبارسنجی عملی و یکپارچه‌سازی سامانه‌های هوش مصنوعی مرتبط دانست. در مقابل، مطالعات منتشرشده در دوره‌های ۲۰۱۵ ـ ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ ـ ۲۰۲۰ عمدتاً بر توسعهٔ روش‌ها و ارزیابی‌های مبتنی بر شبیه‌سازی تمرکز داشته‌اند، در حالی که مطالعات سال‌های اخیر توجه بیشتری به اعتبارسنجی عملی و یکپارچه‌سازی سامانه‌های هوش مصنوعی نشان داده‌اند.

فرایند شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات مطابق دستورالعمل PRISMA انجام شد. پس از تجمیع رکوردهای استخراج‌شده از تمامی پایگاه‌ها، مطالعات تکراری ابتدا به صورت خودکار بر اساس DOI، عنوان و اطلاعات کتاب‌شناختی شناسایی شدند و سپس موارد مشکوک به صورت دستی توسط دو پژوهشگر مستقل بررسی شد. در موارد اختلاف، تصمیم نهایی از طریق اجماع مشترک اتخاذ شد. فرایند کامل شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات در نمودار جریان PRISMA ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار جریان PRISMA برای فرایند شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، فرایند انتخاب مطالعات بر اساس دستورالعمل PRISMA به صورت مرحله‌ای انجام شده است. در این فرایند، پس از جست‌وجوی اولیه در پایگاه‌های اطلاعاتی، مقالات تکراری حذف شدند و سپس با

غربالگری عنوان، چکیده و متن کامل، مطالعات فاقد ارتباط با اهداف پژوهش کنار گذاشته شدند. در نهایت، ۱۲۸ مقاله که تمامی معیارهای ورود را احراز کرده بودند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. این فرایند موجب افزایش شفافیت، قابلیت تکرار و اعتبار مرور نظام‌مند حاضر شده است.

به منظور ارائهٔ تصویری کلی از مجموعه مطالعات واردشده به مرور نظام‌مند، ویژگی‌های اصلی ۱۲۸ مطالعهٔ منتخب از نظر بازه زمانی انتشار، منطقهٔ جغرافیایی، نوع ساختمان و روش پژوهش در جدول ۲ خلاصه شده است. در بخش زمانی جدول، مطالعات به چهار دورهٔ غیرهم‌پوشان تقسیم شده‌اند تا توزیع مطالعات در سراسر بازه جست‌وجوی ژانویه ۲۰۱۵ تا ژوئن ۲۰۲۵ به طور شفاف نمایش داده شود. این خلاصه، نمایی از دامنه و تنوع مطالعات بررسی‌شده را ارائه می‌دهد و زمینهٔ لازم را برای تحلیل روندهای زمانی و تحلیل محتوایی در بخش‌های بعد فراهم می‌سازد.

همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، مطالعات منتخب در سراسر بازه جست‌وجوی ژانویه ۲۰۱۵ تا ژوئن ۲۰۲۵ توزیع شده‌اند. هرچند بیشترین سهم مطالعات به دوره‌های ۲۰۲۱ ـ ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ ـ ۲۰۲۵ اختصاص دارد، ۴۰ مطالعه (۱۷ مطالعه در دورهٔ ۲۰۱۵ ـ ۲۰۱۷ و ۲۳ مطالعه در دوره ۲۰۱۸ ـ ۲۰۲۰) نیز از سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ وارد تحلیل نهایی شده‌اند. این الگو نشان‌دهندهٔ رشد تدریجی پژوهش‌ها و افزایش قابل توجه انتشار مطالعات در سال‌های اخیر است.

جدول ۲. خلاصهٔ ویژگی‌های مطالعات منتخب واردشده به مرور نظام‌مند و تحلیل کتاب‌سنجی (۱۲۸ مطالعه)

معیار طبقه‌بندی	زیرگروه	تعداد مطالعات	درصد از کل مطالعات (٪)	دلالت پژوهشی برای مطالعهٔ حاضر
دورهٔ انتشار	۲۰۱۵ ـ ۲۰۱۷	۱۷	۱۳/۳	آغاز گسترش کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت و بهینه‌سازی انرژی ساختمان
	۲۰۱۸ ـ ۲۰۲۰	۲۳	۱۸/۰	افزایش کاربرد یادگیری عمیق و روش‌های کنترل هوشمند در مدیریت انرژی ساختمان
	۲۰۲۱ ـ ۲۰۲۳	۴۱	۳۲/۰	افزایش توجه به ساختمان‌های کم‌مصرف/کم‌کربن، ساختمان‌های انرژی خالص صفر و دوقلوهای دیجیتال
	۲۰۲۴ ـ ۲۰۲۵	۴۷	۳۶/۷	افزایش توجه به چارچوب‌های یکپارچه برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی در ساختمان‌های واقعی
منطقهٔ جغرافیایی	اروپا	۴۹	۳۸/۳	تمرکز قابل توجه ادبیات بر ساختمان‌های کم‌مصرف و انرژی خالص صفر
	آسیا	۴۱	۳۲/۰	رشد مطالعات مرتبط با هوشمندسازی و مدیریت انرژی ساختمان
	آمریکای شمالی	۲۸	۲۱/۸	توجه به ارتباط ساختمان هوشمند با شبکهٔ هوشمند و مدیریت تقاضای انرژی
	سایر	۱۰	۷/۸	پوشش محدودتر جغرافیایی و شواهد کمتر برای تعمیم بین مناطق
نوع ساختمان	مسکونی	۴۶	۳۵/۹	اهمیت رفتار کاربران و الگوهای مصرف در ساختمان‌های مسکونی
	اداری	۳۸	۲۹/۷	کاربرد گستردهٔ هوش مصنوعی در مدیریت و کنترل انرژی ساختمان‌های اداری
	آموزشی و عمومی	۲۷	۲۱/۱	وجود مطالعات کاربردی در ساختمان‌های عمومی و آموزشی و امکان ارزیابی عملکرد در محیط واقعی
	صنعتی و سایر	۱۷	۱۳/۳	پوشش محدودتر کاربردهای تخصصی و نیاز به بررسی قابلیت تعمیم در انواع مختلف ساختمان
روش پژوهش	شبیه‌سازی	۶۱	۴۷/۶	غلبهٔ ارزیابی شبیه‌سازی‌شده و محدودیت شواهد حاصل از بهره‌برداری واقعی
	مطالعهٔ موردی	۳۵	۲۷/۳	ارائهٔ شواهد میدانی برای ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی و تعمیم راهکارها
	مرور نظام‌مند	۱۸	۱۴/۱	شناسایی روندهای پژوهش، محدودیت‌ها و شکاف‌های موجود در ادبیات
	ترکیبی	۱۴	۱۱/۰	امکان تحلیل هم‌زمان شواهد کمی و کیفی و تفسیر چندبعدی نتایج

پس از انتخاب مطالعات، اطلاعاتی شامل سال انتشار، منطقهٔ جغرافیایی، نوع ساختمان، حوزهٔ کاربرد، روش یا الگوریتم هوش مصنوعی، نوع داده، اهداف پژوهش، روش اعتبارسنجی و شاخص‌های ارزیابی انرژی و کربن به‌صورت نظام‌مند استخراج و کدگذاری شد. تمامی طبقه‌بندی‌ها و فراوانی‌های ارائه‌شده در جدول‌های این پژوهش مستقیم بر پایهٔ همین فرایند استخراج و

کدگذاری محاسبه شده‌اند. همچنین، به منظور انجام تحلیل انتقادی، عواملی نظیر استفاده از داده‌های واقعی، قابلیت تعمیم، توجه به رفتار کاربران، ملاحظات اقتصادی، امنیت و حریم خصوصی داده‌ها و قابلیت پیاده‌سازی راهکارها نیز ثبت و تحلیل شد.

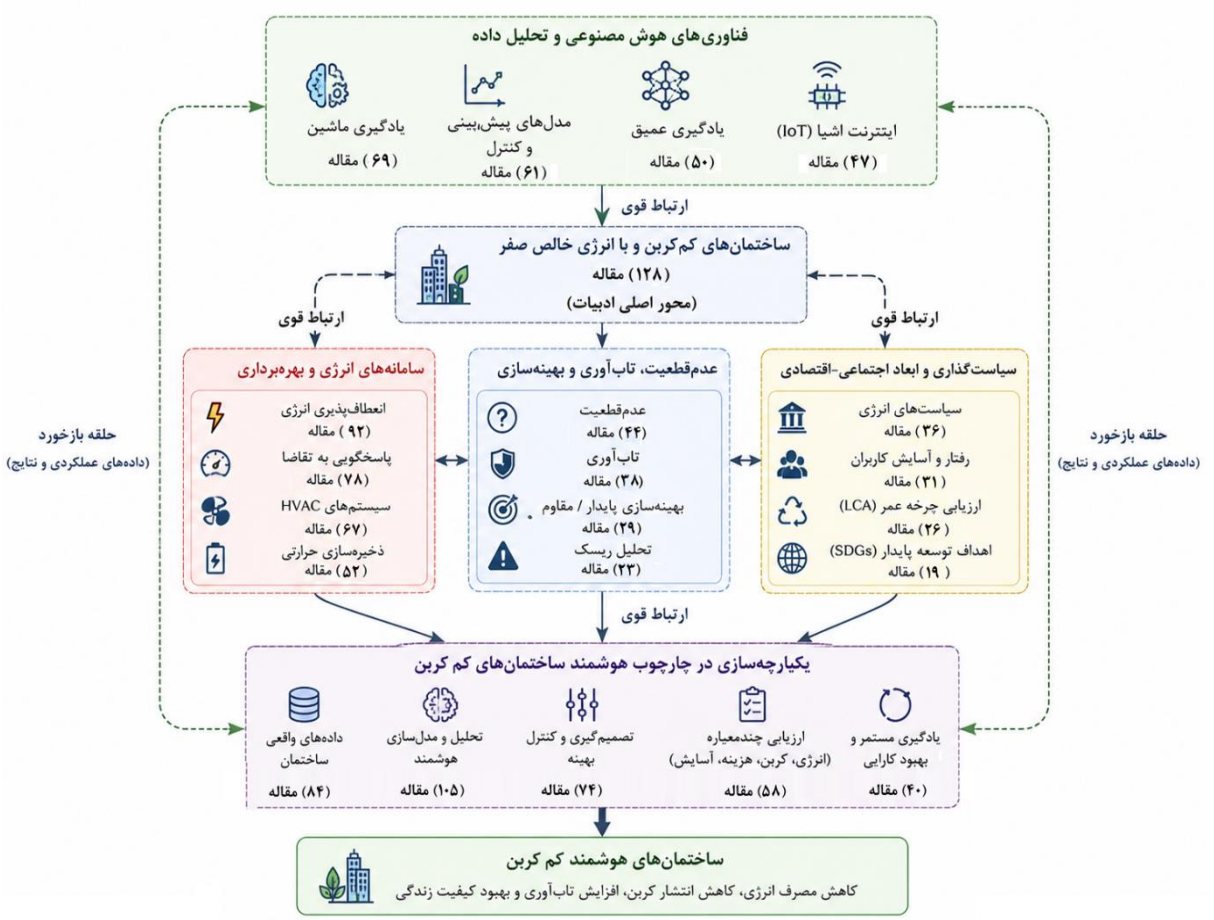
در این مرور، استخراج داده‌های کمی عمدتاً بر ویژگی‌های کتاب‌سنجی و پژوهشی مطالعات، شامل سال انتشار، حوزهٔ کاربرد، خانواده روش، نوع داده و رویکرد اعتبارسنجی متمرکز بود. مقادیر گزارش‌شده برای صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار کربن در تمامی مطالعات منتخب به دلیل ناهمگونی قابل توجه در سناریوهای پایه، نوع ساختمان، اقلیم، دورهٔ ارزیابی، شاخص‌های عملکرد و روش‌های محاسبه، به صورت یک شاخص کمی مشترک تجمیع نشدند. از این‌رو، در این مطالعه تعداد یا سهم مطالعات در هر حوزه به عنوان شاخص فراوانی و جهت‌گیری پژوهش تفسیر شده است و نه به عنوان شاخص اثربخشی. مقایسهٔ مستقیم درصد کاهش مصرف انرژی یا انتشار کربن میان مطالعات تنها در صورتی معتبر خواهد بود که شرایط پایه و روش محاسبهٔ آن‌ها از قابلیت مقایسهٔ کافی برخوردار باشد.

به منظور افزایش قابلیت اعتماد و کاهش احتمال سوگیری در فرایند استخراج و کدگذاری داده‌ها، اطلاعات مطالعات منتخب توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل و بر اساس یک دستورالعمل کدگذاری ازپیش‌تعریف‌شده استخراج و طبقه‌بندی شد. این دستورالعمل شامل تعاریف عملیاتی و معیارهای تصمیم‌گیری برای متغیرهای اصلی، از جمله حوزهٔ کاربرد هوش مصنوعی، نوع الگوریتم، روش اعتبارسنجی، نوع داده و مؤلفه‌های پیاده‌سازی و یکپارچه‌سازی بود. پس از اتمام کدگذاری مستقل، نتایج دو پژوهشگر با یکدیگر مقایسه شد و موارد اختلاف از طریق بازبینی متن کامل مطالعات و بحث مشترک بررسی شد. اختلاف‌های باقی‌مانده از طریق اجماع حل شد و در مواردی که توافق حاصل نشد، تصمیم نهایی با مشارکت پژوهشگر سوم اتخاذ شد. برای ارزیابی میزان توافق بین دو کدگذار، ضریب کاپای کوهن برای متغیرهای طبقه‌ای محاسبه شد. مقدار ضریب کاپای کوهن برابر با ۰/۸۶ به دست آمد که نشان‌دهندهٔ توافق بسیار خوب بین کدگذاران و پایایی مناسب فرایند کدگذاری است.

از آنجا که مطالعات منتخب از نظر نوع داده، روش اعتبارسنجی و سطح شواهد روش‌شناختی ناهمگون بودند، تفسیر نتایج فقط بر مبنای تعداد مطالعات انجام نشد. در تحلیل انتقادی، ویژگی‌هایی مانند استفاده از داده‌های واقعی ساختمان، روش اعتبارسنجی، قابلیت تعمیم نتایج، گزارش شاخص‌های انرژی و کربن و ملاحظات اجرایی و اقتصادی برای تفسیر شواهد موردتوجه قرار گرفت؛ بنابراین، مطالعات مبتنی بر داده‌های واقعی و دارای اعتبارسنجی عملیاتی به عنوان شواهد قوی‌تر در تحلیل محدودیت‌ها، شکاف‌های پژوهشی و توسعهٔ چارچوب مفهومی مد نظر قرار گرفتند، هرچند امتیازدهی کمی یا حذف مطالعات بر اساس یک ابزار رسمی ارزیابی کیفیت در این مرور انجام نشد.

برای افزایش عمق تحلیل انتقادی، مطالعات منتخب علاوه بر ویژگی‌های فنی و الگوریتمی، بر اساس چهار محور شامل عملکرد و دقت روش هوش مصنوعی، قابلیت تعمیم نتایج به ساختمان‌های واقعی، میزان توجه به ملاحظات اجرایی و اقتصادی، و قابلیت یکپارچه‌سازی با فناوری‌های مکمل نظیر اینترنت اشیا، BIM و سامانه‌های مدیریت ساختمان ارزیابی شدند.

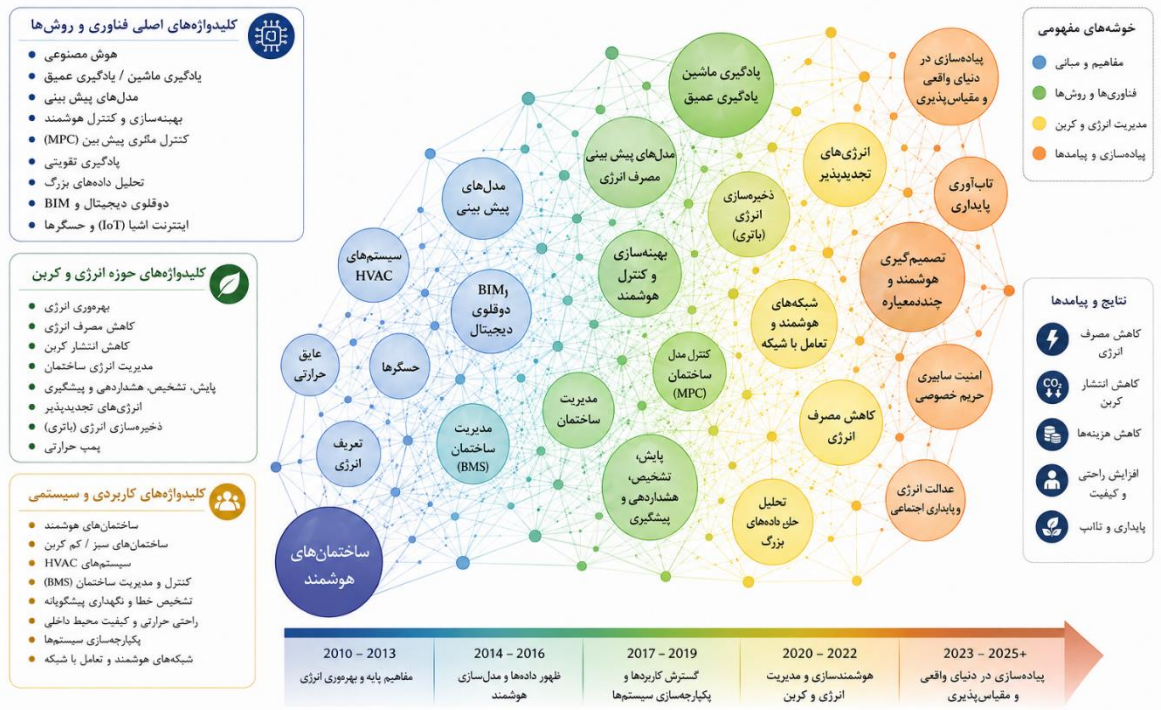
برای شناسایی ساختار موضوعی و روند زمانی ادبیات، تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer (نسخهٔ x.۱.۶) و بر پایهٔ داده‌های کتاب‌شناختی ۱۲۸ مطالعه منتخب انجام شد. نوع تحلیل Co-occurrence Analysis بر اساس Author Keywords و Keywords Plus (در موارد موجود) و روش شمارش Full Counting بود. حداقل تعداد تکرار کلیدواژه ۵ و حداقل هم‌رخدادی ۳ تعیین شد. پس از حذف کلیدواژه‌های عمومی و یکسان‌سازی اصطلاحات هم‌معنا، شبکهٔ هم‌رخدادی تولید و برای تحلیل روند زمانی از قابلیت Overlay Visualization استفاده شد. بر اساس این تحلیل، بازنمایی خروجی شبکه و تحلیل زمانی نرم‌افزار در شکل ۴ ارائه شده است، در حالی که شکل ۳ بازنمایی مفهومی حاصل از ترکیب نتایج کتاب‌سنجی و تحلیل محتوایی نویسندگان است.



شکل ۳. بازنمایی مفهومی حوزه‌های اصلی پژوهش بر پایهٔ ترکیب نتایج تحلیل کتاب‌سنجی و تحلیل محتوایی مطالعات منتخب (تهیه‌شده توسط نویسندگان)

به منظور تحلیل نظام‌مند محتوای مطالعات منتخب، ۱۲۸ مطالعه با استفاده از یک طرح کدگذاری چندبرچسبی تحلیل شدند. طرح کدگذاری بر اساس سه محور اصلی شامل (۱) فناوری‌های هوش مصنوعی و تحلیل داده، (۲) حوزه‌های کاربرد در ساختمان‌های کم‌کربن، و (۳) مؤلفه‌های پیاده‌سازی و یکپارچه‌سازی تدوین شد. هر مطالعه بر اساس شواهد گزارش‌شده در متن کامل مقاله و مطابق با تعاریف عملیاتی ازپیش‌تعیین‌شده، توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل کدگذاری شد. موارد اختلاف پس از مقایسهٔ کدها با بازبینی شواهد موجود در مطالعه و بحث میان پژوهشگران حل‌وفصل شد و در صورت باقی ماندن اختلاف، تصمیم نهایی با مشارکت پژوهشگر سوم اتخاذ شد. میزان توافق بین دو کدگذار نیز با استفاده از ضریب کاپای کوهن ارزیابی شد که مقدار آن ۰/۸۶ به دست آمد و بیانگر توافق بسیار خوب بین کدگذاران بود. از آنجا که هر مطالعه می‌توانست در بیش از یک کد موضوعی قرار گیرد، فراوانی هر کد بیانگر میزان تکرار آن موضوع در ادبیات است و مجموع فراوانی کدهای چندبرچسبی الزاماً با تعداد کل مطالعات برابر نیست. نتایج این کدگذاری مبنای تحلیل تطبیقی مطالعات و استخراج شکاف‌های پژوهشی قرار گرفت.

برای تحلیل ساختار شبکه و روند زمانی کلیدواژه‌ها، از قابلیت Overlay Visualization در نرم‌افزار VOSviewer استفاده شد و نتایج حاصل به صورت یک بازنمایی گرافیکی باز ترسیم‌شده بر اساس خروجی نرم‌افزار ارائه شد. نتایج این تحلیل در قالب شکل ۴ بر پایهٔ خروجی نرم‌افزار ارائه شده است.



شکل ٤. بازنمایی نقشهٔ مفهومی ـ زمانی تکامل و ارتباط کلیدواژه‌های اصلی پژوهش‌های مرتبط با هوش مصنوعی، انرژی و کربن در ساختمان‌ها (بر پایهٔ نتایج تحلیل Overlay Visualization در VOSviewer، تهیه‌شده توسط نویسندگان)

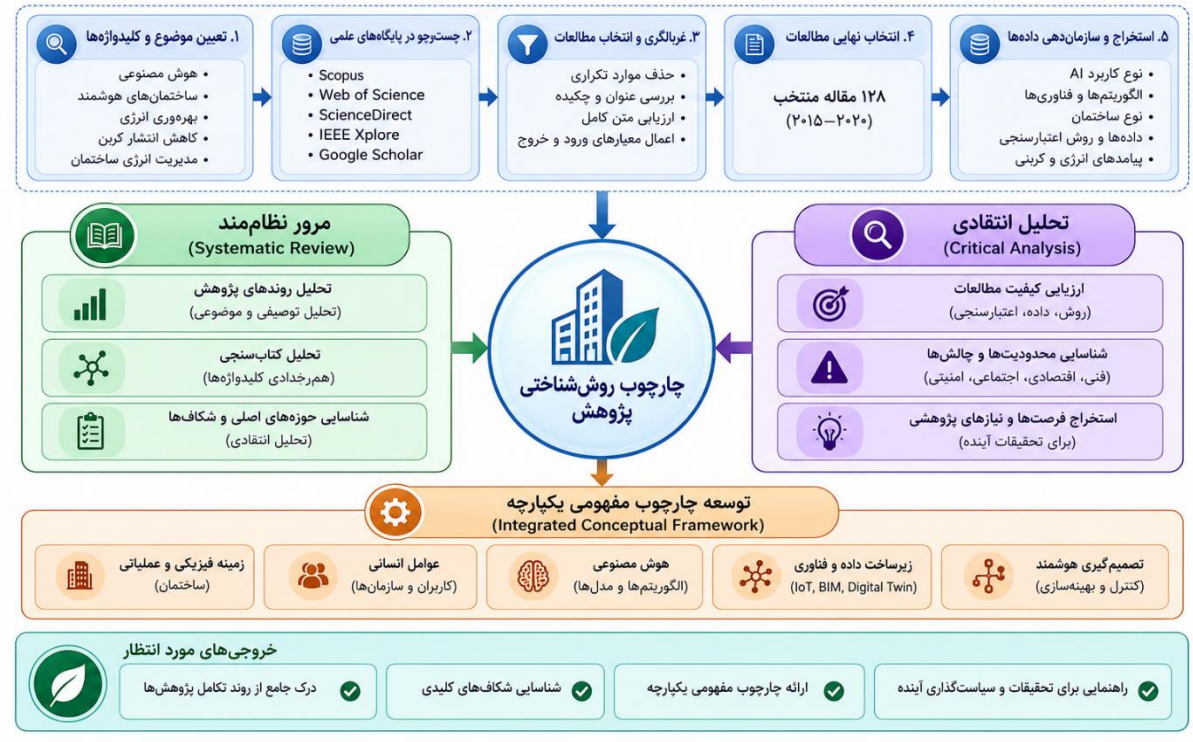
درخور یادآوری است که تحلیل زمانی این پژوهش با استفاده از قابلیت Overlay Visualization در نرم‌افزار VOSviewer انجام شده است و آغاز محور زمانی از سال ۲۰۱۰ ناشی از نمایش سال متوسط ظهور کلیدواژه‌ها در شبکهٔ علمی است. شکل ۴ بازنمایی تهیه‌شده بر پایهٔ نتایج این تحلیل است؛ از این‌رو، روند تکامل مفاهیم را نمایش می‌دهد و بیانگر بازه زمانی انتخاب مطالعات مرور نظام‌مند نیست.

نتایج تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها، همان‌گونه که در بازنمایی ارائه‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد ادبیات این حوزه از تمرکز اولیه بر بهره‌وری انرژی و مدیریت انرژی ساختمان به سمت توسعهٔ کاربردهای هوش مصنوعی، تحلیل داده و سامانه‌های هوشمند حرکت کرده است. در سال‌های اخیر، موضوعاتی مانند یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، اینترنت اشیا، BIM، دوقلوهای دیجیتال، کنترل هوشمند، پاسخگویی بار و ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر به محورهای اصلی پژوهش تبدیل شده‌اند. همچنین، مفاهیمی نظیر امنیت سایبری، حریم خصوصی، تاب‌آوری و استقرار عملی سامانه‌های هوشمند نیز جایگاه پررنگ‌تری یافته‌اند که بیانگر گذار پژوهش‌ها از توسعهٔ الگوریتم‌های منفرد به سمت سامانه‌های یکپارچه و قابل‌پیاده‌سازی است.

بر پایهٔ این تحلیل، مطالعات منتخب از نظر حوزهٔ کاربرد، روش‌های هوش مصنوعی، نوع ساختمان، شیوهٔ اعتبارسنجی و میزان توجه به ابعاد انرژی، کربن، اقتصادی، انسانی و اجرایی به صورت تطبیقی ارزیابی شدند. این ارزیابی امکان شناسایی مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی، از جمله فاصلهٔ میان نتایج شبیه‌سازی و عملکرد واقعی، محدودیت قابلیت تعمیم مدل‌ها، وابستگی به کیفیت داده‌ها و چالش‌های استقرار عملی را فراهم کرد و مبنای توسعهٔ چارچوب مفهومی پژوهش قرار گرفت.

در مرحلهٔ نهایی، بر اساس یافته‌های مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی مطالعات، یک چارچوب مفهومی یکپارچهٔ پنج‌لایه برای کاربرد هوش مصنوعی در کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن ساختمان‌ها توسعه یافت (شکل ۵). این چارچوب شامل لایه‌های زیرساخت فیزیکی و انرژی، داده و زیرساخت دیجیتال، هوش مصنوعی و تحلیل، تصمیم‌گیری و کنترل، و ارزیابی و حکمرانی است. افزون بر این، عواملی نظیر رفتار کاربران، شرایط اقلیمی، ملاحظات اقتصادی، امنیت سایبری، حریم خصوصی و قابلیت همکاری سامانه‌ها به عنوان مؤلفه‌های میان‌لایه‌ای در تعامل میان تمامی لایه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. هدف این چارچوب،

کاهش فاصله میان نتایج پژوهشی و کاربردهای عملی و فراهم‌سازی بستری برای استقرار تدریجی و مقیاس‌پذیر سامانه‌های هوشمند در ساختمان‌های کم‌کربن است.



شکل ۵. چارچوب روش‌شناختی پژوهش برای مرور نظام‌مند، تحلیل انتقادی و توسعهٔ چارچوب مفهومی یکپارچه

۴. نتایج مرور نظام‌مند و تحلیل مطالعات منتخب

نتایج مرور نظام‌مند ۱۲۸ مطالعه منتخب و تفسیر یافته‌های آن‌ها که با در نظر گرفتن تفاوت‌های روش‌شناختی مطالعات، به‌ویژه میان مطالعات مبتنی بر داده‌های واقعی و مطالعات شبیه‌سازی‌شده، انجام شده است، نشان می‌دهد کاربرد هوش مصنوعی در حوزهٔ انرژی و کربن ساختمان‌ها طی سال‌های اخیر از تمرکز صرف بر پیش‌بینی مصرف انرژی به سمت بهینه‌سازی، کنترل هوشمند، مدیریت یکپارچهٔ انرژی و پشتیبانی از فرایند کربن‌زدایی حرکت کرده است. به منظور ارائهٔ تصویری کمی از ساختار ادبیات، مطالعات منتخب بر اساس سال انتشار، حوزهٔ کاربرد هوش مصنوعی، نوع الگوریتم، نوع ساختمان، روش اعتبارسنجی و شاخص‌های ارزیابی طبقه‌بندی و با استفاده از تحلیل توصیفی فراوانی و درصد بررسی شدند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد تعداد مطالعات منتشرشده در سال‌های اخیر روندی افزایشی داشته است که بیانگر افزایش توجه جامعهٔ علمی به نقش فناوری‌های هوشمند در ارتقای بهره‌وری انرژی و گذار به ساختمان‌های کم‌کربن است. تمامی فراوانی‌ها، درصدها و طبقه‌بندی‌های ارائه‌شده در این بخش بر اساس استخراج و کدگذاری نظام‌مند اطلاعات ۱۲۸ مطالعهٔ منتخب محاسبه شده‌اند؛ از این‌رو، نتایج کمی گزارش‌شده مستقیم از داده‌های استخراج‌شده از مطالعات منتخب حاصل شده‌اند.

از نظر حوزهٔ کاربرد، بیشترین سهم مطالعات به پیش‌بینی مصرف انرژی و بار حرارتی، بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های ساختمان و کنترل هوشمند تجهیزات اختصاص دارد، در حالی که موضوعاتی مانند تحلیل چرخهٔ عمر کربن، تعامل انسان ـ سامانه، امنیت داده و ارزیابی اقتصادی کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند. این یافته نشان می‌دهد اگرچه کاربرد هوش مصنوعی در افزایش بهره‌وری انرژی به بلوغ نسبی رسیده است، اما توسعهٔ رویکردهای جامع که ابعاد فنی، اقتصادی، انسانی و زیست‌محیطی را به صورت هم‌زمان در نظر بگیرند، همچنان یکی از نیازهای اصلی این حوزه محسوب می‌شود.

از نظر روش‌های هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق بیشترین سهم را در مطالعات منتخب داشته‌اند، در حالی که روش‌های پیشرفته‌تری مانند یادگیری تقویتی، هوش مصنوعی تبیین‌پذیر و مدل‌های ترکیبی هنوز کاربرد

محدودتری دارند. این الگو بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود همچنان بر پیش‌بینی و تحلیل داده متمرکز بوده و توسعهٔ سامانه‌های تصمیم‌یار، کنترل تطبیقی و مدیریت هوشمند بلادرنگ هنوز به مرحلهٔ بلوغ کامل نرسیده است.

بررسی روش‌های اعتبارسنجی نیز نشان داد بخش قابل توجهی از مطالعات بر شبیه‌سازی یا داده‌های محدود آزمایشگاهی متکی هستند، در حالی که مطالعات مبتنی بر داده‌های واقعی ساختمان و ارزیابی‌های بلندمدت سهم کمتری دارند. این یافته، شکاف میان عملکرد گزارش‌شده مدل‌های هوش مصنوعی و قابلیت استقرار عملی آن‌ها در ساختمان‌های واقعی را تأیید می‌کند و ضرورت انجام مطالعات میدانی و اعتبارسنجی در شرایط واقعی را نشان می‌دهد.

برای تحلیل دقیق‌تر رابطه میان کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن، مطالعات منتخب از نظر نوع شاخص عملکرد گزارش‌شده نیز به صورت تطبیقی بررسی شدند. نتایج نشان داد ۸۲ مطالعه (۶۴/۱ درصد) فقط کاهش مصرف انرژی را به عنوان پیامد اصلی گزارش کرده‌اند، در حالی که ۲۴ مطالعه (۱۸/۸ درصد) انتشار CO_2 یا CO_2eq را به طور مستقیم اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین، ۲۲ مطالعه (۱۷/۲ درصد) هر دو شاخص انرژی و کربن را به صورت هم‌زمان گزارش کرده‌اند. این توزیع نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از ادبیات موجود هنوز کاهش مصرف انرژی را به عنوان جانشینی برای کاهش انتشار کربن در نظر می‌گیرد، در حالی که میزان کاهش واقعی انتشار کربن به عواملی مانند شدت کربن شبکهٔ برق، نوع حامل انرژی، زمان مصرف، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و مرز سیستم مورد استفاده در ارزیابی وابسته است.

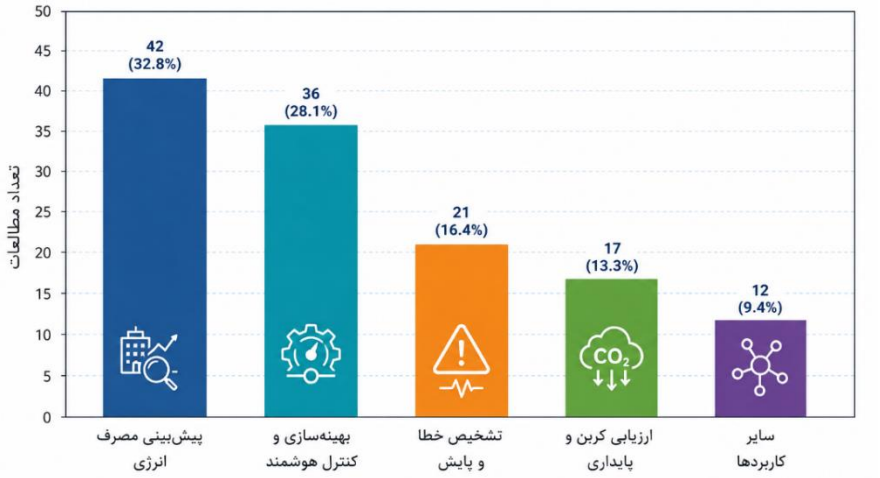
به منظور ارائهٔ یک تحلیل ساختاری، سه ویژگی شامل حوزهٔ کاربرد هوش مصنوعی، نوع الگوریتم و روش اعتبارسنجی برای هر یک از ۱۲۸ مطالعه استخراج و به صورت مجزا در ماتریس کدگذاری ثبت شدند. کدگذاری این ویژگی‌ها توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل انجام شد و میزان توافق میان آن‌ها با استفاده از ضریب کاپای کوهن برابر با ۰/۸۶ به دست آمد. موارد اختلاف نیز با بازبینی شواهد مطالعات و از طریق اجماع پژوهشگران حل‌وفصل شد. از این‌رو، مجموع فراوانی دسته‌های هر ویژگی برابر با ۱۲۸ مطالعه است، اما فراوانی‌های مربوط به ویژگی‌های مختلف با یکدیگر قابل جمع نیستند. نتایج این طبقه‌بندی در جدول ۳ و شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۳. توزیع آماری مطالعات منتخب بر اساس حوزهٔ کاربرد، نوع الگوریتم و روش اعتبارسنجی

ویژگی مورد بررسی	دسته‌بندی	تعداد مطالعه	درصد
حوزهٔ کاربرد AI	پیش‌بینی انرژی	42	32.8
	بهینه‌سازی و کنترل	36	28.1
	تشخیص خطا و پایش	21	16.4
	مدیریت کربن و پایداری	17	13.3
	سایر کاربردها	12	9.4
خانواده روش/الگوریتم	Machine Learning (ML)	48	37.5
	Deep Learning (DL)	34	26.6
	Reinforcement Learning (RL)	18	14.1
	Hybrid/Integrated Methods	28	21.8
روش اعتبارسنجی	شبیه‌سازی	47	36.7
	دادهٔ واقعی ساختمان	35	27.3
	مطالعهٔ موردی ترکیبی	27	21.1
	سایر روش‌ها	19	14.9

یادداشت: طبقه‌بندی روش‌ها بر اساس نقش روش اصلی در مطالعه و با استفاده از تعاریف عملیاتی ازپیش‌تعیین‌شده انجام شده است. Machine Learning (ML)، Deep Learning (DL) و Reinforcement Learning (RL) به عنوان خانواده‌های اصلی روش‌های یادگیری داده‌محور طبقه‌بندی شدند. روش‌های ترکیبی که در آن‌ها بیش از یک خانواده روش، یا ترکیبی از هوش مصنوعی با کنترل و بهینه‌سازی، به کار گرفته شده بود، در گروه Hybrid/Integrated Methods قرار گرفتند. Model Predictive Control (MPC) به‌تنهایی به عنوان یک الگوریتم هوش مصنوعی طبقه‌بندی نشد، بلکه به عنوان روش کنترل و بهینه‌سازی مبتنی بر مدل در نظر گرفته شد. همچنین، روش‌هایی مانند Genetic Algorithm (GA) و سایر الگوریتم‌های تکاملی، در صورت استفادهٔ مستقل، به عنوان روش‌های بهینه‌سازی/محاسبات هوشمند و نه به عنوان ML یا DL طبقه‌بندی شدند. در مطالعات ترکیبی، مؤلفه‌های هوش مصنوعی، کنترل و بهینه‌سازی به صورت جداگانه شناسایی شدند.

بر اساس جدول ۳ و شکل ۶، نتایج کمی نشان داد پیش‌بینی انرژی با ۴۲ مطالعه (۳۲/۸ درصد) و بهینه‌سازی و کنترل با ۳۶ مطالعه (۲۸/۱ درصد) پرتکرارترین حوزه‌های کاربردی در میان مطالعات منتخب بوده‌اند. این فراوانی بیانگر تمرکز بیشتر ادبیات پژوهشی بر این دو حوزه است و لزوماً به معنای اثربخشی بیشتر آن‌ها در کاهش مصرف انرژی یا انتشار کربن نیست. بنابراین، در این پژوهش، تعداد و سهم مطالعات به عنوان شاخصی از «رواج پژوهشی» تفسیر شده و نه به عنوان معیاری برای رتبه‌بندی اثربخشی کاربردهای هوش مصنوعی. برای تحلیل تفصیلی‌تر محتوای مطالعات و شناسایی محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی، در گام بعد مطالعات از منظر محورهای موضوعی و چالش‌های اجرایی بررسی شدند. این تحلیل در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ٦. توزیع مطالعات منتخب بر اساس حوزهٔ کاربرد هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن

در ادامه، برای گذار از توصیف کمی مجموعه مطالعات به تحلیل عمیق‌تر محتوای پژوهش‌ها، مطالعات منتخب از منظر حوزه‌های کاربرد، رویکردهای فناوری، دستاوردهای اصلی و چالش‌های پیاده‌سازی بررسی شدند. این تحلیل با طبقه‌بندی آماری ارائه‌شده در جدول ۳ تفاوت دارد. در جدول ۳، ویژگی‌های مطالعات منتخب شامل «حوزهٔ کاربرد»، «نوع الگوریتم» و «روش اعتبارسنجی» به صورت مستقل کدگذاری و شمارش شده‌اند؛ در حالی که تحلیل ارائه‌شده در جدول ۴ بر روابط موضوعی میان مطالعات و استخراج الگوهای غالب کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت انرژی ساختمان تمرکز دارد. از آنجا که یک مطالعه می‌تواند هم‌زمان در بیش از یک حوزهٔ کاربردی قرار گیرد، محورهای ارائه‌شده در جدول ۴ نباید به عنوان دسته‌بندی انحصاری مطالعات یا توزیع مستقل ۱۲۸ مطالعه تفسیر شوند، بلکه به عنوان چارچوبی تحلیلی برای شناسایی روندهای غالب و زمینه‌های اصلی کاربرد هوش مصنوعی در این حوزه ارائه شده‌اند. بر مبنای این تحلیل، چالش‌های مشترک، محدودیت‌های اجرایی و شکاف‌های پژوهشی شناسایی‌شده در جدول ۵ ارائه می‌شوند.

جدول ٤. تحلیل تطبیقی حوزه‌های اصلی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت انرژی ساختمان

محور پژوهشی	فناوری‌های غالب	دستاوردهای کلیدی
پیش‌بینی مصرف انرژی	ML، DL، شبکهٔ عصبی	افزایش دقت پیش‌بینی بار و مصرف
طراحی بهینهٔ ساختمان	الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی چندهدفه	بهینه‌سازی پوسته، فرم و مصالح
کنترلHVAC	RL، کنترل هوشمند	کاهش مصرف و بهبود آسایش
مدیریت انرژی ساختمان	BEMS، IoT، تحلیل داده	مدیریت پویای تجهیزات
تشخیص خطا	ML، DL، تشخیص ناهنجاری	شناسایی زودهنگام خرابی
انرژی تجدیدپذیر	پیش‌بینی PV، ذخیره‌سازی هوشمند	افزایش بهره‌برداری از منابع پاک

اگرچه مطالعات منتخب نشان‌دهندهٔ پیشرفت قابل توجه در توسعه و کاربرد روش‌های هوش مصنوعی برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها هستند، تحلیل محتوایی آن‌ها نشان می‌دهد پذیرش گسترده این فناوری‌ها همچنان با مجموعه‌ای از محدودیت‌های فنی، اجرایی و مدیریتی مواجه است. بررسی تطبیقی مطالعات نشان می‌دهد چالش‌ها تنها به عملکرد الگوریتم‌ها

محدود نبوده، بلکه عواملی مانند دسترسی به داده‌های واقعی و بلندمدت، قابلیت تعمیم مدل‌ها به ساختمان‌های مختلف، امکان اعتبارسنجی در شرایط عملیاتی، یکپارچه‌سازی سامانه‌های هوشمند، ملاحظات اقتصادی و الزامات امنیتی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پیاده‌سازی دارند. براین‌اساس، شکاف‌های پژوهشی استخراج‌شده از مطالعات منتخب در چند محور اصلی دسته‌بندی شده‌اند که در جدول ۵ ارائه می‌شوند.

بررسی شکاف‌های پژوهشی نشان می‌دهد مسیر آیندهٔ توسعهٔ هوش مصنوعی در مدیریت انرژی ساختمان باید از تمرکز صرف بر افزایش دقت الگوریتم‌ها به سمت توسعهٔ راهکارهای یکپارچه، قابل اعتماد و قابل استقرار در شرایط واقعی تغییر یابد. اگرچه مطالعات منتخب کارایی هوش مصنوعی را در پیش‌بینی مصرف انرژی، بهینه‌سازی عملکرد ساختمان و کنترل هوشمند سامانه‌ها تأیید کرده‌اند، تحلیل تطبیقی آن‌ها نشان می‌دهد شکاف اصلی ادبیات نه در کمبود الگوریتم‌های جدید، بلکه در محدودیت داده‌های عملیاتی، قابلیت تعمیم مدل‌ها، توجه ناکافی به عوامل انسانی و اقتصادی، و نبود ارزیابی یکپارچهٔ انرژی، کربن، امنیت و حریم خصوصی نهفته است.

جدول ۵. شکاف‌های پژوهشی و چالش‌های پیاده‌سازی هوش مصنوعی در ساختمان‌های هوشمند

حوزهٔ چالش	محدودیت‌های شناسایی‌شده	مسیرهای پژوهشی آینده
داده و اعتبارسنجی	کمبود داده واقعی و بلندمدت	توسعهٔ پایگاه داده عملیاتی
تعمیم‌پذیری مدل‌ها	وابستگی به شرایط خاص ساختمان	توسعهٔ مدل‌های انتقالی
انرژی و کربن	تمرکز بیشتر بر انرژی نسبت به کربن	ارزیابی هم‌زمان انرژی ـ کربن
اقتصاد پیاده‌سازی	توجه محدود به هزینهٔ زیرساخت دیجیتال	تحلیل هزینهٔ چرخهٔ عمر
تعامل انسان ـ سامانه	مدل‌سازی سادهٔ رفتار کاربران	ادغام رفتار واقعی کاربران
IoT و BIM	مشکلات استانداردسازی و همکاری	معماری یکپارچه داده
امنیت	بررسی جداگانه امنیت و انرژی	چارچوب مشترک امنیت ـ انرژی

در حوزهٔ پیش‌بینی مصرف و بار انرژی، مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به عنوان بالغ‌ترین کاربردهای هوش مصنوعی، عملکرد مناسبی در پیش‌بینی الگوهای مصرف و پشتیبانی از مدیریت هوشمند انرژی نشان داده‌اند. با این‌حال، وابستگی آن‌ها به کیفیت و پیوستگی داده‌ها، تغییرات اقلیمی، الگوهای بهره‌برداری و رفتار کاربران، قابلیت تعمیم نتایج را محدود می‌کند؛ از این‌رو، توسعهٔ مدل‌های سازگار با شرایط متغیر و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های واقعی و بلندمدت همچنان یکی از نیازهای مهم پژوهشی است.

در حوزهٔ بهینه‌سازی طراحی و کنترل بهره‌برداری، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، یادگیری تقویتی و مدل‌های داده‌محور امکان بهبود طراحی پوستهٔ ساختمان، عملکرد سامانه‌های HVAC و راهبردهای کنترلی را فراهم کرده‌اند. همان‌گونه که نتایج اعتبارسنجی در این مرور نشان داد، انتقال این راهکارها به ساختمان‌های واقعی همچنان نیازمند شواهد عملیاتی گسترده‌تر است. همچنین، در تشخیص خطا و نگهداری پیشگویانه، اگرچه تحلیل داده‌های بلادرنگ توانسته است عملکرد تجهیزات را بهبود دهد، کمبود داده‌های واقعی خرابی، ناهمگونی منابع داده و فقدان مجموعه‌داده‌های استاندارد، توسعهٔ مدل‌های قابل انتقال میان ساختمان‌های مختلف را محدود کرده است.

از منظر کاهش انتشار کربن، تحلیل مطالعات نشان می‌دهد بیشتر پژوهش‌ها کاهش مصرف انرژی را به عنوان شاخص جانشین کاهش کربن در نظر گرفته‌اند، در حالی که انتشار عملیاتی ساختمان علاوه بر میزان انرژی مصرفی، به‌شدت کربن شبکهٔ برق، نوع حامل انرژی و زمان مصرف نیز وابسته است. از این‌رو، ارزیابی اثربخشی هوش مصنوعی باید میان صرفه‌جویی انرژی و کاهش واقعی انتشار کربن تمایز قائل شود. همچنین، تنها تعداد محدودی از مطالعات، مصرف انرژی و انتشار کربن زیرساخت‌های محاسباتی مورد نیاز برای آموزش، استقرار و اجرای مدل‌های هوش مصنوعی را در قالب رویکردهای مبتنی بر چرخهٔ عمر مورد بررسی قرار داده‌اند؛ موضوعی که نقش مهمی در برآورد منافع خالص زیست‌محیطی سامانه‌های هوشمند دارد.

تحلیل مطالعات همچنین بیانگر آن است که موفقیت سامانه‌های هوش مصنوعی علاوه بر الگوریتم‌ها به زیرساخت داده و تعامل کاربران با سامانه‌های هوشمند وابسته است؛ بنابراین، یکپارچه‌سازی این مؤلفه‌ها شرط اصلی استقرار عملی این فناوری

محسوب می‌شود. با وجود ظرفیت بالای این فناوری‌ها در ایجاد داده‌های بلادرنگ و تصمیم‌گیری هوشمند، چالش‌هایی مانند قابلیت همکاری محدود سامانه‌ها، ناهمگونی داده‌ها، استانداردسازی ناکافی، امنیت سایبری و پذیرش کاربران همچنان از موانع اصلی استقرار عملی آن‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر این، بیشتر مطالعات، هزینه‌های مرتبط با زیرساخت داده، حسگرها، پردازش، نگهداری سامانه‌های هوشمند و آموزش نیروی انسانی را به صورت جامع ارزیابی نکرده‌اند.

بر این‌اساس، پنج شکاف اصلی پژوهشی شناسایی شد: (۱) وابستگی مدل‌ها به داده‌های محدود و باکیفیت، (۲) قابلیت تعمیم ناکافی در ساختمان‌ها و اقلیم‌های مختلف، (۳) توجه محدود به رفتار کاربران و پذیرش فناوری، (۴) کمبود ارزیابی جامع اقتصادی و هزینهٔ چرخهٔ عمر، (۵) ارزیابی ناکافی هم‌زمان انرژی، کربن، امنیت و حریم خصوصی. در مجموع، یافته‌های این مرور نشان می‌دهد اولویت آیندهٔ پژوهش‌ها باید توسعهٔ سامانه‌های یکپارچه و قابل استقرار باشد؛ موضوعی که در چارچوب مفهومی پژوهش حاضر جمع‌بندی شده است.

۵. بحث و تفسیر یافته‌ها

یافته‌های این مرور نشان می‌دهد چالش اصلی توسعهٔ هوش مصنوعی در ساختمان‌ها فقط به انتخاب یا بهبود الگوریتم محدود نیست، بلکه به شرایطی مربوط می‌شود که در آن مدل باید در یک سامانهٔ واقعی و پویا عمل کند. وابستگی عملکرد مدل به کیفیت داده، ویژگی‌های فیزیکی ساختمان، شرایط اقلیمی، الگوهای بهره‌برداری و زیرساخت دیجیتال نشان می‌دهد انتقال مستقیم مدل‌ها میان ساختمان‌ها بدون سازوکارهای سازگاری و اعتبارسنجی می‌تواند با افت عملکرد همراه باشد. از این منظر، قابلیت انتقال و سازگاری مدل باید به عنوان یکی از معیارهای اصلی بلوغ راهکارهای هوش مصنوعی در ساختمان‌ها در نظر گرفته شود.

از منظر یکپارچه‌سازی، نقش فناوری‌هایی مانند IoT، BMS، BIM و Digital Twin زمانی معنادارتر می‌شود که بتوانند داده و تصمیم‌گیری را در یک زنجیرهٔ عملیاتی مشترک به هم متصل کنند. در غیر این‌صورت، افزودن فناوری‌های دیجیتال به ساختمان لزوماً به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود. بنابراین، ارزش هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن به میزان هماهنگی میان زیرساخت داده، مدل تحلیلی، سامانهٔ کنترل و فرایند ارزیابی عملکرد وابسته است. این موضوع ضرورت حرکت از راهکارهای منفرد به سمت معماری‌های یکپارچه را نشان می‌دهد.

از منظر کربن‌زدایی نیز یافته‌ها نشان می‌دهد کاهش مصرف انرژی باید در چارچوب شرایط واقعی تولید و مصرف انرژی تفسیر شود. شدت کربن شبکه، نوع حامل انرژی و زمان مصرف می‌توانند رابطهٔ میان صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار را تغییر دهند. افزون بر این، مصرف انرژی و پیامدهای کربنی زیرساخت محاسباتی هوش مصنوعی نشان می‌دهد ارزیابی پایداری این فناوری باید فراتر از عملکرد ساختمان انجام شود. بنابراین، رویکرد Green AI می‌تواند مکمل ارزیابی عملکرد ساختمان باشد و امکان بررسی هم‌زمان منافع و هزینه‌های زیست‌محیطی سامانه‌های هوشمند را فراهم کند.

برآیند این تحلیل نشان می‌دهد شکاف اصلی ادبیات در کمبود الگوریتم‌های جدید نیست، بلکه در قابلیت پیاده‌سازی، تعمیم و مقیاس‌پذیری آن‌ها در ساختمان‌های واقعی قرار دارد؛ موضوعی که ضرورت ارزیابی سامانه‌های هوشمند در شرایط عملیاتی را برجسته می‌کند.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت گذار از «هوش مصنوعی به عنوان یک الگوریتم» به «هوش مصنوعی به عنوان بخشی از یک سامانهٔ یکپارچهٔ ساختمان کم‌کربن» تأکید دارد. این جمع‌بندی مبنای توسعهٔ چارچوب مفهومی پیشنهادی پژوهش است که تلاش می‌کند ارتباط میان ابعاد فنی، داده‌ای، رفتاری، اقتصادی و امنیتی را در قالب یک ساختار یکپارچه تبیین کند.

۶. چارچوب پیشنهادی یکپارچه برای کاربرد هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن

بر اساس یافته‌های مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی مطالعات منتخب، توسعهٔ ساختمان‌های کم‌کربن مبتنی بر هوش مصنوعی مستلزم رویکردی یکپارچه است که علاوه بر مدل‌های هوشمند، تعامل میان سامانه‌های فیزیکی ساختمان، زیرساخت‌های داده، فناوری‌های دیجیتال، رفتار کاربران و ملاحظات اقتصادی، زیست‌محیطی و امنیتی را نیز در بر گیرد. بر این‌اساس، پژوهش حاضر

یک چارچوب مفهومی یکپارچه پیشنهاد می‌کند که هدف آن کاهش شکاف میان قابلیت‌های فنی هوش مصنوعی و الزامات پیاده‌سازی در ساختمان‌های واقعی است. معماری این چارچوب در شکل ۷ ارائه شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی فقط مجموعه‌ای از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نیست، بلکه سازوکاری برای یکپارچه‌سازی جریان داده، تحلیل هوشمند، تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد در کل چرخهٔ مدیریت انرژی ساختمان فراهم می‌کند. در این چارچوب، دستیابی به ساختمان‌های کم‌کربن نتیجهٔ تعامل مستمر میان داده، مدل‌های هوشمند، سامانه‌های کنترل و شاخص‌های پایداری است.

چارچوب پیشنهادی از پنج لایهٔ اصلی تشکیل شده است:

۱. لایهٔ فیزیکی و انرژی شامل پوستهٔ ساختمان، شرایط اقلیمی، سامانه‌های HVAC، روشنایی، تجهیزات الکتریکی، منابع انرژی تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و رفتار کاربران است و وضعیت واقعی عملکرد ساختمان را توصیف می‌کند.

۲. لایه داده و زیرساخت دیجیتال وظیفهٔ جمع‌آوری، انتقال، پالایش و مدیریت داده‌ها را به عهده دارد. در این لایه، حسگرهای هوشمند، اینترنت اشیا، سامانهٔ مدیریت ساختمان (BMS)، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و دوقلوهای دیجیتال بستر لازم برای ایجاد داده‌های قابل اعتماد و یکپارچه را فراهم می‌کنند.

۳. لایهٔ هوش مصنوعی و تحلیل شامل مدل‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، تشخیص ناهنجاری، بهینه‌سازی و یادگیری تقویتی است که برای پیش‌بینی مصرف انرژی، تشخیص خطا و استخراج راهبردهای بهینه کنترلی به کار می‌روند. در این پژوهش، علاوه بر دقت پیش‌بینی، معیارهایی مانند قابلیت تعمیم، تفسیرپذیری و قابلیت استقرار عملی نیز در انتخاب مدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

۴. لایهٔ تصمیم‌گیری و کنترل خروجی مدل‌های هوشمند را به اقدامات اجرایی نظیر کنترل سامانه‌های HVAC، مدیریت روشنایی، جابه‌جایی بار، مدیریت ذخیره‌سازها و هماهنگی میان تولید و مصرف انرژی تبدیل می‌کند. این لایه با رویکرد تصمیم‌گیری چندهدفه، میان کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن، آسایش حرارتی و هزینه‌های بهره‌برداری تعادل برقرار می‌کند.

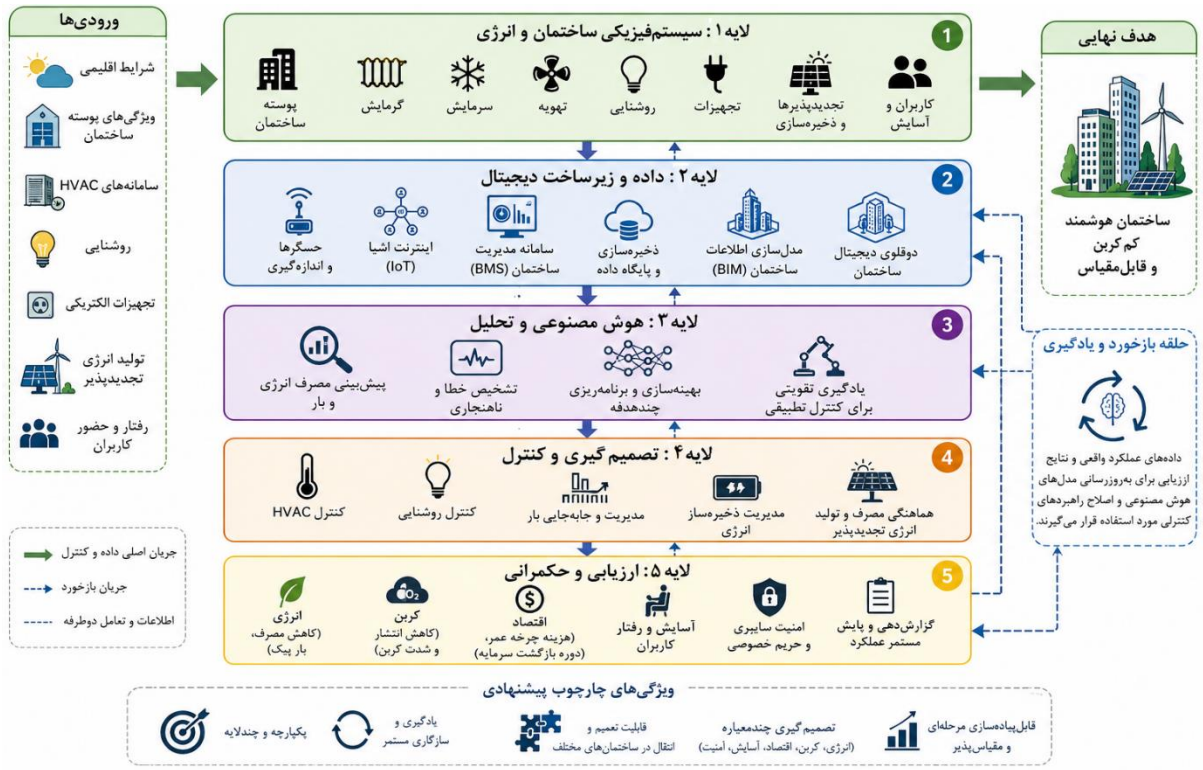
۵. لایهٔ ارزیابی و حکمرانی عملکرد سامانه را بر اساس شاخص‌های انرژی، انتشار کربن، هزینهٔ چرخهٔ عمر، قابلیت اطمینان، امنیت سایبری، حریم خصوصی و میزان پذیرش کاربران ارزیابی می‌کند و از طریق بازخورد مستمر، زمینهٔ بهبود مدل‌ها و راهبردهای کنترلی را فراهم می‌سازد.

ویژگی متمایز این چارچوب، وجود حلقهٔ بازخورد پیوسته میان عملکرد واقعی ساختمان و مدل‌های هوش مصنوعی است؛ به گونه‌ای که مدل‌ها با دریافت داده‌های جدید، تغییر شرایط اقلیمی و الگوهای بهره‌برداری، به صورت دوره‌ای بازآموزی و به‌روزرسانی می‌شوند. این سازوکار، محدودیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها را کاهش داده و قابلیت سازگاری سامانه را در شرایط واقعی افزایش می‌دهد.

برای تبیین دقیق‌تر جایگاه چارچوب پیشنهادی، آن با رویکردهای منتخب موجود در زمینهٔ مدیریت انرژی ساختمان، کاربردهای هوش مصنوعی و Digital Twin مقایسه شد. این مقایسه بر تمرکز اصلی، مؤلفه‌های تحت پوشش و محدودیت‌های هر رویکرد در ارتباط با استقرار یکپارچهٔ هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن استوار است. نتایج مقایسه در جدول ۶ ارائه شده است.

مقایسه با رویکردهای موجود نشان می‌دهد مطالعات پیشین عمدتاً بر یک یا چند کارکرد مشخص، مانند پایش و کنترل، پیش‌بینی مصرف، تشخیص خطا، بهینه‌سازی یا ایجاد دوقلوی دیجیتال تمرکز داشته‌اند. بنابراین، تمایز اصلی چارچوب پیشنهادی در ارائه الگوریتم جدید نیست، بلکه در سازمان‌دهی و اتصال این قابلیت‌ها در یک معماری پنج‌لایه است که زیرساخت فیزیکی و داده‌ای را به تحلیل هوشمند، تصمیم‌گیری، کنترل و ارزیابی عملکرد متصل می‌کند. در این معماری، انرژی و کربن در کنار ملاحظات اقتصادی، انسانی، امنیت و حریم خصوصی و با استفاده از یک حلقه بازخورد میان عملکرد واقعی ساختمان و مدل‌های هوشمند مورد توجه قرار می‌گیرند.

چارچوب پیشنهادی همچنین یک مسیر تدریجی برای استقرار عملی هوش مصنوعی ارائه می‌دهد که شامل ارزیابی وضعیت موجود، توسعهٔ زیرساخت داده، اعتبارسنجی مدل‌ها، استقرار راهبردهای کنترلی و ارزیابی عملکرد است. این رویکرد مرحله‌ای، ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد و امکان توسعهٔ تدریجی سامانه در ساختمان‌های واقعی را فراهم می‌کند.



شکل ۷. چارچوب مفهومی پیشنهادی برای کاربرد یکپارچهٔ هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن

جدول ٦. مقایسهٔ چارچوب پیشنهادی با رویکردهای منتخب موجود در مدیریت هوشمند انرژی ساختمان

رویکرد / مطالعه	تمرکز اصلی	مهم‌ترین مؤلفه‌های تحت پوشش	محدودیت اصلی نسبت به چارچوب پیشنهادی	تمایز چارچوب پیشنهادی
رویکردهای BMS و مدیریت انرژی ساختمان	پایش، مدیریت و کنترل تجهیزات	زیرساخت ساختمان، داده، پایش و کنترل	تمرکز عمده بر مدیریت عملیاتی و پوشش محدود تحلیل هوشمند، کربن و ملاحظات چندبعدی	اتصال BMS به تحلیل AI، تصمیم‌گیری، ارزیابی عملکرد و بازخورد
رویکردهای AI محور [۲۴]	پیش‌بینی، تشخیص خطا و تحلیل سامانه‌های HVAC	داده، یادگیری ماشین/عمیق، تحلیل و تشخیص	تمرکز عمده بر یک مسئله یا عملکرد مشخص و محدودیت در پوشش عوامل اجرایی و حکمرانی	قرار دادن AI در یک معماری چندلایه و اتصال آن به کنترل و ارزیابی جامع
رویکردهای Digital Twin [۶]	بازنمایی دیجیتال، پایش و مدیریت انرژی	ساختمان، داده، Digital Twin و تحلیل	تمرکز بیشتر بر تعامل مدل دیجیتال و ساختمان و پوشش محدود برخی ابعاد مدیریتی و اجرایی	ترکیب Digital Twin با AI، کنترل، ارزیابی انرژی و کربن و حکمرانی
رویکردهای Digital Twin [۲۶]	Digital Twin در مرحلهٔ بهره‌برداری	مدل دیجیتال، داده، پایش و بهینه‌سازی	تمرکز بر بهره‌برداری و بهینه‌سازی، بدون معماری جامع برای تمام ابعاد استقرار AI	ایجاد مسیر یکپارچه از داده و AI تا تصمیم، کنترل و ارزیابی عملکرد
رویکردهای Digital Twin [۲۷]	پیش‌بینی مصرف انرژی	Digital Twin، داده و پیش‌بینی	تمرکز اصلی بر پیش‌بینی و محدودیت در پوشش کربن، اقتصاد، عوامل انسانی و حکمرانی	توسعهٔ چارچوب از پیش‌بینی منفرد به مدیریت و ارزیابی یکپارچه
چارچوب پیشنهادی این پژوهش	استقرار یکپارچهٔ AI برای ساختمان‌های کم‌کربن	زیرساخت، داده، AI، تصمیم‌گیری، کنترل، انرژی، کربن، اقتصاد، انسان، امنیت و حریم خصوصی	—	یکپارچه‌سازی پنج‌لایه و ایجاد حلقهٔ بازخورد میان عملکرد واقعی ساختمان و مدل‌های هوشمند

بر این‌اساس، پنج شکاف شناسایی‌شده در ادبیات در معماری پیشنهادی به الزامات طراحی تبدیل شده‌اند: نیاز به داده‌های قابل اعتماد در لایه داده، قابلیت انتقال مدل‌ها در لایهٔ هوش مصنوعی، توجه به رفتار کاربران در لایهٔ فیزیکی و تصمیم‌گیری، ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی در لایهٔ ارزیابی و ملاحظات امنیت و حریم خصوصی در سازوکار حکمرانی. فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، BIM و دوقلوهای دیجیتال نیز به عنوان زیرساخت‌های پشتیبان این یکپارچه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور ارزیابی اولیه چارچوب مفهومی پیشنهادی، فرایند اعتبارسنجی مبتنی بر نظر ۲۵ نفر از خبرگان حوزه‌های مدیریت انرژی ساختمان، سامانه‌های هوشمند، هوش مصنوعی و طراحی ساختمان انجام شد [۴۴]. هدف این مرحله، بررسی جامعیت چارچوب، انسجام منطقی مؤلفه‌ها و قابلیت کاربرد آن در توسعهٔ سامانه‌های هوشمند ساختمان‌های کم‌کربن بود. خبرگان به صورت هدفمند و بر اساس سوابق پژوهشی و تجربهٔ حرفه‌ای در زمینه‌هایی نظیر مدیریت انرژی ساختمان، ساختمان‌های کم‌کربن، شبیه‌سازی انرژی، سامانه‌های HVAC، هوش مصنوعی و شبکه‌های هوشمند انتخاب شدند. تعداد خبرگان نیز با توجه به دامنهٔ متداول مطالعات اعتبارسنجی چارچوب‌های مفهومی و با استناد به منابع روش‌شناختی تعیین شد [۴۵ و ۴۶].

خبرگان با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند. معیارهای ورود شامل داشتن حداقل پنج سال سابقهٔ پژوهشی یا حرفه‌ای در یکی از حوزه‌های مدیریت انرژی ساختمان، هوش مصنوعی، سامانه‌های HVAC، ساختمان‌های هوشمند، BIM، دوقلوهای دیجیتال یا طراحی ساختمان‌های کم‌مصرف و نیز داشتن سابقهٔ انتشار مقالهٔ علمی یا مشارکت در پروژه‌های مرتبط بود. دعوت از خبرگان از طریق پست الکترونیکی دانشگاهی یا ارتباطات حرفه‌ای انجام شد و مشارکت در ارزیابی به صورت داوطلبانه و بدون دریافت پاداش مالی صورت گرفت.

برای ارزیابی چارچوب، پرسش‌نامه بر اساس پنج‌لایه چارچوب مفهومی و اهداف پژوهش طراحی شد و پیش از توزیع نهایی، از نظر وضوح عبارت‌ها و تناسب شاخص‌ها بازبینی شد. شش معیار اصلی شامل جامعیت لایه‌ها، قابلیت کاربرد، یکپارچه‌سازی فناوری‌ها، توجه به کربن و پایداری، توجه به عوامل اقتصادی و انسانی، و امنیت و حریم خصوصی با استفاده از مقیاس لیکرت پنج‌درجه‌ای (۱=کاملاً نامرتبط تا ۵=کاملاً مرتبط) ارزیابی شدند. برای تحلیل نتایج، میانگین امتیاز، انحراف معیار و درصد توافق محاسبه شد؛ به طوری که «توافق» به عنوان نسبت پاسخ‌هایی که امتیاز ۴ یا ۵ دریافت کرده بودند، نسبت به کل ۲۵ پاسخ تعریف شد (جدول ۷).

نتایج اعتبارسنجی نشان داد چارچوب پیشنهادی از دیدگاه خبرگان، از نظر جامعیت، انسجام ساختاری و قابلیت کاربرد در طراحی و توسعهٔ سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی ساختمان، از مقبولیت مناسبی برخوردار است. همچنین، تأکید هم‌زمان بر یکپارچه‌سازی زیرساخت داده، مدل‌های هوش مصنوعی، سامانه‌های انرژی، عوامل انسانی و الزامات پایداری، از مهم‌ترین نقاط قوت چارچوب ارزیابی شد. با این‌حال، خبرگان نیز بر ضرورت اعتبارسنجی میدانی و ارزیابی کمی چارچوب در ساختمان‌های واقعی پیش از تعمیم آن به کاربردهای گسترده تأکید کردند.

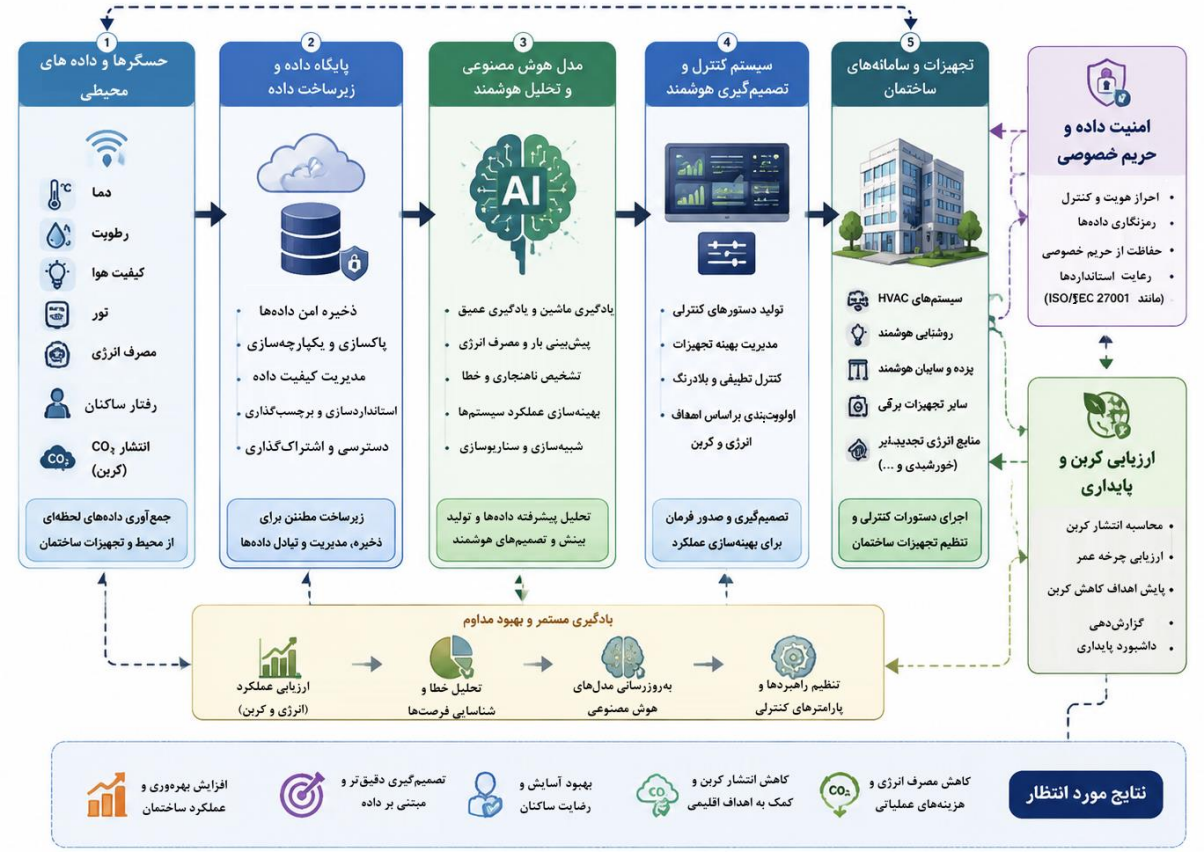
جدول ۷. نتایج اعتبارسنجی اولیهٔ چارچوب مفهومی پیشنهادی بر اساس ارزیابی خبرگان

معیار ارزیابی	توضیح	میانگین امتیاز (از ۵)	انحراف معیار	درصد توافق (امتیاز ≥ ٤)
جامعیت لایه‌ها و ابعاد میان‌لایه‌ای چارچوب	پوشش لایه‌های فیزیکی، داده، هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری و ارزیابی و نیز عوامل انسانی، اقتصادی و امنیتی	۴/۵	۰/۵۱	۸۸
قابلیت پیاده‌سازی واقعی	امکان انتقال چارچوب از محیط پژوهشی و شبیه‌سازی به ساختمان واقعی	۴/۳	۰/۶۲	۷۶
یکپارچه‌سازی فناوری‌ها	ارتباط و قابلیت تعامل میان AI، IoT، BIM، دوقلوهای دیجیتال و BMS	۴/۶	۰/۴۸	۹۲
توجه به کربن و پایداری	ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و انتشار کربن	۴/۴	۰/۵۵	۸۴
توجه به عوامل اقتصادی و انسانی	لحاظ هزینه، بهره‌برداری، پذیرش و عوامل انسانی	۴/۲	۰/۶۸	۷۲
امنیت و حریم خصوصی	لحاظ الزامات اعتماد و حکمرانی داده	۴/۳	۰/۶۰	۸۰

همان‌گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر انحراف معیار (۰/۴۸ تا ۰/۶۸) بیانگر پراکندگی نسبتاً پایین پاسخ‌ها و وجود سطح مناسبی از همگرایی در ارزیابی خبرگان است. همچنین، درصد توافق (بر اساس نسبت پاسخ‌های با امتیاز ۴ یا ۵) بین ۷۲ تا ۹۲ درصد قرار دارد. بیشترین توافق مربوط به معیار «یکپارچه‌سازی فناوری‌ها» (۹۲ درصد) و کمترین توافق مربوط به «توجه به عوامل اقتصادی و انسانی» (۷۲ درصد) است. این نتایج نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی از نظر انسجام مفهومی و جامعیت ساختاری از مقبولیت مناسبی برخوردار است، هرچند برخی ابعاد آن، به‌ویژه جنبه‌های اجرایی و اقتصادی، نیازمند بررسی بیشتر در مطالعات میدانی هستند.

در مجموع، نتایج اعتبارسنجی اولیه نشان می‌دهد چارچوب پیشنهادی از نظر جامعیت، انسجام مفهومی و قابلیت کاربرد، از پذیرش مناسبی نزد خبرگان برخوردار است. با این‌حال، این ارزیابی به‌تنهایی برای اثبات اثربخشی چارچوب در شرایط واقعی کافی نیست و اعتبارسنجی میدانی با استفاده از داده‌های عملیاتی بلندمدت، ساختمان‌های با کاربری و اقلیم‌های مختلف و مقایسه با رویکردهای موجود، به عنوان گام بعدی پژوهش ضروری است.

شکل ۸، مسیر عملیاتی اجرای چارچوب را از دریافت داده‌های ساختمان تا تحلیل، تصمیم‌گیری و اعمال کنترل نشان می‌دهد. این معماری بر این اصل استوار است که عملکرد سامانه باید از طریق داده‌های بهره‌برداری و بازخورد مستمر ارزیابی شود؛ بنابراین، کیفیت داده، قابلیت یکپارچه‌سازی و پذیرش عملیاتی از پیش‌نیازهای اصلی استقرار آن محسوب می‌شوند.



شکل ۸. معماری مفهومی سیستم مدیریت هوشمند انرژی ساختمان مبتنی بر هوش مصنوعی، از جمع‌آوری داده تا کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی

این معماری نشان می‌دهد هوش مصنوعی به عنوان یک‌لایه تصمیم‌گیر، بین داده‌های حاصل از محیط ساختمان و سیستم‌های کنترلی قرار گرفته و از طریق یادگیری مستمر می‌تواند عملکرد انرژی ساختمان را بهبود دهد. با این‌حال، اثربخشی این سامانه به کیفیت داده، قابلیت یکپارچه‌سازی با زیرساخت‌های موجود و پذیرش عملیاتی وابسته است.

بازه‌های زمانی ارائه‌شده در جدول ۸ به عنوان یک نقشهٔ راه مفهومی پیشنهاد شده‌اند و بر اساس تحلیل کیفی مطالعات منتخب، سطح بلوغ فناوری‌ها، پیش‌نیازهای زیرساختی و توالی منطقی مراحل پیاده‌سازی تعیین شده‌اند؛ از این‌رو، نباید به عنوان یک زمان‌بندی قطعی یا استخراج‌شده از شواهد تجربی تفسیر شوند. همچنین، ارزیابی موفقیت چارچوب پیشنهادی در کاربردهای واقعی می‌تواند بر پایهٔ شاخص‌هایی مانند کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن، دقت مدل، قابلیت اطمینان سامانه، هزینهٔ چرخهٔ عمر و یکپارچگی با سامانهٔ مدیریت ساختمان (BMS) انجام شود که با استفاده از داده‌های بهره‌برداری و مقایسهٔ عملکرد قبل و بعد از استقرار سامانهٔ قابل اندازه‌گیری هستند.

۷. پیامدهای پژوهش برای استانداردهای بین‌المللی و سیاست‌های پایداری

یافته‌های این مرور نشان می‌دهد قابلیت‌هایی مانند پایش مستمر، تحلیل داده‌های بهره‌برداری، پیش‌بینی مصرف انرژی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری با برخی اصول مطرح‌شده در استانداردهای مدیریت انرژی و ارزیابی عملکرد ساختمان، از جمله ISO 50001 و ISO 52000، همخوانی مفهومی دارند. با این‌حال، این پژوهش ارزیابی رسمی انطباق چارچوب با این استانداردها را انجام نداده است. از این‌رو، یکی از مسیرهای آینده، توسعهٔ شاخص‌ها و پروتکل‌های اعتبارسنجی مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های هوش مصنوعی در ساختمان‌های واقعی است.

۸. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای پژوهشی

این پژوهش با بهره‌گیری از یک مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی ۱۲۸ مطالعهٔ منتخب، تصویری جامع از روندهای پژوهشی، رویکردهای فناورانه، فرصت‌ها، چالش‌ها و شکاف‌های دانشی مرتبط با کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت انرژی ساختمان و کاهش انتشار کربن ارائه کرد. نتایج نشان داد هوش مصنوعی به یکی از فناوری‌های کلیدی در توسعهٔ سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی تبدیل شده و کاربردهای گسترده‌ای در پیش‌بینی مصرف انرژی، بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های HVAC، تشخیص خطا، مدیریت بار، تحلیل رفتار کاربران و پشتیبانی از تصمیم‌گیری یافته است. با این‌حال، اثربخشی این فناوری به عوامل متعددی از جمله کیفیت و حجم داده‌ها، ویژگی‌های ساختمان، شرایط اقلیمی، نوع الگوریتم، روش اعتبارسنجی و شرایط واقعی بهره‌برداری وابسته است؛ بنابراین، تعمیم نتایج مطالعات منفرد به تمامی ساختمان‌ها و شرایط عملیاتی باید بااحتیاط انجام شود.

جدول ۸. نقشهٔ راه پیشنهادی برای پیاده‌سازی تدریجی هوش مصنوعی در ساختمان‌های کم‌کربن

گام	افق زمانی پیشنهادی	هدف اصلی	فناوری‌های کلیدی	ساختمان‌های هدف	دستاورد مورد انتظار
آماده‌سازی و پایلوت	مرحلهٔ اول	ایجاد زیرساخت داده و شناسایی الگوهای مصرف	حسگرهای پایه، کنتورهای هوشمند، پایش غیرتهاجمی، جمع‌آوری داده	ساختمان‌های آموزشی و اداری کوچک و پایلوت‌های پژوهشی	ایجاد پایگاه‌داده قابل‌اعتماد، شناسایی الگوهای مصرف و آماده‌سازی زیرساخت برای توسعهٔ مدل‌های هوشمند
توسعهٔ مدل‌های هوشمند	مرحلهٔ دوم	پیش‌بینی مصرف و بهینه‌سازی اولیه	الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مدل‌های پیش‌بینی، تحلیل داده، BMS	ساختمان‌های اداری و تجاری متوسط و بزرگ	بهبود پیش‌بینی مصرف، تشخیص الگوهای غیرعادی و ایجاد مبنای داده‌محور برای تصمیم‌گیری و کنترل
مقیاس‌پذیری و یکپارچه‌سازی	مرحلهٔ سوم	اتصال هوش مصنوعی به سامانه‌های واقعی ساختمان	IoT، سیستم‌های کنترل هوشمند، یادگیری تقویتی، دوقلوهای دیجیتال اولیه	ساختمان‌های مسکونی و چندمنظوره	توسعهٔ کنترل تطبیقی، هماهنگی میان سامانه‌های انرژی و افزایش قابلیت مقیاس‌پذیری و انتقال راهکارها
بلوغ و مدیریت هوشمند کربن	مرحلهٔ چهارم	دستیابی به مدیریت یکپارچه انرژی و کربن	دوقلوهای دیجیتال، شبکه‌های هوشمند، هوش مصنوعی مولد، تحلیل چرخهٔ عمر کربن	ساختمان‌های شهری و مجموعه‌های بزرگ	حرکت به سمت بهره‌برداری خودکار و سازگار، مدیریت یکپارچهٔ انرژی و کربن و ارزیابی هم‌زمان عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی

تحلیل مطالعات نشان داد بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود بر توسعهٔ الگوریتم‌ها و افزایش دقت پیش‌بینی تمرکز داشته‌اند، در حالی که موضوعاتی مانند قابلیت اطمینان بلندمدت، مقیاس‌پذیری، یکپارچه‌سازی با سامانه‌های مدیریت ساختمان، تحلیل اقتصادی، امنیت داده، پذیرش کاربران و ارزیابی هم‌زمان انرژی، کربن و آسایش کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این موضوع نشان‌دهندهٔ وجود فاصلهٔ میان عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی در محیط‌های شبیه‌سازی‌شده و قابلیت استقرار آن‌ها در شرایط واقعی بهره‌برداری است.

بر اساس شواهد استخراج‌شده، این پژوهش یک چارچوب مفهومی یکپارچه ارائه کرد که ابعاد فنی، مدیریتی، اقتصادی، محیط زیستی و بهره‌برداری را در قالب یک ساختار منسجم به یکدیگر مرتبط می‌سازد. ارزیابی اولیه مبتنی بر نظر ۲۵ نفر از خبرگان نشان داد این چارچوب از نظر جامعیت، انسجام مفهومی و قابلیت کاربرد از مقبولیت مناسبی برخوردار است؛ با این‌حال، این یافته‌ها نباید به عنوان شواهد قطعی دربارهٔ اثربخشی یا قابلیت پیاده‌سازی آن در شرایط واقعی تفسیر شوند. در نتیجه، چارچوب پیشنهادی را می‌توان به عنوان یک مدل مفهومی مبتنی بر شواهد برای سازمان‌دهی دانش موجود، هدایت پژوهش‌های آینده و پشتیبانی از طراحی مطالعات کاربردی در نظر گرفت، در حالی که ارزیابی عملکرد آن در ساختمان‌های واقعی و با استفاده از داده‌های عملیاتی بلندمدت، گام ضروری بعدی برای اعتبارسنجی عملی آن محسوب می‌شود.

یافته‌های این مرور نظام‌مند همچنین بر اهمیت توجه به مفهوم «هوش مصنوعی سبز (Green AI)» تأکید دارد. اگرچه هوش مصنوعی ظرفیت قابل توجهی برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن ساختمان‌ها دارد، هزینه‌های زیست‌محیطی خود فناوری، شامل مصرف انرژی محاسباتی، نیازهای زیرساختی و ردپای کربنی چرخهٔ عمر سامانه‌های دیجیتال، در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است. از این‌رو، پژوهش‌های آینده باید علاوه بر شاخص‌هایی مانند دقت پیش‌بینی و صرفه‌جویی انرژی، معیارهایی مانند بهره‌وری محاسباتی، مصرف انرژی مدل‌ها و اثرات کربنی زیرساخت هوش مصنوعی را نیز در ارزیابی سامانه‌های هوشمند لحاظ کنند.

بر اساس شکاف‌های شناسایی‌شده، مسیرهای آیندهٔ پژوهش باید از پیشنهادهای کلی به سمت توسعه و اعتبارسنجی راهکارهای عملیاتی حرکت کند. نخست، ایجاد مجموعه‌داده‌های استاندارد و چندساله از ساختمان‌های واقعی شامل اطلاعات مصرف انرژی، شرایط محیطی، عملکرد تجهیزات HVAC، الگوهای حضور کاربران و داده‌های بهره‌برداری، برای کاهش وابستگی مدل‌ها به داده‌های محدود ضروری است. این مجموعه‌داده‌ها می‌توانند مبنایی برای آموزش، مقایسه و ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی در ساختمان‌هایی با کاربری و شرایط اقلیمی متفاوت باشند.

دوم، برای افزایش قابلیت تعمیم و اعتمادپذیری مدل‌ها، پژوهش‌های آینده باید بر توسعهٔ روش‌هایی مانند یادگیری انتقالی، سازگاری برخط، یادگیری فدرال و مدل‌های قابل تبیین تمرکز کرده و عملکرد آن‌ها را در چندین ساختمان واقعی اعتبارسنجی کنند. همچنین، ادغام داده‌های رفتاری کاربران، الگوهای استفاده از فضاها و بازخوردهای آسایش حرارتی می‌تواند به توسعهٔ سامانه‌های تصمیم‌گیری نزدیک‌تر به شرایط واقعی بهره‌برداری کمک کند.

سوم، ارزیابی اقتصادی و اجرایی سامانه‌های هوش مصنوعی باید فراتر از تحلیل عملکرد فنی انجام شود. مطالعات آینده باید هزینه‌های مرتبط با حسگرها، زیرساخت داده، پردازش محاسباتی، نگهداری مدل‌ها، آموزش نیروی انسانی و امنیت سایبری را در کنار مزایای حاصل از کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن بررسی کنند. همچنین، توسعهٔ چارچوب‌های ارزیابی چندهدفه که به صورت هم‌زمان عملکرد انرژی، کربن، هزینه، آسایش کاربران، امنیت داده و قابلیت بهره‌برداری را ارزیابی کنند، می‌تواند مسیر استقرار عملی سامانه‌های هوشمند در ساختمان‌های کم‌کربن را هموار سازد.

در مجموع، نتایج این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در توسعهٔ ساختمان‌های هوشمند، کم‌مصرف و کم‌کربن ایفا کند؛ با این‌حال، تحقق این ظرفیت نیازمند گذار از رویکرد الگوریتم‌محور به رویکرد سامانه‌محور است. این گذار مستلزم ترکیب توسعهٔ الگوریتم‌های پیشرفته با زیرساخت داده مناسب، اعتبارسنجی در مقیاس واقعی، یکپارچه‌سازی فناوری‌های هوشمند، توجه به عوامل انسانی و اقتصادی، و ارزیابی مستمر عملکرد است. در این چارچوب، چارچوب مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای هدایت تحقیقات آینده و حمایت از تصمیم‌گیری پژوهشگران، صنعت و سیاست‌گذاران در مسیر توسعهٔ سامانه‌های هوشمند مدیریت انرژی ساختمان مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[1]. (IEA) IEA. Energy Efficiency 2025: Buildings. Paris, France; 2025.

[2]. SeyedAboutorabi RS, Yousefi H, Abdoos M. A comparative analysis of the carbon footprint in green building materials: a case study of Norway. Environmental Science and Pollution Research. 2024;31: 59320–59341.

[3]. Hernández JL, Miguel Id, Vélez F, Vasallo A. Challenges and opportunities in European smart buildings energy management: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024;199:114472.

[4]. Mathumitha R, Rathika P, Manimala K. Intelligent deep learning techniques for energy consumption forecasting in smart buildings: a review. Artificial Intelligence Review. 2024;57:35.

[5]. Cai S, Gou Z. Defining the energy role of buildings as flexumers: A review of definitions, technologies, and applications. Energy and Buildings. 2024;303:113821.

[6]. Yeom S, Kim J, Kang H, Jung S, Hong T. Digital twin (DT) and extended reality (XR) for building energy management. Energy and Buildings. 2024;323:114746.

[7]. Mohandes SR, Zhang X, Mahdiyar A. A comprehensive review on the application of artificial neural networks in building energy analysis. Neurocomputing. 2019;340:55-75.

[8]. Abbasian Hamedani E, Talebi S. Modeling and long-term forecasting of CO2 emissions in Asia: An optimized Artificial Neural Network approach with consideration of renewable energy scenarios. Energy Conversion and Management: X. 2025;26:101030.

[9]. Nadalipour Kaldeh Sh, Yousefi H, Noorollahi Y, Abdoos M. Integration of renewable sources in buildings: A review of energy savings, feasibility, and challenges. Energy Reports. 2025;14: 3905-393.

[10]. Abbasian Hamedani E, Roghani Araghi A, Hajinezhad A, Yousefi H. A scenario-based techno-economic optimization framework for power-to-X residential energy hubs across diverse climate conditions. Energy. 2026;356: 141155.

[11]. Katal A, Dahiya S, Choudhury T. Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies. Cluster Computing. 2023;26:1845–75.

[12]. Nayak SC, Dehuri S, Cho S-B, Favorskaya M, editors. Green Artificial Intelligence and Industrial Applications (G-AIIA)2025; Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland.

[13]. Tabbakh A, Amin LA, Islam M, Mahmud GMI, Chowdhury IK, Mukta MSH .Towards sustainable AI: a comprehensive framework for Green AI. Discover Sustainability. 2024;5, article number 408.

[14]. Al-Shargabi AA, Almhafdy A, Ibrahim DM, Alghieth M, Chiclana F. Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. Journal of Building Engineering. 2022;54:104577.

[15]. Yu J, Chang W-S, Dong Y. Building Energy Prediction Models and Related Uncertainties: A Review. Buildings 2022;12(8):1284.

[16]. Lu C ,Li S, Lu Z. Building energy prediction using artificial neural networks: A literature survey. Energy and Buildings. 2022;262:111718.

[17]. Weinberg D, Wang Q, Timoudas TO, Fischione C. A Review of Reinforcement Learning for Controlling Building Energy Systems From a Computer Science Perspective. Sustainable Cities and Society. 2023;89:104351.

[18]. Wang D, Zheng W, Wang Z, Wang Y, Pang X, Wang W. Comparison of reinforcement learning and model predictive control for building energy system optimization. Applied Thermal Engineering. 2023;228:120430.

[19]. Solinas FM, Macii A, Patti E, Bottaccioli L. An online reinforcement learning approach for HVAC control. Expert Systems with Applications. 2024;238, Part A:121749.

[20]. Lin C-H, Tsay Y-S. A practical decision process for building façade performance optimization by integrating machine learning and evolutionary algorithms. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2024 23(2):740-53.

[21]. Batres R, Dadras Y, Mostafazadeh F, Kavgic M. MEVO: A Metamodel-Based Evolutionary Optimizer for Building Energy Optimization. Energies. 2023;16(20):7026.

[22]. Li Z, Zhao Y, Xia H, Xie S. A multi-objective optimization framework for building performance under climate change. Journal of Building Engineering. 2023;80:10797.۸
[23]. Chen Z, O'Neill Z, Wen J, Pradhan O, Yang T, Lu X. A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. Applied Energy. 2023;339:121030.
[24]. Zhang F, Saeed N, Sadeghian P. Deep learning in fault detection and diagnosis of building HVAC systems: A systematic review with meta analysis. Energy and AI. 2023;12:100235.
[25]. Zhang B, Rezgui Y, Luo Z, Zhao T. Fault detection research on novel transfer learning-based method for cross-condition, cross-system and cross-operation in public building HVAC sensors. Energy. 2024;313:133704.
[26]. Cespedes-Cubides AS, Jradi, M .A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. Energy Informatics. 2024;7(Article 11).
[27]. Boukaf M, Fadli F ,Meskin N. A Comprehensive Review of Digital Twin Technology in Building Energy Consumption Forecasting. IEEE Access. 2024;12:187778-99.
[28]. Benfer R, Müller J. Semantic digital twin creation of building systems through time series based metadata inference – A review. Energy and Buildings. 2024;321:114637.
[29]. Raymand F, Najafi B, Mamaghani AH, Moazami A, Rinaldi F. Machine learning-based estimation of buildings' characteristics employing electrical and chilled water consumption data: Pipeline optimization. Energy and Buildings. 2023;295:113327.
[30]. Abramczyk J. Parametric building forms rationalizing the incident direct solar irradiation. Building and Environment. 2022;215:108963.
[31]. Soleimanijavid A, Konstantzos I, Liu X. Challenges and opportunities of occupant-centric building controls in real-world implementation: A critical review. Energy and Buildings. 2024;308:113958.
[32]. Awuzie B, Ngowi A, Aghimien D. Towards built environment Decarbonisation: A review of the role of Artificial intelligence in improving energy and Materials' circularity performance. Energy and Buildings. 2024;319:114491.
[33]. Gachkar D, Gachkar S, Martínez AG, Aghlmand S, Ahmadi J. Artificial intelligence in building life cycle assessment. Architectural Science Review 2024; 67(6):484-502.
[34]. Yussuf RO, Asfour OS. Applications of artificial intelligence for energy efficiency throughout the building lifecycle: An overview. Energy and Buildings. 2024;305:113903.
[35]. Gunasena, L. U. E. G., Alazab, A., Talukder, M. A. Artificial intelligence for energy optimization in smart buildings: A systematic review and meta-analysis. Energy Informatics. 2025;8:135.
[36]. Li, Y., Antwi-Afari, M. F., Anwer, S., Mehmood, I., et al. Artificial intelligence in net-zero carbon emissions for sustainable building projects: A systematic literature and science mapping review. Buildings. 2024; 14(9): 2752.
[37]. Zhang L, Chen, Z., Zhang, X. et al. Challenges and opportunities of machine learning control in building operations. Building Simulation. 2023;16:831–52.
[38]. Mousavi S, Villarreal-Marroquín MG, Hajiaghaei-Keshteli M, Smith NR. Data-driven prediction and optimization toward net-zero and positive-energy buildings: A systematic review. Building and Environment. 2023;242:110578.
[39]. Bakar AA, Yussof S, Ghapar AA, Sameon SS, Jørgensen BN .A Review of Privacy Concerns in Energy-Efficient Smart Buildings: Risks, Rights, and Regulations. Energies 2024;17(5):977.
[40]. Rjoub G, Bentahar J, Wahab OA, Mizouni R, Song A, Cohen R. A Survey on Explainable Artificial Intelligence for Cybersecurity .IEEE Transactions on Network and Service Management. 2023;20(4):5115-40.
[41]. Murthy A, Asghar MR, Tu W. A lightweight Intrusion Detection for Internet of Things-based smart buildings. Security and Privacy. 2024;7(4):e386.
[42]. Eck NJv, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics 2010;84:523–38.
[43]. Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research. 2021;133:285-96.

[44]. Masoumnezhad M. Development of an Operational Framework for Smart Management and Energy Flexibility in Net-Zero Energy Buildings. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2026;57(12).

[45]. Diamond IR, Grant, R. C., Feldman, B. M., et al . .Defining consensus: A systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies. Journal of Clinical Epidemiology. 2014;67(4):401-9.

[46]. Okoli C, & Pawlowski, S. D. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. Information & Management. 2004;42(1):15-29.